



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Retratamiento de relavera para la recuperación de Au
y Ag y aplicación de la fitorremediación**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctora en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Flor Angel CASTILLON HILARIO

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Castillon, F. (2026). *Retratamiento de relavera para la recuperación de Au y Ag y aplicación de la fitorremediación*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Flor Angel Castillon Hilario
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	15436720
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0005-5204-4106
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojos
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Julia Marilú Calderón Celis
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07920871
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Nora Rosa Concepción Malca Casavilca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08129250
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01066653
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.2.1. Remediación de agua, aire y suelo C.0.2.2. Tecnologías para mitigar los impactos ambientales de las actividades industriales C.0.2.6. Tecnología limpia y medio ambiente en metalurgia
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Urbanización: Ciudad Universitaria Avenida: Av. Venezuela 3789 Latitud: -12.0569 Longitud: -77.0850
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 – 2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Biorremediación, Biotecnologías de diagnóstico en la gestión ambiental http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.08.02



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los diecinueve días del mes de febrero del año dos mil veintiséis, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen Nº 000116-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 16 de febrero del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«RETRATAMIENTO DE RELAVERA PARA LA RECUPERACIÓN DE Au Y Ag Y APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN»

Presentado por la Mg. **FLOR ANGEL CASTILLON HILARIO**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA** en **CIENCIAS AMBIENTALES**.

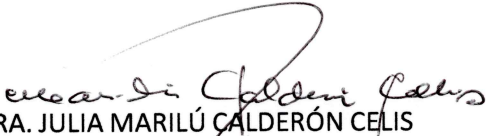
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente Nº UNMSM-20240104601 de fecha 22 de octubre del 2024, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral Nº 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

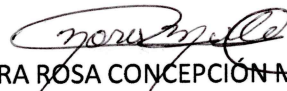
Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

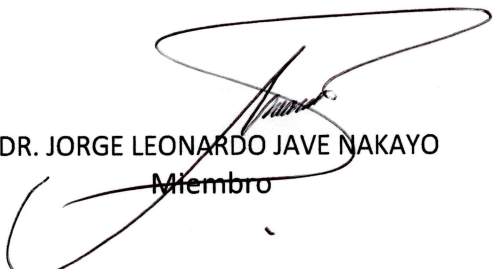
Bueno (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA** en **CIENCIAS AMBIENTALES** a la Mg. **FLOR ANGEL CASTILLON HILARIO**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DRA. JULIA MARILÚ CALDERÓN CELIS
Presidente


DRA. NORA ROSA CONCEPCIÓN MALCA CASAVILCA
secretario


DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Miembro


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Asesor

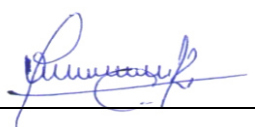
Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG N° 000272-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis**, cuyo título es **«RETRATAMIENTO DE RELAVERA PARA LA RECUPERACIÓN DE Au Y Ag Y APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN»**, presentado por la **magister** FLOR ANGEL CASTILLON HILARIO, para optar el grado académico de DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **18%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES.

Lima, 16 de Abril de 2025

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor: Vidal Sixto Aramburú Rojas

DNI: 08608364

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mis padres, Emigidia y Andrés (Q.E.P.D.), siempre presentes en mi mente, por haber dedicado su vida en darme educación, bienestar y mucho amor.

A mi hija Solange, por su amor incondicional y comprensión, para tolerar mis ausencias en casa, alentarme y animarme constantemente a alcanzar esta meta.

A mi esposo, Juan Carlos, por darme siempre su apoyo, comprensión, compañía y dedicación.

Al Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas, quien fue mi asesor de mi tesis doctoral en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, muchas gracias por todo su apoyo.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a mi asesor quien como catedrático me orientó con su experiencia y conocimientos para lograr el objetivo trazado.

A mi esposo Juan Carlos y a mi hija Solange, por siempre apoyarme con su tiempo, aliento y motivación para el desarrollo de esta investigación.

A mis familiares y amigos que contribuyeron en que se concrete esta investigación.

RESUMEN

Los valores metálicos de oro y plata presentes en el depósito de relaves de una minera en el sur del Perú alcanzaron valores de 1.72 g/t de Au y 31.76 g/t de Ag. Asimismo, se evidenció la necesidad de remediar los relaves debido a que contienen concentraciones de 1077 mg-Pb/Kg y 196 mg-As/Kg. Frente a esta situación, se efectuaron ensayos metalúrgicos orientados a la recuperación de oro y plata desde dichos relaves. Para ello, se tomó una muestra representativa y se evaluó bajo microscopía óptica, identificándose electrum asociada a goethita, con un grado de liberación de 38.46%. En base a esta caracterización mineralógica, se llevaron a cabo pruebas de lixiviación en botella utilizando el reactivo ecológico Sandioss, logrando recuperaciones de 52.08% para el Au y 82.29% para el Ag en 24 horas, con un consumo de 8.45 Kg/t de reactivo ecológico y 2.11 Kg/t de cal.

Con el propósito de disminuir los niveles de plomo y arsénico que sobrepasan los LMP contenidos en el relave, se realizaron ensayos de fitorremediación empleando especies locales como Tuna, Sábila, Casuarina, Tara, Geranio y Planta Hormiga. Tras un periodo de seis meses de seguimiento del crecimiento y adaptación de estas especies, se constató que la *Caesalpinia spinosa* (Tara) logró desarrollarse en un sustrato compuesto por 1.94 % de guano, 0.97 % de yeso y 97.09 % de relave, alcanzando una absorción de 30.62 % de Pb y 30.30 % de As. Los resultados del análisis ICP aplicado al suelo tratado mediante fitorremediación reportó concentraciones finales de 637.1 mg/Kg de Pb y 101.6 mg/Kg de As, valores que se encuentran dentro de los límites establecidos, los cuales consideran máximos de 800 mg-Pb/Kg y 140 mg-As/Kg.

Palabras claves: Fitorremediación, metales pesados, Sandioss, Tara.

ABSTRACT

The metallic values of gold and silver present in a mining company's tailings deposit in southern Peru reached values of 1.72 g/MT of Au and 31.76 g/MT of Ag. Furthermore, the need to remediate the tailings was evident due to their concentrations of 1077 mg-Pb/kg and 196 mg-As/kg. Faced with this situation, metallurgical tests were carried out aimed at the recovery of gold and silver from said tailings. For this purpose, a representative sample was taken and evaluated under optical microscopy, identifying electrum associated with goethite, with a liberation degree of 38.46%. Based on this mineralogical characterization, bottle leaching tests were conducted using the environmentally friendly reagent Sandioss, achieving recoveries of 52.08% for Au and 82.29% for Ag in 24 hours, with a consumption of 8.45 kg/MT of the eco-friendly reagent and 2.11 kg/MT of lime.

With the goal of reducing lead and arsenic levels that permissible limits contained in the tailings, phytoremediation trials were conducted using local species such as prickly pear, aloe vera, casuarina, tara, geranium, and ant plant. After a six-month period of monitoring the growth and adaptation of these species, it was found that *Caesalpinia spinosa* (tara) managed to develop in a substrate composed of 1.94% guano, 0.97% gypsum and 97.09% tailings, reaching an absorption of 30.62% Pb and 30.30% As. The results of the ICP analysis applied to the soil treated by phytoremediation reported final concentrations of 637.1 mg/Kg of Pb and 101.6 mg/Kg of As, values that are below the established limits, the maximum limits being 800 mg-Pb/Kg and 140 mg-As/Kg.

Keywords: Phytoremediation, heavy metals, Sandioss, Tara.

RESUMO

Os teores metálicos de ouro e prata presentes no depósito de rejeitos de uma mina no sul do Peru atingiram 1,72 g/MT de Au e 31,76 g/MT de Ag. Além disso, a necessidade de remediação dos rejeitos tornou-se evidente devido às suas concentrações de 1077 mg-Pb/Kg e 196 mg-As/Kg. Em resposta a essa situação, foram realizados testes metalúrgicos para a recuperação de ouro e prata desses rejeitos. Uma amostra representativa foi coletada e avaliada por microscopia óptica, identificando-se electrum associado à goethita, com um grau de liberação de 38,46%. Com base nessa caracterização mineralógica, foram conduzidos testes de lixiviação em frasco utilizando o reagente ecologicamente correto Sandioss, obtendo-se recuperações de 52,08% para Au e 82,29% para Ag em 24 horas, com um consumo de 8,45 kg/MT de reagente ecologicamente correto e 2,11 kg/MT de cal.

Para reduzir os níveis de chumbo e arsênio acima dos limites máximos permitidos (LMP) nos rejeitos, foram realizados ensaios de fitorremediação utilizando espécies locais como cacto figo-da-índia, babosa, casuarina, tara, gerânio e planta-formiga. Após um período de monitoramento de seis meses do crescimento e adaptação dessas espécies, constatou-se que a *Caesalpinia spinosa* (tara) desenvolveu-se com sucesso em um substrato composto por 1,94% de guano, 0,97% de gesso e 97,09% de rejeitos, atingindo uma absorção de 30,62% de Pb e 30,30% de As. Os resultados da análise ICP aplicada ao solo tratado por fitorremediação apresentaram concentrações finais de 637,1 mg/kg de Pb e 101,6 mg/kg de As, valores que se encontram dentro dos limites estabelecidos, que consideram máximos de 800 mg-Pb/kg e 140 mg-As/kg.

Palavras-chave: Fitorremediação, metais pesados, Sandioss, Tara.

NOMENCLATURA

g /t	:	Gramos por tonelada
%	:	Porcentaje
mg/kg	:	Miligramo por kilogramo
pH	:	Potencial de hidrógeno
msnm	:	Metros sobre el nivel del mar
°C	:	Grados centígrados
v/cm	:	Voltaje por centímetro
μS/cm	:	Micro siemens por centímetro
kg/ha	:	Kilogramo por hectárea
kg/h	:	Kilogramo por hora
XRD	:	Difracción de rayos X
ppm	:	Partes por millón
m ²	:	Metro cuadrado
mL	:	Mililitros
mg/L	:	Miligramos por litro
g/cm ³	:	Gramo por centímetro cúbico
μm	:	micrómetro
m ² /h	:	Metros cuadrados por hora
m ³ /h	:	Metros cúbicos por hora
t/h	:	Toneladas por hora
PAM's	:	Pasivos Ambientales Mineros
kg	:	Kilogramo
Oz	:	Onza
min	:	Minutos
t	:	Tonelada métrica seca
N	:	Número de partículas
%V	:	Porcentaje de volumen
oz/tc	:	Onzas por toneladas cortas
psi	:	Libra por pulgada cuadrada

P80	:	Tamaño de partícula 80% pasante por un
tamiz		
μ	:	Micra
L/S	:	Relación líquido-sólido
G's	:	Fuerza de gravedad.
GL	:	Grados de libertad
SC	:	Suma de cuadrados
MC	:	Media de cuadrados
EE	:	Error estándar
S	:	Desviación estándar
R^2	:	Coefficiente de determinación

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación Problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. Justificación Teórica	2
1.4. Justificación Práctica.....	3
1.5. Objetivos de la Investigación	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Hipótesis.....	4
1.6.1. Hipótesis General	4
1.6.2. Hipótesis Específicas	4
1.6.3. Matriz de Consistencia.....	5
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	6
2.1. Marco Epistemológico	6
2.2. Antecedentes del Problema	8
2.2.1. Nivel Internacional.....	8
2.2.2. Nivel Nacional	9
2.3. Bases Teóricas.....	11
2.3.1. Procesamiento de minerales auríferos.....	11
2.3.1.1. Concentración Gravimétrica.	11
2.3.1.1.1. Fundamentos y Criterios de Aplicación de la Concentración Gravimétrica.	12
2.3.1.1.2. Técnicas de Concentración Gravimétrica.	13
2.3.1.1.3. Equipos de Concentración Gravimétrica.	14
2.3.1.2. Flotación.....	20
2.3.1.2.1. Flotación de Oro y Plata.....	20

2.3.1.3.	Lixiviación de Menas con Contenido de Metales Preciosos.	26
2.3.1.3.1.	Factores que determinan la Solubilidad de Oro y Plata en un Medio Cianurado.....	27
2.3.2.	Relaves Mineros y Alternativas de Retratamiento.....	32
2.3.3.	Fitorremediación	35
2.3.3.1.	Contaminación del Suelo y Metales Pesados.....	36
2.3.3.2.	Microorganismos para el Tratamiento de Suelo y Metales Pesados.	37
2.3.3.3.	Tecnologías de Remediación.	38
2.3.3.3.1.	Clasificación de Tecnologías de Remediación.....	38
2.3.3.3.2.	Principales Tecnologías de Remediación según el Método de Tratamiento.....	40
2.3.3.4.	Tecnologías de Fitorremediación.....	42
2.3.3.4.1.	Tipos de fitorremediación.	43
2.3.4.	Toxicidad por Metales Pesados en Plantas	53
2.3.4.1.	Origen y Ocurrencia	54
2.3.4.2.	Movilidad, absorción y acumulación de metales pesados.	55
2.3.4.3.	Mecanismo de Tolerancia al Metal.....	58
2.3.4.4.	Efecto sobre el Crecimiento y el Desarrollo.	59
2.3.4.5.	Efecto sobre la Fisiología Vegetal.	63
2.3.4.6.	Efecto sobre las Enzimas y Otros Compuestos.....	67
2.3.5.	Metales Pesados	70
2.3.5.1.	Plomo.	71
2.3.5.2.	Arsénico.	72
2.3.6.	Identificación de Plantas frente a la Presencia de Metales Pesados en el Suelo	75
2.3.7.	Cálculo de las Relaciones de Concentración	77
2.3.7.1.	Factor de Bioconcentración (BCF).	77
2.3.7.2.	El Factor de Translocación (TF).	77
CAPÍTULO III METODOLOGÍA		79

3.1.	Antecedentes del Problema	79
3.2.	Variables de Investigación	79
3.2.1.	Variable Independiente (VI)	79
3.2.2.	Variable Dependiente (VD)	79
3.2.3.	Matriz de Operacionalización de Variables	80
3.3.	Unidad de Análisis	81
3.3.1.	Ubicación Geográfica.....	81
3.3.2.	Levantamiento Topográfico	82
3.3.3.	Determinación del Volumen de la Relavera	83
3.3.3.1.	Etapas de Campo.	83
3.3.3.2.	Etapas de Poscampo.	84
3.3.3.3.	Resultados del Estudio Topográfico	86
3.4.	Población y Muestra.....	87
3.4.1.	Población.....	87
3.4.2.	Muestra.....	87
3.4.3.	Tipo de Muestreo	90
3.4.3.1.	Características Mineralógica del Relave.....	91
3.4.3.1.1.	Análisis en Sección Delgada	91
3.4.3.1.2.	Análisis en Sección Pulida	92
3.4.3.1.3.	Distribución Elemental en los Minerales Observados.....	92
3.4.3.1.4.	Distribución Volumétrica Porcentual.....	93
3.4.3.1.5.	Grado de Liberación.....	94
3.4.3.1.6.	Interpretación de los Grados de Liberación de los Minerales que han Intervenido en el Análisis Modal.	95
3.4.3.1.7.	Fotomicrografías	100
3.5.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	102
3.5.1.	Técnica de Investigación.....	103
3.5.2.	Instrumentos de Investigación	103
3.5.3.	Procedimiento Metodológico y Trabajo de Campo .	104
3.5.3.1.	Etapas de Campo.	104
3.5.3.2.	Etapas de Laboratorio.....	105

3.5.3.3.	Etapa Experimental de Fitorremediación.....	106
3.5.3.4.	Criterios de Escalamiento y Tamaño de Planta Piloto.	106
3.6.	Análisis e Interpretación de la Información	107
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		108
4.1.	Presentación de Resultados	108
4.1.1.	Estudio Metalúrgico del Relave	108
4.1.2.	Análisis Granulométrico	108
4.1.3.	Lixiviación	111
4.1.3.1.	Pruebas Metalúrgicas de Lixiviación con Reactivos Ecológicos.....	113
4.1.4.	Flotación.....	125
4.1.5.	Concentración Gravimétrica	127
4.1.6.	Fitorremediación	129
4.1.6.1.	Recolección y Selección de Especies Vegetales..	129
4.1.6.2.	Preparación de Terreno y Determinación de la Especie Vegetal Adecuada.....	130
4.1.6.2.1.	Análisis de Metales Totales por ICP.....	130
4.1.6.2.2.	Preparación de Terreno.	133
4.1.6.2.3.	Determinación de la Especie Vegetal. ..	135
4.1.6.3.	Muestreo de Suelos y Plantas después de la Remediación.....	136
4.1.6.4.	Análisis de Metales Totales por ICP.....	138
4.1.7.	Análisis de Metales Pesados de la Planta.....	138
4.1.8.	Concentración de los Metales Pesados en el Suelo (Relave)	140
4.1.8.1.	Factores de Bioconcentración y Traslocación.....	142
4.2.	Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados	142
4.3.	Comprobación de Hipótesis	145
4.3.1.	Hipótesis Específica 1	145
4.3.2.	Hipótesis Específica 2	147
4.3.3.	Hipótesis Específica 3	149
CAPÍTULO V IMPACTOS.....		151

5.1.	Propuesta para la Solución del Problema.....	151
5.2.	Costos de Implementación de la Propuesta.....	153
5.2.1.	Costos de Tratamiento.....	154
5.2.2.	Costos Directos de Producción	154
5.2.3.	Costos Indirectos de Producción.....	155
CONCLUSIONES		157
RECOMENDACIONES		158
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		159
ANEXOS		174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 Rangos de tamaño tratados por equipos de concentración gravimétrica	13
Tabla 3 Equipos de concentración por gravedad	14
Tabla 4 Colectores para flotación de oro	24
Tabla 5 Composición química del Sandioss	32
Tabla 6 Tecnologías destacadas para la remediación de suelos y aguas subterráneas organizadas según el método de tratamiento aplicado	41
Tabla 7 Principales beneficios y limitaciones de las tecnologías de remediación, organizadas según el método de tratamiento aplicado	42
Tabla 8 Ejemplos de fitoacumuladores y su potencial de acumulación.....	46
Tabla 9 Mecanismos de fitorremediación	53
Tabla 10 Operacionalización de Variables	80
Tabla 11 Límites de la relavera en estudio.....	82
Tabla 12 Topografía mediante estación total en modo libre.....	83
Tabla 13 Planos topográficos	86
Tabla 14 Características fisicoquímicas del relave	88
Tabla 15 Análisis químico del compósito de relave	89
Tabla 16 Minerales encontrados en la sección delgada	91
Tabla 17 Minerales encontrados en la sección pulida.....	92
Tabla 18 Distribución volumétrica porcentual.....	94
Tabla 19 Grado de liberación de los minerales en la muestra de relave	95
Tabla 20 Volúmenes y grados de liberación de la muestra de relave	98
Tabla 21 Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa del relave.....	99
Tabla 22 Descripción de la toma de muestra por niveles.....	109
Tabla 23 Leyes de cabeza de la muestra	111
Tabla 24 Condiciones de operación de la lixiviación	111
Tabla 25 Control en el tiempo de los parámetros	112
Tabla 26 Control del reactivo.....	113

Tabla 27 Balance Metalúrgico de Au y Ag - Cianuración por agitación en botella en 72 horas	113
Tabla 28 Condiciones de operación de lixiviación con sandioss para muestra de relave	114
Tabla 29 Diseño factorial de la lixiviación con sandioss	114
Tabla 30 Prueba 1 de la lixiviación con Sandioss (t = 12h, Concentración de Sandioss = 1000ppm)	115
Tabla 31 Prueba 2 de la lixiviación con Sandioss (t = 24h, Concentración de Sandioss = 1000ppm)	115
Tabla 32 Prueba 3 de la lixiviación con sandioss (t = 12h, Concentración de Sandioss = 3000ppm)	115
Tabla 33 Prueba 4 de la lixiviación con sandioss (t = 24h, Concentración de Sandioss = 3000ppm)	116
Tabla 34 Prueba 5 de la lixiviación con Sandioss (t = 12h, Concentración de Sandioss = 1000ppm)	116
Tabla 35 Prueba 6 de la lixiviación con Sandioss (t = 24h, Concentración de Sandioss = 1000ppm)	116
Tabla 36 Prueba 7 de la lixiviación con Sandioss (t = 12h, Concentración de Sandioss = 3000ppm)	117
Tabla 37 Prueba 8 de la lixiviación con Sandioss (t = 24h, Concentración de Sandioss = 3000ppm)	117
Tabla 38 Análisis de varianza para la recuperación de oro	118
Tabla 39 Resumen del modelo para la recuperación de oro	118
Tabla 40 Coeficientes de codificación para la recuperación de oro	118
Tabla 41 Análisis de varianza para la recuperación de plata	121
Tabla 42 Resumen del modelo para la recuperación de plata	121
Tabla 43 Coeficientes de codificación para la recuperación de plata	121
Tabla 44 Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 6 h	123
Tabla 45 Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 12 h	124
Tabla 46 Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 18 h	124
Tabla 47 Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 24 h	125
Tabla 48 Condiciones de operación para pruebas metalúrgicas de flotación	126
Tabla 49 Balance metalúrgico de la prueba de flotación	126

Tabla 50 Condiciones de operación de la concentración centrífugo gravimétrico ..	127
Tabla 51 Resultados de la Concentración gravimétrica a 80% - Malla 200	127
Tabla 52 Resultados de la Concentración gravimétrica a 85% - Malla 200	128
Tabla 53 Resultados de la Concentración gravimétrica a 90% - Malla 200	128
Tabla 54 Resultados de la Concentración gravimétrica a 95% - Malla 200	128
Tabla 55 Plantas recolectadas para el estudio	130
Tabla 56 ICP del relave reprocesado	132
Tabla 57 Composición de la poza 1 con variedades de plantas de la zona	133
Tabla 58 Composición de la poza 2 con variedades de plantas de la zona	133
Tabla 59 Resumen de las pruebas realizadas	136
Tabla 60 Análisis por metales pesados en la planta	139
Tabla 61 Análisis por metales pesados en el suelo fitorremediado	140
Tabla 62 Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Peruano para suelos industriales	141
Tabla 63 Valores representativos de recuperación de Au y Ag	146
Tabla 64 Resumen de estadísticos para la recuperación de oro	146
Tabla 65 Resumen de estadísticos para la recuperación de plata.....	147
Tabla 66 Resumen de los datos reportados de absorción de la planta	147
Tabla 67 Resumen de estadísticos para la fitoextracción de arsénico en la raíz de la planta	148
Tabla 68 Resumen de estadísticos para la fitoextracción de arsénico en la parte aérea de la planta	148
Tabla 69 Resumen de estadísticos para la fitoextracción de plomo en la raíz de la planta	148
Tabla 70 Resumen de estadísticos para la fitoextracción de plomo en la parte aérea de la planta	148
Tabla 71 Resumen del ensayo químico del relave fitorremediado	149
Tabla 72 Resumen de estadísticos para la concentración de arsénico en el relave fitorremediado	149
Tabla 73 Resumen de estadísticos para la concentración de plomo en el relave fitorremediado	150
Tabla 74 Valorización de oro y plata en la relavera.....	153
Tabla 75 Costos por equipo.....	154

Tabla 76 Costos por insumos	154
Tabla 77 Costos por trabajador	155
Tabla 78 Costos por mantenimiento	155
Tabla 79 Costos por servicios básicos	155
Tabla 80 Costos por servicios de trabajadores	156
Tabla 81 Estimación de Ingresos y egresos del proyecto	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fenómeno de la estratificación según densidades relativas.....	15
Figura 2 Esquema básico de un JIG	17
Figura 3 Mesa vibratoria	18
Figura 3 Cómo influye la concentración de las soluciones cianuradas en la disolución de oro y plata	32
Figura 5 Eficiencia de recuperación de metales preciosos en relación con la temperatura del proceso (°C)	34
Figura 6 La cantidad de PAM's ha mostrado un crecimiento continuo desde 2006 hasta 2019	36
Figura 7 PAM's por departamento.....	36
Figura 8 Diagrama de los criterios utilizados para clasificar las tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas	45
Figura 9 Proceso involucrado en la eliminación de contaminantes del suelo mediante fitoextracción.....	49
Figura 10 Proceso implicado en la fitoextracción de contaminantes del suelo	54
Figura 11 Respuestas típicas de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo.....	111
Figura 12 Mecanismos de fitoestabilización y fitoextracción que ocurren a lo largo del sistema planta-suelo, desde las raíces hasta los tallos.....	114
Figura 13 Mecanismos de fitoestabilización y fitoextracción que ocurren a lo largo del sistema suelo-raíz-tallo en las plantas.....	81
Figura 14 Límites de la relavera en estudio	82
Figura 15 Polígono de la berma	84
Figura 16 Puntos de levantamiento topográfico.....	85
Figura 17 Curvas de nivel de la relavera en estudio	86
Figura 18 Volumen de la relavera de 190,348.11 m ³	87
Figura 19 Muestreo del compuesto de relave	90
Figura 20 Porcentaje de minerales encontrados en la sección delgada (%).....	92
Figura 21 Distribución volumétrica de las especies mineralógicas (%)	94
Figura 22 Grado de liberación de las especies mineralógicas.....	95

Figura 23 Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt); adyacente están las partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs).....	100
Figura 24 Partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de pirita con la marcasita (py+mc) y de hematita con la ganga (hm+GGs)	100
Figura 25 Partículas libres de calcopirita 8cp, de goethita (gt) y de gangas (GGs)	100
Figura 26 Partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de pirita con la marcasita (py+mc) y de hematita con la ganga (hm+GGs).	100
Figura 27 Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de magnetita con la hematita (mt+hm) y de goethita (gt) con la ganga (GGs).....	101
Figura 28 Partículas libres de calcopirita (cp), de pirita (py), de goethita (gt) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de hematita (hm) con la ganga (GGs) y del rutilo (rt) con la ganga (GGs).....	101
Figura 29 Partículas libres de pirita (pi) y de gangas (GGs); partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y partícula entrelazada de hematita (hm) con la ganga (GGs)).....	101
Figura 30 Partícula entrelazada hematita con la ganga (hm+GGs) y partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs)	101
Figura 31 Partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la pirita (py) y partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs) 500X.	102
Figura 32 Partículas libres de esfalerita (ef) y de gangas (GGs) 500X.....	102
Figura 33 Partículas libres de hematita (hm), de gangas, de rejalgá (rjg), de goethita (gt) y de gangas (GGs)	102
Figura 34 Partículas libres de esfalerita (ef) y de gangas (GGs).....	102
Figura 35 Contenido de Au según la granulometría	109
Figura 36 Contenido de Ag según la granulometría	110
Figura 37 Cinética de la recuperación de oro y plata.....	112
Figura 38 Pareto de efectos estandarizados para la recuperación de oro	119
Figura 39 Gráfica normal de efecto estandarizados para la recuperación de oro ...	119
Figura 40 Pareto de efectos estandarizados para la recuperación de plata	122
Figura 41 Gráfica normal de efecto estandarizados para la recuperación de plata.	123
Figura 42 Cinética de lixiviación con sandioss.....	125

Figura 43 Recuperación de oro y plata a distintas granulometrías	129
Figura 44 Acondicionado de la poza.....	134
Figura 45 Riego de lixiviación de sales	134
Figura 46 Aplicado de guano y yeso agrícola.....	134
Figura 47 Conductividad eléctrica al inicio de la prueba.....	134
Figura 48 Sembrado de especies en la poza 1	134
Figura 50 Sembrado de especies en la poza 2.....	134
Figura 50 Regado de las especies vegetales.....	135
Figura 51 Especies vegetales sembradas en las pozas de relave en estudio	135
Figura 52 Vista fotográfica de la poza 1, se puede apreciar que las plantas continuaron con su crecimiento	135
Figura 53 Vista fotográfica de la poza 2, se aprecia la alta mortandad por las características de un suelo agresivo, pero la tara siguió con su crecimiento	135
Figura 54 Vista fotográfica de la poza 3 con <i>Caesalpinia spinosa</i> en un suelo con características de la poza 2.....	136
Figura 55 Datos de la vegetación	137
Figura 56 Comparación de las concentraciones de metales pesados	141
Figura 57 Diagrama del proceso propuesto	176

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

A nivel mundial, la actividad minera aurífera genera grandes volúmenes de relaves que contienen metales pesados y reactivos residuales provenientes de los procesos de beneficio, principalmente cianuro. La inadecuada gestión de estos depósitos ha ocasionado contaminación de suelos y cuerpos de agua, así como la generación de drenaje ácido y liberación de elementos tóxicos como arsénico y plomo, constituyendo uno de los principales pasivos ambientales de la minería moderna.

En el Perú, como país productor de oro y plata, esta problemática se intensifica debido a la existencia de numerosas plantas de procesamiento que han operado con tecnologías convencionales, muchas veces sin planes adecuados de cierre de relaves. En regiones como Ayacucho, el incremento de la contaminación generada por depósitos de relaves provenientes de plantas de cianuración, tanto formales como informales, representa un riesgo ambiental significativo.

La planta de cianuración ubicada en el distrito de Sancos, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho, recibe minerales auríferos de distintas zonas del país, cuyas leyes y asociaciones mineralógicas son variables, lo que dificulta la optimización del proceso metalúrgico. Históricamente, los depósitos de relaves fueron contruidos de manera artesanal y sin un tratamiento integral, quedando la poza

relavera N.º 2 como un pasivo ambiental sin cierre definitivo. Este depósito presenta leyes promedio de 1.72 g Au/t y 31.76 g Ag/t, evidenciando tanto un potencial económico remanente como la presencia de metales pesados que pueden generar impactos fisicoquímicos adversos en el entorno.

En este contexto, surge la necesidad de evaluar alternativas que permitan, por un lado, mejorar la recuperación de Au y Ag mediante técnicas de retratamiento más sostenibles, como la lixiviación con Sandioss, y por otro, incrementar la eficiencia de remediación del relave a través de la aplicación de fitorremediación. De esta manera, se busca integrar una solución que combine recuperación metalúrgica y mitigación ambiental frente a los pasivos generados por la actividad minera.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

- ¿Cuál fue el efecto del retratamiento del relave de la relavera en la recuperación de Au y Ag y en la aplicación de la fitorremediación como postratamiento?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿En qué medida el retratamiento del relave fue factible para la recuperación de Au y Ag de la relavera?
- ¿Qué técnica de fitorremediación adecuada se aplicó al postratamiento del relave tratado?
- ¿Cuál fue el cambio fisicoquímico que se produce en el relave tras el postratamiento?

1.3. Justificación Teórica

La investigación sobre el retratamiento de relaves mineros y la implementación de métodos de fitorremediación continúa avanzando dentro de las áreas de la ingeniería

ambiental y metalúrgica. Existen antecedentes relacionados con la recuperación de metales preciosos, como oro (Au) y plata (Ag), a partir de relaves antiguos, principalmente mediante procesos hidrometalúrgicos convencionales. En ese contexto, la presente investigación propone un enfoque sin adición de reactivos químicos, como alternativa sostenible y de menor impacto ambiental.

Asimismo, en el campo de la remediación ambiental, la fitorremediación ha sido estudiada principalmente en suelos contaminados, pero su aplicación en relaves tratados metalúrgicamente sigue siendo limitada. Esta investigación busca aportar al conocimiento científico al evaluar la efectividad de especies vegetales adaptadas a condiciones fisicoquímicas adversas, aportando información relevante sobre su uso en postratamientos mineros.

Por lo tanto, el presente trabajo contribuye a enriquecer el marco teórico en dos áreas clave: el aprovechamiento de recursos remanentes en pasivos ambientales mineros y el desarrollo de tecnologías limpias para su recuperación y estabilización.

1.4. Justificación Práctica

La investigación permitió buscar, de ser económicamente factible, un esquema de tratamiento para recuperar los elementos valiosos contenidos en la poza relavera N°2, de forma que el estudio de la investigación se proyecte en la aplicación a nivel planta piloto y generar una oportunidad de creación de valor como objetivo del proyecto minero.

Los resultados de la investigación beneficiarán a diversas empresas que tienen esta problemática con sus pasivos ambientales, este proyecto será una de las distintas alternativas de solución para el tratamiento de sus relaves, ya que estos relaves tienen diferente composición química o han tenido diferente tratamiento, por lo que es adecuado caracterizar cada relave y hacer un estudio completo como el indicado en esta investigación.

1.5. Objetivos de la Investigación

1.5.1. Objetivo General

- Determinar el efecto del retratamiento de la relavera en la recuperación de Au y Ag y aplicación de la fitorremediación.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar la recuperación de Au y Ag obtenida mediante el retratamiento del relave de la relavera.
- Determinar la técnica de fitorremediación adecuada en el postratamiento del relave tratado.
- Determinar los cambios fisicoquímicos que se producen en el relave después del postratamiento.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

- El retratamiento y la fitorremediación de la relavera determina una eficiente recuperación de valores y una óptima remediación en el relave final.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- El retratamiento del relave permite recuperar valores económicamente rentables de Au y Ag de la relavera.
- La aplicación de la técnica de fitoextracción permite remediar el relave del postratamiento de la relavera.
- El postratamiento del relave produce cambios significativos en sus características fisicoquímicas.

1.6.3. Matriz de Consistencia

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	HIPÓTESIS	VARIABLES	TIPO DE INVESTIGACIÓN	POBLACIÓN Y MUESTRA	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Problema General ¿Cuál fue el efecto del retratamiento del relave de la relavera en la recuperación de Au y Ag y en la aplicación de la fitorremediación como postratamiento?	Objetivo General Determinar el efecto del retratamiento de la relavera en la recuperación de Au y Ag, así como en la aplicación de la fitorremediación.	Hipótesis General El retratamiento y la fitorremediación de la relavera determina una eficiente recuperación de valores y una óptima remediación en el relave final.	Variables VI: Fitorremediación VD: Eficiencia de la remediación	La presente investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, de nivel explicativo, y de diseño experimental, debido a que manipula variables independientes	La población está constituida por la totalidad del relave almacenado en la relavera objeto de estudio, proveniente de operaciones previas de beneficio mineral.	Ensayos experimentales de lixiviación en botella bajo diseño factorial (variación de concentración y tiempo).
Problemas Específicos ¿En qué medida el retratamiento del relave fue factible para la recuperación de Au y Ag de la relavera?	Objetivo Específicos Determinar la recuperación de Au y Ag obtenida mediante el retratamiento del relave de la relavera.	Hipótesis Específicas El retratamiento del relave permite recuperar valores económicamente rentables de Au y Ag de la relavera.	Variables VI: Lixiviación con Sandioss VD: Recuperación de Au y Ag	(concentración y tiempo en lixiviación; aplicación de fitorremediación) para evaluar su efecto sobre variables dependientes (recuperación de Au y Ag y reducción de metales pesados). Se empleó un diseño factorial para el proceso de lixiviación y un diseño comparativo antes–después para la evaluación de la fitorremediación.	La muestra estuvo conformada por un compuesto representativo del relave, del cual se tomaron submuestras de 1000 g para ensayos de lixiviación y flotación, y 3000 g para pruebas de concentración gravimétrica. Para la etapa de fitorremediación se empleó relave reprocesado dispuesto en dos pozas experimentales de 2.5 m × 4 m, realizándose muestreo aleatorio estratificado por triplicado de suelo y tejido vegetal.	Pruebas de flotación y concentración gravimétrica para comparación de alternativas de recuperación.
¿Qué técnica de fitorremediación adecuada se aplicó al postratamiento del relave tratado?	Determinar la técnica de fitorremediación adecuada que se aplicará al postratamiento del relave tratado.	La aplicación de la técnica de fitoextracción permite remediar el relave del postratamiento de la relavera.	VI: Fitorremediación VD: Eficiencia de la remediación			Elaboración de balances metalúrgicos para determinar la recuperación de Au y Ag.
¿Cuál fue el cambio fisicoquímico que se produce en el relave tras el postratamiento?	Determinar los cambios fisicoquímicos que se producen en el relave después del postratamiento.	El postratamiento del relave produce cambios significativos en sus características fisicoquímicas.	VI: Fitorremediación VD: Eficiencia de la remediación			Muestreo selectivo y muestreo aleatorio estratificado de suelos y tejidos vegetales.
						Análisis químico de metales totales mediante ICP–MS (EPA 6020A) con digestión ácida (EPA 3051A).
						Evaluación comparativa con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA – Perú).
						Registro de crecimiento vegetal y medición de biomasa durante seis meses de monitoreo.

Nota: Resumen de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Epistemológico

La presente investigación se enmarca en la epistemología ambiental como una perspectiva crítica que busca comprender y reorientar la manera en que se produce conocimiento sobre el ambiente, evitando tratarlo como un objeto “neutral” o meramente técnico. Desde esta mirada, el ambiente se entiende como una realidad compleja donde interactúan dimensiones ecológicas, tecnológicas, económicas, sociales y éticas. En ese sentido, Leff sostiene que la crisis ambiental es también una crisis del conocimiento, porque la racionalidad científica y económica moderna ha intentado encerrar al ambiente en esquemas de control y gestión que no alcanzan a comprender su complejidad ni los saberes que han sido marginados (Leff, 2006). Por ello, este estudio asume que investigar e intervenir sobre problemas ambientales exige integrar enfoques y ampliar los marcos tradicionales de explicación.

Bajo esta perspectiva, la investigación adopta el paradigma de la complejidad, ya que la gestión de pasivos ambientales mineros involucra sistemas con múltiples interacciones, retroalimentaciones e incertidumbres que no pueden explicarse con relaciones lineales de causa–efecto. La complejidad permite reconocer que lo que ocurre en un relave no depende solo de una variable, sino del conjunto de procesos físicos, químicos, biológicos y decisiones humanas que se influyen mutuamente (Morin, 1990). En coherencia con ello, se asume también la transdisciplinariedad,

porque la intervención de relaves excede una sola disciplina: requiere articular saberes de la metalurgia, la geoquímica, la ingeniería ambiental, la gestión del riesgo, el enfoque normativo y también el conocimiento territorial, de modo que las soluciones sean técnica y socialmente sostenibles (Nicolescu, 1996; Leff, 2006).

En este marco, se incorpora una ontología del relave distinta a la concepción tradicional de “desecho final”. El relave es entendido como un material tecnogénico que, aunque representa un pasivo ambiental, conserva características mineralógicas y fisicoquímicas, y puede contener valores metálicos recuperables. De esta forma, se plantea un tránsito conceptual: del relave como residuo a un relave susceptible de revalorización como recurso, siempre que se garantice estabilidad, control ambiental y criterios de sostenibilidad. Esta visión se vincula con los enfoques de economía circular, que proponen recuperar valor, reducir residuos y extender ciclos de uso de materiales para disminuir impactos y mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de recursos (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr, Reike & Hekkert, 2017).

Finalmente, este marco se complementa con la epistemología del realismo crítico, útil para explicar la interacción entre procesos naturales y decisiones humanas sin reducir uno al otro. El realismo crítico plantea una realidad estratificada: lo observable (empírico), lo que ocurre (actual) y los mecanismos causales que lo generan (real) (Bhaskar, 1975). Aplicado al relave, esto permite interpretar los resultados medibles (pH, Eh, liberación mineral, extracción o inmovilización) como expresiones de mecanismos geoquímicos y metalúrgicos subyacentes, fortaleciendo la explicación causal y la validez de la propuesta. En síntesis, la investigación integra epistemología ambiental, complejidad, transdisciplinariedad, ontología del relave y realismo crítico para sustentar una alternativa de remediación y recuperación de valores metálicos en relaves auroargentíferos, orientada a una gestión más responsable de pasivos y a un uso más eficiente de recursos, con proyección hacia escenarios de sostenibilidad territorial (Leff, 2006; Morin, 1990; Nicolescu, 1996; Bhaskar, 1975).

2.2. Antecedentes del Problema

2.2.1. Nivel Internacional

Munyai (2025) desarrolló una tesis sobre la fitorremediación de metales en relaves auríferos del Klein Letaba Tailings Dam (Limpopo, Sudáfrica). El estudio combinó mapeo geobotánico, encuestas geoquímicas y un diseño experimental en macetas, evaluando plantas dominantes y su capacidad de captación/estabilización de metales mediante ICP-OES. Identificó especies nativas con adaptación natural al relave y reportó mayor acumulación de metales principalmente en raíces, lo cual sugiere un comportamiento más asociado a fitoestabilización y, en ciertos casos, potencial para fito-minería por recuperación de metales en biomasa aérea.

Callender (2014) presentó una tesis de Maestría en Ciencias (McGill University, Canadá) centrada en la revegetación (fitoestabilización) de residuos/relaves de una mina de oro en Val d'Or (Quebec) usando alisos inoculados con *Frankia*. La investigación evaluó el establecimiento vegetal en sustratos con contaminación metálica y su aporte a la recuperación del sitio, destacando que especies pioneras y asociaciones microbianas pueden mejorar la supervivencia y favorecer la restauración ecológica al reducir el transporte de contaminantes por erosión y al impulsar la cobertura vegetal.

Innes (2019) desarrolló una tesis doctoral en la University of Edinburgh (Reino Unido) sobre remediación sostenible de relaves abandonados de minas de plomo (casos en Escocia y Francia). Su trabajo evaluó el uso de plantas nativas y enmiendas orgánicas locales para promover fitoestabilización, reduciendo la liberación de elementos potencialmente tóxicos (PTE). Reportó que ciertas especies toleran concentraciones elevadas de Pb/Zn/Cd y que las enmiendas pueden mejorar fertilidad, aunque su efecto depende fuertemente de la geoquímica del relave (pH, movilidad y mecanismos de precipitación/adsorción).

James (2021) presentó una tesis de Maestría en Ciencias (University of the Witwatersrand, Sudáfrica) que evaluó el potencial de *Casuarina equisetifolia* como

herramienta de rehabilitación ambiental en el contexto minero. Desde un enfoque aplicado, analizó estrategias de rehabilitación reportadas por empresas y el uso de revegetación en depósitos de relaves, concluyendo que esta especie podría emplearse para iniciar revegetación por su resistencia en condiciones de relave y por su aporte funcional (p. ej., soporte al restablecimiento vegetal y captura de contaminantes), recomendando validación mediante ensayos de mayor duración en campo.

Irhema (2019) elaboró una tesis doctoral (PhD) en Bangor University (Reino Unido) orientada al uso de enmiendas y gramíneas para la rehabilitación/remediación de relaves sulfurosos. La investigación aborda cómo combinaciones de materiales (enmiendas) y vegetación pueden mejorar condiciones fisicoquímicas del sustrato, favorecer el establecimiento vegetal y disminuir riesgos ambientales asociados a la exposición y dispersión de contaminantes en relaves.

2.2.2. Nivel Nacional

Chávez (2014), en la tesis “Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo”, evaluó el potencial fitorremediador de especies nativas recolectadas en La Oroya y el lago Junín (zonas con pasivos mineros). Seleccionó especies de los géneros *Calamagrostis* y *Nicotiana* y las cultivó en invernadero bajo diferentes niveles de Pb (700, 1000 y 1200 ppm), comparándolas con vetiver. Concluyó que *Nicotiana* presentó mejor desempeño por su mayor biomasa, capacidad de extracción y translocación del metal, reforzando la idea de que especies nativas pueden ser más adecuadas para procesos de remediación en espacios naturales.

Huamani (2017), en la tesis “Fitorremediación de suelos afectados por relaves mineros a través de planta endémica kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y su influencia ambiental en la población de Sarmarica – Palpa – Ica”, desarrolló el estudio en etapas (diagnóstico inicial, aplicación del proceso y evaluación final). Ejecutó la fitorremediación durante un periodo aproximado de 10 semanas, con acondicionamiento del suelo y riego controlado. Reportó que el uso del kikuyo influyó significativamente en la disminución de la contaminación del suelo afectado por relaves mineros en la zona de estudio.

Lama (2018), en la tesis “Fitoextracción de plomo en suelos de tres parques por el girasol (*Helianthus annuus*) inoculado con el hongo micorrítico *Glomus intraradices*”, abordó la contaminación por Pb en suelos urbanos y evaluó la eficiencia de fitoextracción usando girasol con apoyo micorrítico. La investigación se enfocó en medir el desempeño de la planta para extraer plomo del suelo y su aplicabilidad como alternativa de remediación en espacios públicos.

Valverde (2019) en su tesis de maestría, investigó el potencial fitorremediador de especie vegetal *Pelargonium zonale* en suelo agrícolas con alto contenido de plomo, las cuales afirmaron, estuvo un rango de 130,32 y 526,72 ppm, en el distrito de El Mantaro, provincia de Jauja. Ante la preocupación por las concentraciones de plomo que variaba entre 130,32 y 526,72 ppm en suelos agrícolas de este distrito, su posible introducción en la cadena alimenticia y efectos sobre la salud de la población se desarrolló la fitoextracción con *P. zonale*, aplicando diseño experimental con 9 tratamientos, para evaluar el efecto de las variables dosificación de nitrógeno y el nivel de acidez o pH del medio. Dichas pruebas que sustentó fueron realizadas en la Universidad Agraria La Molina, empleando parcelas de 3m², concluyendo que logró una eficiencia de 31.37 % de adsorción de plomo, para un pH 4,5 y 20 g de N/planta. Además, el autor sostuvo que la variación de concentración de nitrógeno no influyó.

Díaz & Samamé (2022), en la tesis “Fitorremediación con *Zea mays* para la remoción de plomo y cadmio del suelo contaminado por relave minero de la planta concentradora UNI”, evaluaron la disminución de Pb y Cd en suelo impactado por relave minero aplicando fitorremediación con maíz (*Zea mays*). El estudio se desarrolló como investigación aplicada, orientada a medir la eficiencia de remoción de ambos metales y sustentar el uso de la especie como alternativa de tratamiento.

Verde (2025), en la tesis “Eficiencia de la fitorremediación con Mostaza (*Brassica juncea*) e Higuierilla (*Ricinus communis*) en la recuperación de la calidad del suelo contaminado por Plomo y Cadmio del botadero de Marabamba, Huánuco (2024–2025)”, comparó dos especies vegetales como agentes de fitorremediación para suelos contaminados con Pb y Cd. La investigación evaluó cambios en propiedades del suelo y concentración de metales antes y después del proceso, con enfoque experimental y

cuantitativo, orientado a sustentar la mejora de la calidad del suelo mediante estas especies.

2.3. Bases Teóricas

2.3.1. *Procesamiento de minerales auríferos*

Los principales procesos para la recuperación de metales preciosos son los siguientes:

2.3.1.1. *Concentración Gravimétrica.*

Es el método más antiguo y tradicional para concentrar especies de metales preciosos, que por sus características de tamaño y peso obedecen a este tipo de concentración. El procesamiento mediante concentración gravimétrica es la separación de la parte valiosa o metales pesados, de la inútil o ganga (relave), por acción de la fuerza de gravedad (Castillo, 2014).

La operación de concentración gravimétrica es la más simple y económica de los métodos de extracción de metales preciosos. Este método hace posible la concentración de especies valiosas de gran tamaño, que no obedecen a los procesos convencionales de beneficio (Guillermo, 2000).

Este método de concentración se recomienda para concentrar minerales con partículas gruesas de metales preciosos, lo cual genera un ahorro en los costos asociados a la conminución y la reducción por pérdidas de finos que se formaron en las operaciones de reducción (Ojeda & Reyes, 2006; Ccari, 2022).

Una de las ventajas más notorias en este proceso se debe a que es una tecnología limpia, así mismo, en la actualidad minerales de tungsteno y estaño, además de los metales preciosos, se benefician por este método. Su aplicación es en su mayoría para el beneficio de oro, constituyéndose en pieza fundamental para la extracción de arenas negras en la minería aluvial. Por lo general trabajan junto con otros métodos de beneficio (flotación, cianuración) (Guillermo, 2000).

En la actualidad, los equipos más modernos de concentración gravimétrica usan las fuerzas centrífugas para concentrar las partículas de distinto peso y tamaño. Así podemos mencionar a equipos modernos que trabajan bajo este principio a: Knelson, el concentrador centrífugo Falcón, el jig centrífugo Kelsey y el Separador de Gravedad Múltiple (MGS) Mosley (Vilcapoma & Chavez, 2012).

2.3.1.1.1. Fundamentos y Criterios de Aplicación de la Concentración Gravimétrica.

La diferencia de velocidad de asentamiento de partículas de una mena en un medio líquido, que contiene distintas especies de forma y tamaño, se le conoce como “asentamiento obstaculizado”, principio que explica la concentración de metales pesados (Sánchez, 2006).

El proceso de separación de partículas de distinto peso, pierde eficiencia cuanto mayor cantidad de partículas finas existan en la mena (Sánchez, 2006).

La relación existente entre los pesos específicos de la mena y la ganga con respecto al peso específico del agua, establecen lo que se conoce como criterio de concentración de menas auríferas, y es expresada por la siguiente ecuación (Taggart, 1966):

$$\text{Criterio de concentración} = Q = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m}$$

Donde:

- D_p = Densidad de partículas pesadas (mena)
- D_l = Densidad de las partículas livianas (ganga)
- D_m = Densidad del medio fluido de separación

Para valores de Q mayores a 2.5, indican que la concentración gravimétrica del depósito de minerales es sencilla. Para valores menores a 2.5, la eficiencia de la separación de las especies en el depósito es baja, y para valores menores a 1.25, indica que la separación no se puede llevar a cabo (Sánchez, 2006; Rivera, 2017).

Tabla 2*Rangos de tamaño tratados por equipos de concentración gravimétrica*

Concentración gruesa (+1/4", 6.4 mm)	Concentración intermedia (1/4" a 100 Malla)	Concentración fina (1/4" a 100 Malla)
Jigs	Jigs	Jig Kelsey
Pepeado a mano	Clasificadores sedimentación	Espirales
Hidrociclón	impedida	Mesas concentradoras
Medio pesado	Hidrociclón medio pesado	Concentrador cannon
Jigs neumáticos	Concentradores cannon	Concentrador Falcon
Clasificadores	Jigs Kelsey	Conos Reichert
sedimentación	Conos Reichert	Concentrador Bartles –
impedida	Concentrador Knelson	Mozley
	Concentrador Falcon	Concentrador Knelson
		Mesas planas
		Estructuras oscilantes

*Nota: Aplan (2003)***2.3.1.1.2. Técnicas de Concentración Gravimétrica.**

Definen tres grupos de concentración por gravedad:

- **Separación por medios densos**, las partículas del mineral se someten a un flujo de densidad conocido, lo que genera que las partículas menos pesadas floten, y las más pesadas se concentren en el fondo de la superficie. El líquido usado como medio denso, debe ser barato, soluble en agua, amigable con el medioambiente, no corrosivo y que su densidad pueda ser variable (Ccari, 2022).
- **Separación por corrientes verticales**, las corrientes verticales del fluido le infieren características propias a la pulpa, donde se aprovecha la diferencia de la velocidad de asentamiento de las partículas pesadas y livianas. Uno de los equipos de mayor aplicación por este método, es el Jig (Vilcapoma & Chávez, 2012).
- **Separación en corrientes superficiales de agua**, o “clasificación en lámina delgada”, es la concentración de metales pesados en corriente continua de una pulpa, donde las partículas se estratifican debido a las

diferencias de pesos específicos. Equipos como las mesas y los espirales, trabajan bajo este método (Japa & Harman, 2022).

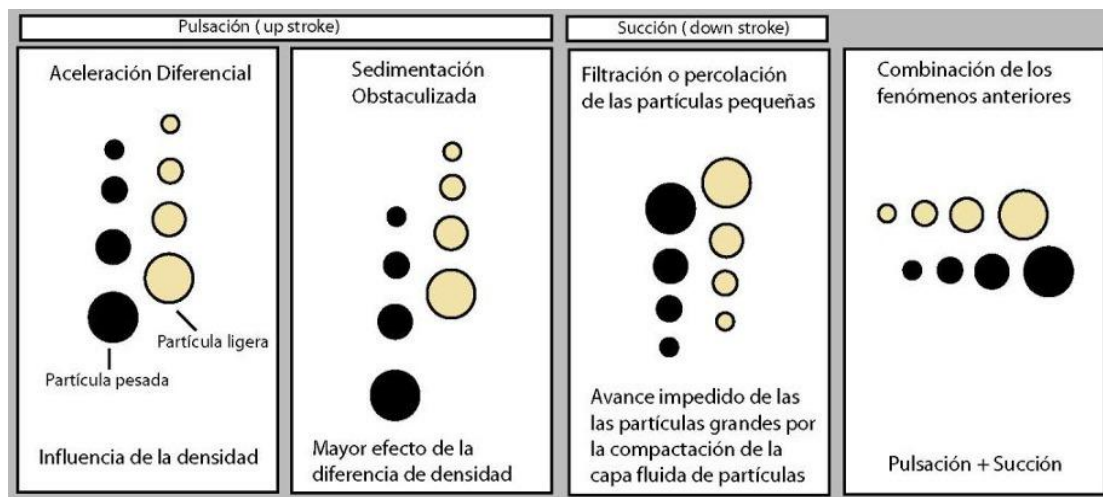


Figura 1

Fenómeno de la estratificación según densidades relativas

Nota: Alvarez (2006)

2.3.1.1.3. Equipos de Concentración Gravimétrica.

Los equipos empleados con mayor frecuencia en la concentración de minerales auríferos dentro de la industria minera se dividen en dos categorías principales: convencionales y centrífugos, los cuales se detallan en la tabla siguiente.

Tabla 3

Equipos de concentración por gravedad

Convencionales	Centrífugos
Mesas vibratorias	Falcon
Jigs	Knelson
Espirales	

Nota: Castillo (2014)

a. Concentradores convencionales

➤ Jigs

Se trata de uno de los dispositivos de separación gravimétrica de mayor uso en el sector minero, formado por una superficie rectangular hueca en la parte superior,

por medio del cual se alimenta de una pulpa con determinado tamaño y peso específico. En la parte inferior de la superficie rectangular se dispone de una malla y granallas metálicas, que junto con la pulpa y agua que es insuflada por la parte inferior, forman una cama, la cual se dilata y se contrae por medio de un flujo de agua controlado cíclicamente, de tal manera que las partículas más livianas abandonen el lecho por rebose y las partículas más pesadas se concentren en el fondo. Estos equipos de concentración responden eficientemente para minerales gruesos en un rango de 3 a 10 mm, encontrándose bastante útil para el beneficio de metales férreos, titanio, zirconio, aluminio, cromita, diamantes, entre otros. También es bastante útil para el procesamiento de carbones (Concha, 2007).

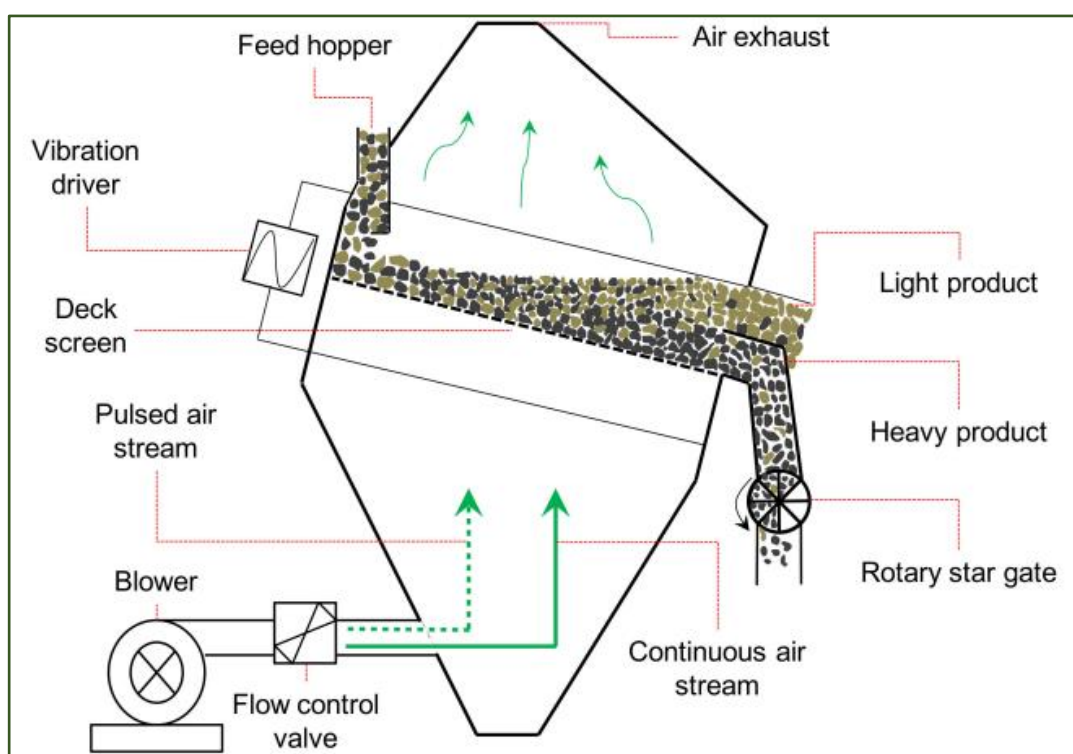


Figura 2

Esquema básico de un JIG

Nota: Ambrós (2020).

➤ Mesas vibratorias

Son equipos para concentrar minerales bajo el principio de diferencia de pesos específicos, tecnología bastante empleada en la minería aurífera por ser de bajo costo y mínimo impacto ambiental.

La pulpa debidamente preparada se alimenta a una superficie inclinada y en movimiento vibratorio longitudinal, las mismas que son transversales al movimiento de la pulpa. Actualmente se usa para el beneficio de menas de estaño, oro y wolframio. El área de la mesa es semejante a un plano rectangular sobre el cual se dispone de rifles apilados en serie, tal como se describe en la figura 3.



Figura 3

Mesa vibratoria

Nota: Valencia (2017).

➤ Concentración en espirales

Se conoce que los concentradores espirales tipo Humphrey aparecieron en la industria en 1945. En la actualidad todavía se conocen estos equipos, con cambios en la modernidad del diseño y los procesos de fabricación. Los tipos de materiales usados para la construcción de un espiral son: madera, hierro fundido, plásticos, aleaciones, hormigón, entre otros (Vilcapoma & Chávez, 2012).

Un aspecto que favoreció el rápido progreso en el diseño de las espirales fue la utilización, por parte de la mayoría de los fabricantes, de poliéster reforzado con fibra

de vidrio acompañado de un recubrimiento externo de caucho. En años recientes, se han incorporado innovaciones en el diseño que incluyen variaciones en el paso y el perfil a lo largo de toda la trayectoria del equipo.

La concentración gravimétrica en espirales puede obtener un producto de baja calidad como en una etapa Rougher, o puede recuperar una buena calidad de concentrado, con leyes comerciales como en una etapa cleaner (Vilcapoma & Chávez, 2012).

El principio que sustenta el funcionamiento de un espiral es la misma que sustenta la concentración de partículas a través de un flujo laminar, debido a que el material se transporta mediante una superficie circular por medio de un fluido, es sometido a cuatro tipos de fuerzas:

- Gravedad
- Fuerza centrífuga
- Empuje ejercido por fluido
- Fricción contra la superficie del canal

Cuando la pulpa se desplaza a lo largo del canal en forma de espiral con sección semicircular, actúa sobre ella una fuerza centrífuga orientada de manera tangencial al flujo. Esta fuerza depende directamente del cuadrado de la velocidad de la partícula y es inversamente proporcional al radio en el que se encuentra. La fuerza centrífuga mantiene al líquido hacia los bordes de la espiral hasta que el flujo de la pulpa se encuentre en equilibrio con las fuerzas gravitacionales y de gravedad. Por consiguiente, la velocidad del flujo disminuye conforme desciende a través de la superficie del espiral, alcanzando un valor máximo en la superficie del líquido y casi nula en el fondo (Castillo, 2014):

La disminución de la aceleración alcanza un máximo cerca de la superficie del canal, lo que forma un flujo retardado por las fuerzas de fricción. Este fenómeno disminuye la fuerza centrífuga en donde las partículas más pesadas son transportadas hacia el interior del canal, y las partículas finas son evacuadas por la periferia.

Podemos concluir que la concentración de partículas pesadas en un espiral se da como resultado de la acción de cuatro fuerzas, que se describieron al comienzo.

Según Castillo (2014), los principales parámetros de trabajo son:

- Flujo de alimentación superior a 3 t/h de sólidos.
- Pulpa con una dilución mayor al 60% en peso.
- Tamaño de partícula comprendido entre 0,030 y 2 mm.
- Volumen de alimentación de 5 m³/h y caudal de agua en el rango de 3,5 a 7,5 m³/h (Reinoso, 2019).

b. Concentración gravimétrica y centrífuga

Los equipos gravimétricos tradicionales muestran un mejor desempeño en granulometrías relativamente gruesas; sin embargo, su eficiencia se reduce cuando las partículas son muy finas. En este contexto, diversos investigadores han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de trabajar con rangos de tamaño más amplios (Alvarez, 2006).

En general, los sistemas convencionales funcionan de manera adecuada con partículas mayores a 75 μm . Por debajo de este tamaño, factores como la viscosidad de la pulpa y el flujo relativo a la densidad adquieren mayor relevancia, lo que dificulta la separación y disminuye la recuperación. Debido a ello, la industria aurífera ha enfocado sus esfuerzos en mejorar la concentración de fracciones finas (15 – 75 μm), optimizando equipos como los conos Reichert y las espirales Humphrey, que han mostrado avances en la separación en húmedo (Alvarez, 2006).

En las últimas décadas, la concentración por fuerzas centrífugas ha ganado protagonismo. Estos equipos superan en eficiencia a los gravimétricos convencionales al aplicar campos gravitacionales artificialmente aumentados, generando varias veces la aceleración de la gravedad (G). Por ejemplo, en un campo centrífugo de 200 G, una partícula de oro libre puede alcanzar un peso aparente 2061 veces superior al de una ganga con densidad de 2,65, como se demuestra en el cálculo propuesto por Taggart (1966):

$$Q = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m} * G_s \qquad Q_{Au} = \frac{(18 - 1)}{(2.65 - 1)} * 200 = 2061$$

El principio de funcionamiento de estos concentradores se conoce como sedimentación obstaculizada forzada, donde la fuerza centrífuga incrementa el criterio de concentración del mineral. Actualmente, los equipos más representativos de este tipo son los Falcon y Knelson (Alvarez, 2006).

➤ Concentradores Falcon

El concentrador Falcon, de origen canadiense, se diferencia del Knelson principalmente porque opera con un campo centrífugo hasta cinco veces mayor. Además, mientras que los rifles o canaletas en los Falcon se ubican únicamente en la parte superior del cono, en los Knelson están distribuidos a lo largo de toda su superficie (Vilcapoma & Chávez, 2012).

Gracias a estas características, los Falcon han demostrado una eficiencia superior, ya que pueden recuperar partículas muy finas mediante la aplicación de campos gravitatorios intensos (Vilcapoma & Chávez, 2012).

Características principales (Alvarez, 2006):

- Uso extendido en la concentración de menas auríferas.
- Alta efectividad en la recuperación de partículas finas.
- Componentes de caucho, poliuretano, carburo y Ni-hard en los rotores para mayor resistencia al desgaste.
- Diseño con pocas partes móviles.
- Obtención de concentrados con leyes comerciales.
- Disponibilidad de modelos de laboratorio de gran eficiencia.
- Posibilidad de operar con un amplio rango granulométrico.

Aplicaciones más comunes (Alvarez, 2006):

- Recuperación de oro fino en depósitos minerales.
- Reprocesamiento de sulfuros.
- Concentración de finos de hierro y estaño.
- Tratamiento de carbones minerales.
- Recuperación de oro fino a partir de relaves.
- Preconcentración de minerales valiosos.
- Procesamiento de colas de estaño y tantalio.
- Concentración de hierro desde relaves.
- Recuperación de metales preciosos en relaves antiguos.
- Lavado y preconcentración de minerales pesados.
- Preconcentración previa a procesos de flotación o cianuración en menas auríferas.

2.3.1.2. Flotación.

2.3.1.2.1. Flotación de Oro y Plata.

Las investigaciones sobre flotación de minerales preciosos están basadas en la evaluación del comportamiento de los colectores, la naturaleza de los iones del colector sobre las especies de interés.

Aunque existe la necesidad de optar por tecnologías limpias para el procesamiento de minerales auríferos, son pocas las industrias mineras que la emplean para su beneficio.

La mineralogía del depósito de mineral determinará el proceso metalúrgico de beneficio a emplearse, dado que reporta las especies de interés, sus grados de liberación y especies que pueden condicionar el proceso metalúrgico, lo que determinará los reactivos de flotación a usarse. (Bustamente & Tobón, 2012).

Los depósitos de minerales que contienen oro por lo general contienen plata, dispuestas en una variedad de composiciones mineralógicas, desde el metal nativo hasta yacimientos donde los metales preciosos forman parte de un valor secundario.

Los yacimientos de minerales que más se conocen son: de tipo placer, hidrotermal y epitermal, volcánico, sedimentario, metamórfico y material oxidado (Bustamente & Tobón, 2012).

El proceso de flotación es eficiente para recuperar en minerales sulfurados como la pirita, y se considera como una alternativa a la amalgamación con mercurio para la recuperación de oro libre (Bustamente & Tobón, 2012).

La flotación de oro nativo grueso de tamaño poco menor a las 200 micras fue investigada por ciertos autores, sin embargo, no se conoce con precisión el comportamiento de oro nativo y su capacidad de laminarse, lo cual genera aumento de su área superficial lo suficiente como para flotar.

Los minerales que albergan a los metales oro y plata tienen composición química variable y distintas partes pueden representar diferentes composiciones, así pues, la recuperación de estas especies metálicas mediante flotación puede lograrse siempre que se controle la heterogeneidad en su comportamiento hidrofóbico, la cual incide directamente en la recuperación de oro nativo, como en el caso del electrum (Bustamente & Tobón, 2012).

En cuanto a la composición del oro nativo, esta no es constante: suele presentar entre un 80 % y 100 % de Au, acompañado de 1 % a 15 % de Ag y hasta 5 % de Cu. El electrum, por su parte, corresponde a una aleación natural de oro y plata, en la que predomina el contenido de plata (Bustamente & Tobón, 2012).

Aspectos por considerar en la flotación de oro nativo:

- Química superficial y flotabilidad natural del oro nativo

En un medio acuoso no complejante, los iones y óxidos de oro son termodinámicamente inestables, por lo que requieren de condiciones fuertemente oxidantes para su formación (Bustamente & Tobón, 2012):



La quimioadsorción de oxígeno sobre el oro se produce a potenciales superiores a 1.4 V, alcanzando la formación de monocapas a 2 V. Dicho comportamiento confirma la aparición de Au_2O_3 y $\text{Au}(\text{OH})_3$ en soluciones alcalinas. Además, tanto la orientación cristalina como las impurezas presentes en el mineral influyen en los intervalos de formación y crecimiento de estos óxidos.

La presencia de contaminantes carbonáceos es suficiente para hidrofobizar la superficie del oro, es por ello que se dice que el oro presenta flotabilidad natural. (Bustamente & Tobón, 2012).

Por otra parte, se ha observado en experimentos que el oro con superficie electroquímicamente limpia presenta un ángulo de contacto igual a cero en soluciones buffer y no muestra flotabilidad natural en medios ácidos ni alcalinos.

Los estudios sobre la flotación de metales preciosos evidencian que la adsorción de los colectores aumenta en función del contenido de plata y cobre de la muestra, ya que la acción de los ditiofosfatos y monotiofosfatos (DTPI y MTPI) se asocia con la formación de complejos de plata como Ag-DTPI y Ag-MTPI.

De hecho, la mayor parte de los minerales auríferos se caracterizan por contener plata en su composición, con cantidades del 2 al 12 % del contenido de oro. Así mismo, metales como cobre y telurio están asociados al metal precioso, por lo que es altamente susceptible a ser hidrofobizado selectivamente.

Se puede decir que el oro nativo puede adquirir flotabilidad natural por las materias orgánicas que acompañan la mena. (Bustamente & Tobón, 2012).

- Granulometría del mineral

Debido a su alto peso específico, los tamaños de las partículas de metales preciosos condicionan el proceso metalúrgico. Por lo general las partículas de tamaño entre 20 y 200 micras responden eficientemente al proceso de flotación. Cuando las partículas alcanzan tamaños muy finos, la eficiencia del proceso disminuye, ya que se produce un mayor arrastre de las partículas de ganga durante la flotación. Cuando las partículas de interés son bastantes gruesas debe operar con 35% de sólidos en pulpa

debido a que este parámetro reduce el tamaño de partícula en la sedimentación. Si bien es cierto que las partículas de tamaños pequeños son arrastradas hacia el colchón de espuma fácilmente, la recuperación disminuye debido a la dificultad de adhesión burbuja/partícula generando una espuma inestable.

El tamaño de partícula es una de las variables más determinantes sobre la recuperación y calidad del concentrado, así como la incidencia sobre los costos operativos que generan las operaciones de reducción de tamaño. (Bustamente & Tobón, 2012).

- Colectores de metales preciosos

Los colectores usados en la flotación de metales preciosos dependen de los tipos de minerales que se desea recuperar, así como las asociaciones mineralógicas en las cuales se encuentran inmersos. Los colectores son responsables directos de la flotación de las especies de interés, dado que hidrofobizan la superficie de los minerales. (Bustamente & Tobón, 2012).

Los colectores tipo Xantatos y ditiofosfatos son los más empleados en las flotaciones de metales preciosos, o una mezcla de ellos.

Por lo general los concentrados de flotación de metales preciosos son cianurados para aumentar la concentración del oro y pueda ser recuperado rentablemente mediante los procesos de adsorción y refinación. (Bustamente & Tobón, 2012).

En los últimos años se ha planteado la utilización de colectores apolares e insolubles en agua, tales como tiocarbamatos, mercaptanos y dialquil sulfuros, mientras que se desaconseja el empleo de xantatos y ditiofosfatos. Esto se debe a que los colectores apolares presentan mayor selectividad en la flotación de minerales con propiedades hidrofóbicas naturales. Investigaciones recientes también sugieren mantener las superficies del oro libres de contaminantes, particularmente lodos y materia orgánica, evitando el control estricto de la alcalinidad de la pulpa y utilizando dosis muy bajas o nulas de colectores apolares.

Como es ya conocido para que puedan cumplir su función los colectores, es necesario acondicionar la pulpa con los reactivos el tiempo necesario, de tal manera que a veces es necesario dosificar los colectores desde la etapa de molienda, mientras que otros se dosifican desde el cajón de descarga.

En la actualidad, resulta más ventajoso emplear combinaciones de colectores, ya que estas permiten mejorar la capacidad de carga de la espuma, acelerar la cinética del proceso y optimizar la recuperación de partículas tanto intermedias como gruesas (Bustamente & Tobón, 2012). La tabla 4 describe los colectores que pueden ser empleados en la flotación de metales preciosos.

Tabla 4

Colectores para flotación de oro

Composición de colector	Nombre de reactivos
Xantato isobutilico de sodio	AERO-317
Xantato amílico de potasio	AERO-343
Xantogenos	AERO-3758
Di-isobutil dithiofosfato	AERO-3477
Mercaptanobenzothiozalato	AERO-404
Monothiofosfato	AERO-6697
Dithiofosfato	Reactivo S-9810
Composición y mezcla de colectores	Nombre de reactivos
Dithiofosfato/Monothiofosfato	AERO-7249
Monothiofosfato/ Dithiofosfato	AERO-8761
Dithiofosfato/Monothiofosfato/ Dithiofosfinato	S-9913
Dithiofosfato/Mercaptanobenzothiozalato	AERO-405
Dithiofosfato/Mercaptanobenzothiozalato	AERO-7156
Thionocarbamato/Dithiofosfato	AERO-3926
Thionocarbamato/Dithiofosfato	AERO-473
Thionocarbamato/Dithiofosfato	AERO 5744/5
Dicresil Dithiofosfato	S-8985
Thionocarbamato/Dithiofosfato/Monothiofosfato	S-9889
Sulfuro etil octil	S-701
Dithiocarbamato/Hidrosulfuro de sodio	S-3730

Nota: Bustamante & Tobón (2012)

- Espumantes para flotación de metales preciosos

El espumante es responsable de la estabilidad de la espuma de flotación, y de las características que pueda presentar. Estos reactivos son dosificados con la finalidad de (Bustamente & Tobón, 2012):

- i. Garantizar la formación de un colchón de espuma estable.
- ii. Disminuir la tensión superficial del agua.
- iii. Regular la velocidad de interacción entre las burbujas y las partículas.
- iv. Evitar la coalescencia, es decir, la unión de dos o más burbujas.

El tiempo de permanencia de las partículas dentro de la espuma depende tanto de la altura de la columna espumosa como del caudal de aire introducido en la celda. Entre los espumantes más empleados en la flotación de metales preciosos se encuentran el aceite de pino, el ácido cresílico, el MIBC (metil isobutil carbinol) y los oligómeros de propilenglicol como el Aerofroth 65. Asimismo, ciertos colectores, como los ditiofosfatos, favorecen la generación de una espuma más estable (Bustamente & Tobón, 2012).

Se recomienda emplear espumantes fuertes y estables para la flotación de metales preciosos, además de que estos no compitan con los colectores, de tal manera que no disminuya la energía libre superficial de las partículas. (Bustamente & Tobón, 2012).

- Activadores usados en la flotación de metales preciosos

Cuando el área superficial de las partículas valiosas se encuentra limpias no se necesita el uso de activadores, por otro lado, en ciertos casos, el oro o las partículas de oro asociadas a sulfuros requieren un proceso de activación debido a la presencia de recubrimientos superficiales. Para este fin, se suelen emplear compuestos como sulfato de cobre, carbonato de sodio, sulfuro de sodio y dióxido de azufre (Bustamente & Tobón, 2012).

Los activadores corresponden, en su mayoría, a sales de metales base, cuyos iones metálicos se adsorben en la superficie del mineral, modificando sus

características químicas. Este proceso permite ampliar el rango de alcalinidad en el que puede llevarse a cabo la flotación de las especies valiosas, mejorando la velocidad del proceso, la recuperación y la ley del concentrado obtenido.

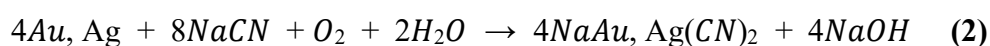
Por otro lado, existen ligandos como el ion cianuro que forman complejos solubles con los metales preciosos, y es usado en la lixiviación de oro, así mismo otro tipo de ligandos son de base azufre, halógenos y nitrógeno. De todos los mencionados anteriormente, los ligandos con contenido de azufre son los más aplicados en la industria de la recuperación de oro mediante el proceso de flotación. (Bustamente & Tobón, 2012).

2.3.1.3. *Lixiviación de Menas con Contenido de Metales Preciosos.*

Es un proceso hidrometalúrgico que tiene fundamento en la solubilidad del oro y la plata cuando entra en contacto con soluciones cianuradas y a pH alcalino, de tal manera que las especies valiosas se recuperen formando complejos cianurados de oro y plata (Saba et al., 2011).

El cianuro es compuesto químico usado por más de 100 años en la industria metalúrgica, que por sus bajos costos y elevada eficiencia se ha mantenido en la industria, aun cuando presenta bastantes consecuencias adversas, con respecto a la salud y al medioambiente (Andrade & Hodouin, 2005; Srithammavut, 2008).

La reacción fundamental que explica la disolución de metales preciosos en soluciones cianuradas fue planteada por Elsner en 1846, y se expone en la ecuación 2 (Yannopoulos, 1991).



Dicha reacción establece que el proceso requiere tanto oxígeno como agua para que los metales se oxiden y formen complejos cianurados estables. Es importante señalar que la solubilidad de la plata es menor en comparación con la del oro, ya que su coeficiente de consumo de oxígeno es de 0.25, mientras que en el caso del oro es de 0.5 (Marsden & House, 2006).

Investigaciones adicionales han demostrado que la disolución de la plata depende de la concentración de cianuro en la solución. A bajas concentraciones de NaCN (0.0025 M), la velocidad de lixiviación de la plata alcanza apenas la mitad de la correspondiente al oro; sin embargo, al superar concentraciones de 0.1 M, la cinética de disolución de la plata aumenta considerablemente, llegando incluso a competir con los iones de oro en la formación de complejos (Marsden & House, 2006).

2.3.1.3.1. Factores que determinan la Solubilidad de Oro y Plata en un Medio Cianurado.

La eficiencia de la disolución de metales preciosos en una solución cianurada depende de las siguientes variables:

- Concentración de cianuro
- Oxigenación del medio
- Nivel de alcalinidad de la pulpa
- Temperatura del medio
- Revoluciones por minuto del sistema
- Tamaño de partícula
- Porcentaje de sólidos en pulpa
- Especies mineralógicas involucradas

a. Concentración de Cianuro

La velocidad de disolución de los metales preciosos en soluciones cianuradas se incrementa a medida que aumenta la concentración del reactivo, hasta llegar a un punto máximo. Superado dicho umbral, la cinética de solubilidad muestra una leve disminución y tiende a estabilizarse, tal como se ilustra en la figura 10 (Mendo, 2016).

La reacción estequiométrica del proceso de lixiviación con cianuro establece que se requieren dos moles de cianuro de sodio para lograr la disolución de un mol de oro, lo que nos hace indicar que se debe usar un exceso dado que ninguna reacción es 100% eficiente y se puede decir que esto se debe a que los demás elementos que forman parte de la mena compiten por formar complejos con el cianuro, conocidas como elementos o compuestos cianicidas.

La concentración de cianuro a nivel industrial se controla midiendo la fuerza de cianuro, que es un parámetro que se determina mediante el método de titulación que emplea nitrato de plata junto con yoduro de potasio, de tal manera la fuerza de cianuro debe ser superior al 0.05 para que garantice la presencia de estos iones en solución. Así mismo industrialmente se conocen datos de consumo para procesos rentables de 2 a 4 Kg/t, pudiendo ser más cuando las leyes de metales preciosos son más altas (De la Torre & Guevara, 2006).

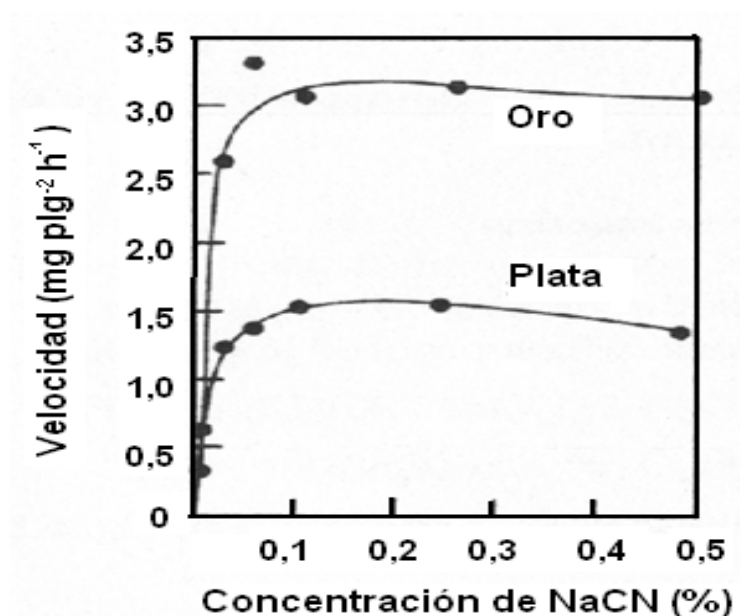


Figura 4

Cómo influye la concentración de las soluciones cianuradas en la disolución de oro y plata

Nota: Marsden & House (1960)

b. Oxigenación del medio

La disolución de metales preciosos durante la lixiviación se ve restringida por la escasa solubilidad del oxígeno en agua, que a 25 °C alcanza aproximadamente 8,2 mg/L. Para contrarrestar esta baja solubilidad de oxígeno se desarrollaron 2 métodos para garantizar la presencia de oxígeno en el sistema las cuales son: lixiviación con cianuro bajo presión, y el método de lixiviación con dosificación de agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, lanzas de oxígeno, ozono u alguna otra fuente que aporte

el nivel necesario de este elemento para que ocurran la reacción (Marsden & House, 2006).

Estudios determinaron que cuando la relación de iones cianuro y oxígeno es próxima a 6, la cinética de la reacción de solubilidad de las especies se hace más eficiente (Birich et al., 2019).

c. Nivel de Alcalinidad de la Pulpa

Se conoce que a partir de un nivel de alcalinidad de 9.5 se forman los complejos de cianuro con los metales preciosos, pero a su vez se produce la reacción del cianuro con agua, la cual genera el gas cianhídrico, que es altamente tóxico y hace imposible realizar el proceso de manera eficiente. Por consecuencia el diagrama de Pourbaix demuestra que la lixiviación con cianuro es más eficiente a un pH por encima de 10.5. Investigadores han demostrado que por encima de valores de $\text{pH} = 11$, la tasa de disolución de las especies de interés presenta una disminución significativa, viéndose más afectada para pH mayores a 12 (Marsden & House, 2006).

Para modificar el nivel de alcalinidad en el proceso de lixiviación por lo general se utiliza cal o hidróxido de sodio, y depende de las especies que pueden solubilizarse en el sistema o la cantidad de finos presentes en la mena (De la Torre & Guevara, 2006).

d. Temperatura del Medio

El incremento de la temperatura favorece la velocidad de disolución de los metales preciosos a lo largo del tiempo, ya que el aumento térmico induce una mayor excitación molecular dentro del sistema cianurado. Así mismos trabajos de investigación demostraron que la temperatura óptima a la cual se produce una mayor cinética de lixiviación es de 85°C , y por encima de este valor de temperatura, la cinética decrece. En los procesos industriales debido a los altos costos que generan elevar la temperatura de la pulpa y las consecuencias que estas puede generar, se hace inviable económicamente, por lo que generalmente se opera a temperatura ambiente. El efecto de la temperatura en la disolución de oro se muestra en la gráfica de la figura 5 (Marsden & House, 2006; De la Torre & Guevara, 2006).

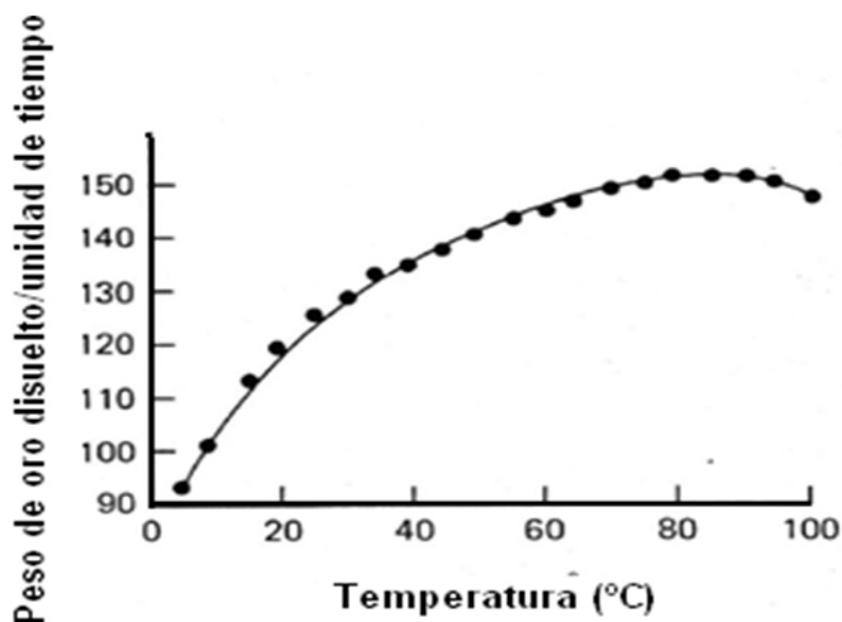


Figura 5

Eficiencia de recuperación de metales preciosos en relación con la temperatura del proceso (°C)

Nota: Marsden & House (1960)

e. Revoluciones por Minuto del Sistema

El incremento de la agitación en el sistema reduce las capas que rodean a las moléculas, lo que mejora la interacción entre el agente lixivante y los componentes presentes. Como resultado, un mayor número de revoluciones de agitación acelera la cinética de disolución de las especies de interés. Sin embargo, este efecto alcanza un límite, y superar dicho punto no genera variaciones relevantes en el proceso. Los procesos de lixiviación emplean sistemas mecánicos o neumáticos para generar la agitación de la pulpa (Marsden & House, 2006; De la Torre & Guevara, 2006).

f. Tamaño de Partícula

Las partículas de los metales preciosos deben de estar liberadas para que puedan entrar en contacto con el agente lixivante, el aire y agua, de tal manera que se pueda formar el complejo. Este factor depende de la posibilidad de liberación de las especies y de la molienda del mineral. En algunos casos es imposible liberar a las especies de interés y repercute en los indicadores de recuperación de los metales, llamándose a este tipo de especies minerales refractarios. La sobremolienda de los

minerales está sujeta a evaluación de dentro de un proceso de beneficio, dado que el esfuerzo realizado para liberar especies valiosas trae como consecuencia la reducción de partículas indeseables a un tamaño bastante fino, compitiendo por la reacción con cianuro con las demás especies del sistema (Marsden & House, 1960).

g. Porcentaje de Sólidos en Pulpa

Se estableció que la concentración de sólidos en la pulpa debe mantenerse en un rango de 35% a 50%, en función del tamaño de partícula, la gravedad específica y la naturaleza y distribución de los minerales presentes, ya que estos factores influyen directamente en la viscosidad del medio. Se reconoce, además, que cuando el contenido de sólidos en la pulpa es reducido, existe mayor posibilidad del contacto del metal valioso con el agente lixivante y, por lo contrario, una mayor cantidad de sólidos en pulpa hace necesario que el sistema permanezca más tiempo en contacto, lo que se conoce como el tiempo de residencia (Marsden & House, 1960).

h. Especies Mineralógicas Involucradas

La disposición de las especies minerales y el grado en que estas pueden liberarse constituye un factor determinante, ya que define la viabilidad de los minerales para ser sometidos al proceso de lixiviación. No todas las menas con contenido de metales valiosos pueden ser liberados, dado que como ya se dijo líneas atrás, existen las especies refractarias, cuya recuperación es menor al 80 % y muchos de los yacimientos de este tipo son inviables económicamente. Otro factor determinante es conocer las especies que forman parte de la mena, las cuales presentarán un tipo de reacción específica dentro del proceso, así podemos detallar la influencia de las principales especies asociadas a metales preciosos (Marsden & House, 1960).

i. Reactivo Ecológico (Sandioss)

El Sandioss se emplea para la recuperación de Au y Ag mediante la formación de complejos solubles en medio alcalino, presentando menor peligrosidad comparativa. Su composición química, detallada en el Tabla 5, incluye agentes complejantes y estabilizantes que favorecen la disolución selectiva de metales preciosos bajo condiciones controladas de pH. En términos toxicológicos, el cianuro presenta alta toxicidad aguda y estrictas restricciones de manejo, mientras que

Sandioss se considera de menor riesgo relativo al no generar gases altamente tóxicos en condiciones normales de operación, constituyendo una alternativa más segura desde el punto de vista ambiental y operativo.

Tabla 5

Composición química del Sandioss

Componentes	Fórmula	Número CAS	Porcentaje (%)
Óxido de sodio	Na ₂ O	1313-59-3	35-50
Nitrógeno	N	7727-37-9	12-20
Amonio	NH ⁴⁺	14798-03-9	7-12
Ferrocianuro de sodio	Na ₄ Fe(CN) ₆ ·10H ₂ O	13601-19-9	7-12
Agua	H ₂ O	7732-18-5	1-4
Calcio	Ca	7440-70-2	1-5
Hierro	Fe	7439-89-6	1-5
Insolubles en agua	---	---	3-8

Nota: Recuperado de Huaco (2017)

2.3.2. Relaves Mineros y Alternativas de Retratamiento

La Ley 28271, define los pasivos ambientales mineros como “aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad”. Según la ley mencionada, si no es posible determinar al responsable del pasivo ambiental, corresponde al Estado asumir la responsabilidad, encargándose del cierre del sitio y afrontando todos los costos asociados, con el objetivo de detener la contaminación.

El 11 de enero del 2019, por Resolución Ministerial N° 010-2019-MEM/DM, se publicó la Actualización del Inventario de Pasivos Ambientales Mineros, en el cual indica que existen 8448 PAM's en el territorio nacional.

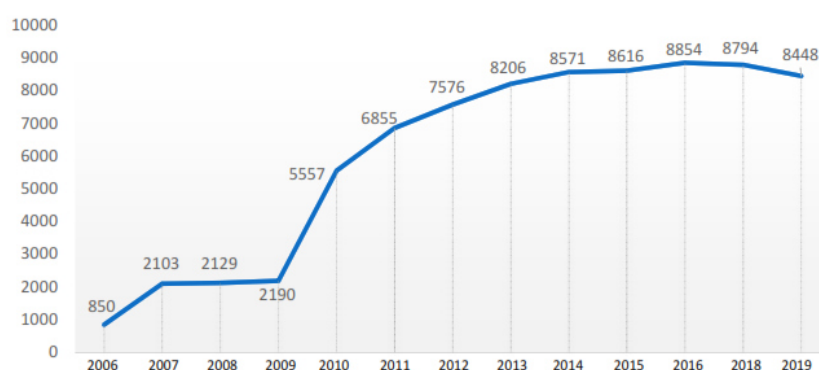


Figura 6

La cantidad de PAM's ha mostrado un crecimiento continuo desde 2006 hasta 2019

Nota: Hoyos et al. (2019)

DEPARTAMENTO	TOTAL PAMS
Amazonas	156
Ancash	1362
Apurímac	137
Arequipa	317
Ayacucho	61
Cajamarca	1156
Cusco	291
Huancavelica	881
Huánuco	332
Ica	117
Junín	666
La Libertad	377
Lambayeque	4
Lima	680
Madre de Dios	0
Moquegua	109
Pasco	546
Piura	24
Puno	1054
San Martín	1
Tacna	177
TOTAL	8 448



Figura 7

PAM's por departamento

Nota: Hoyos et al. (2019)

Aunque el reaprovechamiento de pasivos ambientales mineros representa una estrategia favorable para la recuperación ambiental, su verdadero potencial en el Perú aún no está plenamente determinado. Su aplicación es limitada, ya que la extracción minera solo resulta viable en aquellos relaves que contengan minerales económicamente recuperables.

Investigadores de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos demostraron que es posible fabricar ladrillos y baldosas a partir de relaves, empleando técnicas de fijación y microencapsulamiento de metales pesados, lo que garantiza la estabilidad del producto y previene la migración de contaminantes al ambiente (Romero & Flores, 2010).

En 2012, Minería Chilena reportó que los expertos consideran reutilizar los desechos mineros para la elaboración de materiales de construcción; no obstante, la industria ya emplea estos relaves como insumos dentro de sus propios procesos productivos.

Por su parte, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Andrés Bello ha realizado investigaciones enfocadas en la obtención de geopolímeros a partir de relaves, aprovechando la presencia de alúmina (Al_2O_3), sílice (SiO_2) y un activador alcalino como el hidróxido de sodio (NaOH). Estos geopolímeros destacan por su resistencia química y térmica, buenas propiedades mecánicas, menores emisiones de CO_2 y costos de producción reducidos. Asimismo, señalan que las técnicas de microencapsulamiento de metales pesados dependen del tipo de relave, por lo que no existe un procedimiento universal y su aplicación varía según la empresa y las características del residuo (Minería Chilena, 2012).

El Consorcio JRI – Eco Metales (Chile), en el marco de su proyecto “Recuperación de Valor desde Relaves”, identificó una secuencia de procesos que permite concentrar los elementos de valor presentes en los relaves y facilitar su recuperación, con el objetivo de impulsar la explotación de Tierras Raras a partir de estos residuos (ReporteMinero, 2019).

Actualmente hay técnicas en desarrollo para el retratamiento de relaves, muchas de las cuales son patentes de algunos investigadores, como el proceso OSTHAR, en la que se recuperan valores hasta más del 90% de relaves que han sido ya procesados.

Para hacer un retratamiento de relaves, se deberá tener en cuenta distintos parámetros antes de iniciar las pruebas metalúrgicas como:

- Establecer una metodología que permita caracterizar e identificar minerales con valor económico en un relave, basándose en aquellos más abundantes y fácilmente reconocibles.
- Definir la secuencia de procesos convencionales adecuados para concentrar y recuperar los elementos de interés económico.
- Evaluar la viabilidad económica de las inversiones y los costos operativos necesarios, considerando el tamaño del relave y los plazos de recuperación.
- Analizar el funcionamiento de los mercados de los elementos de valor económico, especialmente aquellos considerados “escasos y estratégicos”.

2.3.3. Fitorremediación

Una gran preocupación ambiental debido a la dispersión insegura de desechos industriales y urbanos producidos por actividades humanas es la principal causa de contaminación del suelo. La eliminación controlada y descontrolada de desechos, los derrames accidentales y de procesos, la extracción y fundición de minerales metalíferos, las aguas residuales y la aplicación de lodos industriales en suelos agrícolas son responsables del movimiento de contaminantes hacia sitios naturales no contaminados como polvo o lixiviados y contribuyen a la contaminación de nuestro ecosistema. Una amplia gama de compuestos inorgánicos y orgánicos causan contaminación, incluidos metales pesados, desechos combustibles y peligrosos, explosivos y productos derivados del petróleo. El componente principal de los contaminantes inorgánicos son los metales pesados que presentan un problema diferente al de los contaminantes orgánicos. La biorremediación microbiana ha tenido algo de éxito para la degradación de ciertos contaminantes orgánicos, pero es ineficaz para abordar el desafío de la contaminación por metales tóxicos, particularmente en el

suelo. Aunque las moléculas orgánicas se pueden degradar, los metales tóxicos sólo pueden remediarse eliminándolos del suelo (Carpena & Bernal, 2007).

2.3.3.1. Contaminación del Suelo y Metales Pesados.

La contaminación del suelo ha aumentado continuamente como resultado de las actividades industriales y la contaminación del suelo constituye un grave problema ambiental en todo el mundo. Hoy en día, la gente piensa sobre todo que la magnitud de la contaminación en los suelos requiere una acción inmediata. Desafortunadamente, los enormes costos asociados con la remoción de contaminantes de los suelos por medio de métodos fisicoquímicos tradicionales han estado alentando a las empresas a ignorar el problema. Los métodos habituales que se utilizan para tratar suelos contaminados con metales son la fijación (procesamiento químico del suelo para inmovilizar los metales) y la lixiviación (utilizando soluciones ácidas o lixivadores patentados para desorber y lixiviar metales del suelo seguido del retorno de residuos limpios del suelo al sitio). Otra estrategia habitual para la recuperación de suelos afectados por metales pesados es el denominado “lavado de suelos”, que consiste en emplear soluciones de lavado con agentes sintéticos capaces de favorecer la liberación de los metales atrapados en los agregados del suelo (Peters, 1999); sin embargo, pueden tener un impacto negativo sobre los microorganismos que viven en el suelo y el crecimiento de las plantas. Además de minimizar el impacto de futuros incidentes mediante el control de la entrada de contaminación, es imperativo organizar tecnologías innovadoras que puedan remediar económicamente los suelos contaminados (Garbisu & Alkorta, 2001).

Las principales fuentes de contaminación por metales incluyen la combustión de combustibles fósiles, la extracción y fundición de minerales metálicos, las líneas de transmisión eléctrica, los residuos urbanos, así como el uso de fertilizantes, pesticidas y aguas residuales. La peligrosidad de los metales pesados se incrementa debido a su persistencia prolongada en el ambiente. Aunque ciertos metales son esenciales para la vida, actuando como cofactores en metaloproteínas y enzimas, en concentraciones elevadas pueden ser dañinos al bloquear grupos funcionales críticos, desplazar otros iones metálicos o alterar la conformación de moléculas biológicas activas (Collintzky & Stotzky, 1989). Asimismo, presentan toxicidad tanto para plantas como para

microorganismos, afectando directamente procesos fisiológicos y bioquímicos, lo que se traduce en reducción del crecimiento, inhibición de la fotosíntesis y la respiración, y daño a los principales orgánulos celulares (Farago, 2008). Algunos metales, como el plomo, tienden a acumularse en las raíces, posiblemente debido a barreras fisiológicas que limitan su transporte hacia las partes aéreas de la planta, mientras que otros metales se movilizan con mayor facilidad dentro de la planta (McBride, 1995).

2.3.3.2. *Microorganismos para el Tratamiento de Suelo y Metales Pesados.*

Los microbios pueden, en principio, solubilizar metales, aumentando así su biodisponibilidad, o inmovilizarlos y reducir su biodisponibilidad. El Cd, As, Hg, Cu, Zn y Pb no radiactivos y el Cs, Sr y U radiactivos son los contaminantes metálicos más importantes para el medio ambiente. Aunque las moléculas orgánicas se pueden degradar, los metales tóxicos sólo pueden remediarse eliminándolos del suelo. Los microorganismos pueden desintoxicar metales mediante transformación de valencia, precipitación química extracelular o volatilización. De hecho, algunos microorganismos pueden reducir enzimáticamente una variedad de metales en procesos metabólicos (Lovley, 1993).

Ciertas bacterias generan energía para su crecimiento al acoplar la oxidación de ácidos orgánicos simples, alcoholes, hidrógeno o compuestos aromáticos con la reducción de Fe (III) o Mn (IV). Además, la transformación de selenato y selenito, que son compuestos tóxicos, en selenio elemental insoluble y considerablemente menos dañino, puede emplearse como estrategia para mejorar la remoción de estos aniones en áreas contaminadas. El cromo hexavalente, Cr (VI), la forma más tóxica de este metal también puede ser desactivado por acción bacteriana. Actualmente se investiga el mecanismo enzimático responsable de su reducción a Cr (III), con el objetivo de desarrollar eventualmente un proceso de biorremediación comercial. Los microorganismos participan además en el ciclo del carbono, ya que las variaciones en la distribución de carbono pueden influir en la disposición de los metales en la solución del suelo. Asimismo, estos organismos pueden afectar de manera indirecta la movilidad de los metales al modificar parámetros como el potencial redox y el pH (Ledin, 2000).

Esto refleja que los microorganismos en general tendrían el potencial de modificar el estado químico y por lo tanto la distribución y movilidad de muchos metales en un ambiente de suelo. Se utilizaron tres hongos saprótrofos (*Aspergillus niger*, *Penicillium bilaiae* y *Penicillium sp.*) para la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados (plomo). Se sugirió que desempeñan un papel protector, restringiendo la absorción de metales por las plantas al inmovilizar los metales en el tejido fúngico (Khan, 2005). Sin embargo, también ha habido informes de que algunas plantas acumulan concentraciones de metales más altas, en algunos casos hasta niveles tóxicos, debido a la presencia de micorrizas arbusculares. La presencia de perifiton asociado con *P. australis* en humedales de agua dulce mejoró la capacidad de la caña para acumular y retener metales (Lakatos et al., 1999).

2.3.3.3. *Tecnologías de Remediación.*

Las tecnologías destinadas a la remediación de suelos y/o aguas subterráneas comprenden todos los procedimientos orientados a disminuir la toxicidad, movilidad o concentración de los contaminantes presentes, ya sea modificando la composición del contaminante o del medio mediante intervenciones químicas, físicas o biológicas (Fundación Chile, 2019).

En la actualidad, existe un amplio rango de tecnologías para tratar sitios contaminados; algunas se aplican de manera rutinaria, mientras que otras aún se encuentran en desarrollo experimental. La selección de la técnica más adecuada depende de las propiedades del medio y del contaminante, de la efectividad esperada del tratamiento, de su viabilidad técnico-económica y del tiempo necesario para su implementación (Fundación Chile, 2019).

2.3.3.3.1. *Clasificación de Tecnologías de Remediación.*

Las tecnologías de remediación se pueden organizar según sus características operativas o su propósito, considerando principalmente: (i) el objetivo de la remediación, (ii) el lugar de aplicación y (iii) el tipo de tratamiento empleado. Adicionalmente, también se pueden clasificar según su nivel de desarrollo tecnológico (Fundación Chile, 2019).

Según el objetivo de la remediación, se distinguen tres tipos de técnicas: las de contención, que aíslan el contaminante sin modificarlo; las de confinamiento, que actúan sobre las condiciones fisicoquímicas del medio para reducir la movilidad del contaminante; y las de descontaminación, orientadas a disminuir o eliminar la concentración de contaminantes en el medio. En función del lugar de aplicación, se diferencian los tratamientos In Situ, realizados directamente en el sitio contaminado, y los Ex Situ, que requieren extraer el medio contaminado para su tratamiento posterior, ya sea en el mismo lugar (On Site) o en instalaciones externas (Off Site). En cuanto al tipo de tratamiento, se incluyen los biológicos, que degradan o transforman contaminantes mediante la actividad metabólica de organismos; los fisicoquímicos, que destruyen, separan o aíslan contaminantes aprovechando sus propiedades físicas o químicas; y los térmicos, que emplean altas temperaturas para volatilizar, descomponer o fundir los contaminantes. Finalmente, según su nivel de desarrollo, las tecnologías se clasifican en Tradicionales, que son de aplicación habitual a gran escala, con efectividad comprobada y datos accesibles sobre costos y rendimiento, y Innovadoras, que se encuentran en investigación o desarrollo, con información limitada sobre su desempeño y costos (Fundación Chile, 2019).

El esquema de la figura 8 ilustra los distintos criterios utilizados para clasificar las tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas.

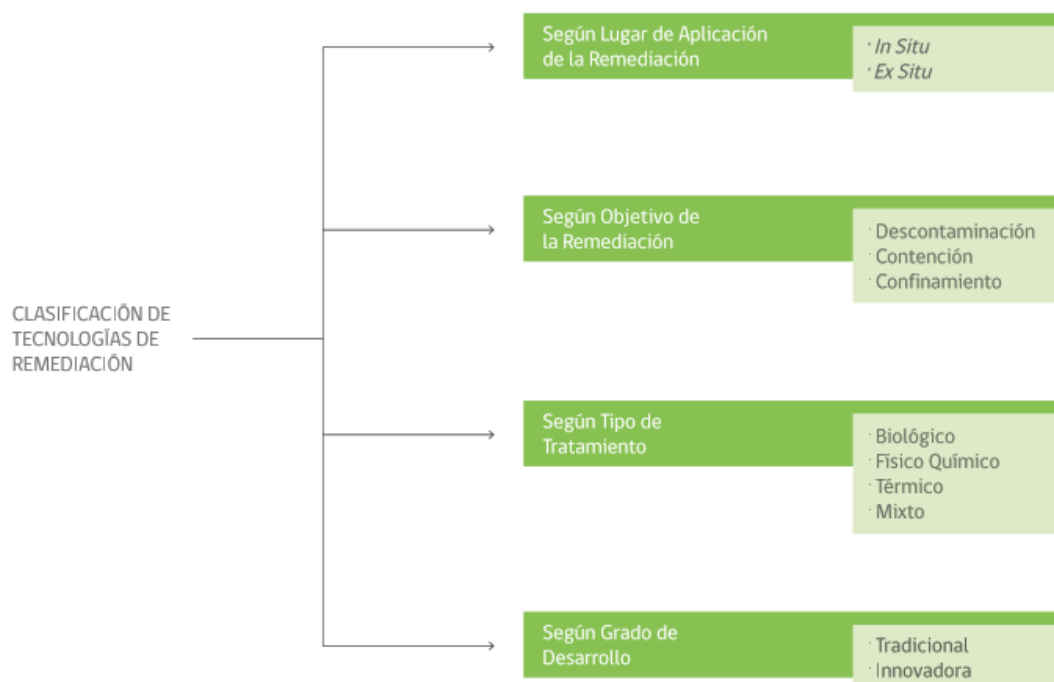


Figura 8

Diagrama de los criterios utilizados para clasificar las tecnologías de remediación de suelos y aguas subterráneas

Nota: Fundación Chile (2019)

2.3.3.3.2. Principales Tecnologías de Remediación según el Método de Tratamiento.

La Tabla 6 muestra un resumen de las tecnologías más relevantes para la remediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas, clasificadas según el método de tratamiento empleado.

Tabla 6

Tecnologías destacadas para la remediación de suelos y aguas subterráneas organizadas según el método de tratamiento aplicado

Tratamientos biológicos	Tratamientos térmicos	Tratamientos fisicoquímicos	Tratamientos mixtos
Bioaumentación	Calentamiento por conducción térmica	Adición de enmiendas	Extracción multifase
Biodegradación asistida	Calentamiento por radiofrecuencia	Barreras de suelo seco	Atenuación natural
Biotransformación de metales	Calentamiento por resistencia eléctrica	Barreras físicas (Verticales/Horizontales)	
Bioventing	Desorción térmica	Barreras hidráulicas	
Compostaje	Incineración	Barreras permeables activas	
Fitorremediación	Inyección de agua caliente	Electrocinética	
Landfarming	Inyección de aire caliente	Estabilización fisicoquímica	
Lodos biológicos	Inyección de vapor	Extracción de agua	
Pilas biológicas	Pirólisis	Extracción de aire	
	Vitrificación	Flushing	
		Inyección de aire comprimido	
		Inyección de solidificantes	
		Lavado de suelos	
		Pozos de recirculación	
		Sellado de suelos	

Nota: Fundación Chile (2019)

Tabla 7

Principales beneficios y limitaciones de las tecnologías de remediación, organizadas según el método de tratamiento aplicado

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Biológico	Facilita la descontaminación en tiempos reducidos.	Constituyen los tratamientos más costosos. Los gastos se incrementan según la energía y el equipo utilizados. Requieren gran inversión de capital y mano de obra.
	Presenta un buen balance entre efectividad y costos. Puede implementarse en lapsos breves.	Los residuos generados por los métodos de separación deben ser tratados o dispuestos, lo que eleva costos y demanda permisos.
Térmico	Requiere equipos accesibles y poca energía o infraestructura especializada.	Los fluidos de extracción pueden incrementar la movilidad de los contaminantes, por lo que se necesitan sistemas de recuperación.
	Resulta económica en su operación.	Los procesos demandan tiempos más prolongados.
Fisicoquímico	Es más amigable con el medio ambiente.	Es indispensable evaluar la toxicidad de los productos o intermedios generados.
	Los contaminantes suelen ser eliminados o degradados.	No son adecuados para suelos que no favorezcan el crecimiento de microorganismos.
	Necesita poco o ningún tratamiento adicional después del proceso.	

Nota: Fundación Chile (2019)

2.3.3.4. Tecnologías de Fitorremediación.

El concepto de fitorremediación se refiere a un conjunto de técnicas que utilizan plantas para limpiar o restaurar ambientes afectados por contaminantes, incluyendo suelos, aguas e incluso el aire. Este término, relativamente reciente, fue introducido en 1991 y proviene de la combinación de dos palabras: del griego phyto, que significa planta, y remedium, que implica corregir o reparar un daño. Por lo tanto, fitorremediación se entiende como la restauración de un ambiente contaminado mediante el uso de vegetales (Núñez et al., 2004).

La fitorremediación puede entenderse como un conjunto de técnicas que disminuyen, ya sea in situ o ex situ, la concentración de distintos compuestos mediante

procesos bioquímicos llevados a cabo por plantas y los microorganismos asociados a ellas (Fundación Chile, 2019).

A diferencia de los métodos tradicionales, que pueden modificar de manera irreversible las propiedades del suelo, el agua y los organismos presentes, además de ser costosos y de eficacia limitada, la fitorremediación se propone como una alternativa sostenible, económica y altamente aplicable para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminación tanto natural como antropogénica (Agricultureros - Red de especialistas en agricultura, 2015).

2.3.3.4.1. Tipos de fitorremediación.

Se reconocen seis modalidades de fitorremediación, clasificadas en dos grandes grupos: aquellas orientadas a la eliminación de contaminantes como fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización y las destinadas a su contención rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización. La elección del método depende del tipo y la concentración del contaminante, así como del medio en el que se encuentre. Entre estas técnicas, la fitoestabilización se emplea principalmente para contener los contaminantes, mientras que la fitoextracción es la más utilizada para su remoción (Fundación Chile, 2019).

a) Fitoextracción

La fitoextracción, también denominada fitoacumulación, consiste en que las raíces de las plantas absorban metales pesados o compuestos inorgánicos del suelo y los transporten a los brotes, los cuales son de fácil recolección y deben eliminarse de manera adecuada tras la cosecha (Figura 9). Mientras que la fitorremediación representa el concepto general, la fitoextracción constituye una técnica específica dentro de este enfoque. En los últimos años, la remediación ambiental basada en plantas se ha explorado ampliamente como una estrategia rentable y efectiva para la limpieza in situ de metales traza en suelos contaminados (Salt et al., 1995). El desarrollo de una tecnología comercialmente viable (fitoextracción) depende de varios factores, entre ellos: identificar o crear una planta de fitoextracción ideal, optimizar las prácticas de manejo del suelo y los cultivos y desarrollar métodos para el procesamiento de biomasa y la extracción de metales (Blaylock et al., 1997). Hay tres

conjuntos de proporciones de concentraciones, que idealmente deberían considerarse en los estudios de absorción de plantas. (a) Raíz / suelo: esta relación proporciona información sobre la absorción de un elemento por la raíz del suelo. Sugiere que la biodisponibilidad de ese elemento y su absorción por la raíz del suelo da alguna información sobre si es acumulado o excluido por el sistema radicular. (b) Hoja/raíz: esta relación muestra si hay libre movimiento entre la raíz y las partes aéreas, o si el elemento se acumula en las raíces o en las hojas. (c) Hoja/suelo: esta relación depende de las relaciones (a) y (b). En plantas sin hojas se mide la relación de concentración raíz/brote (Fundación Chile, 2019).

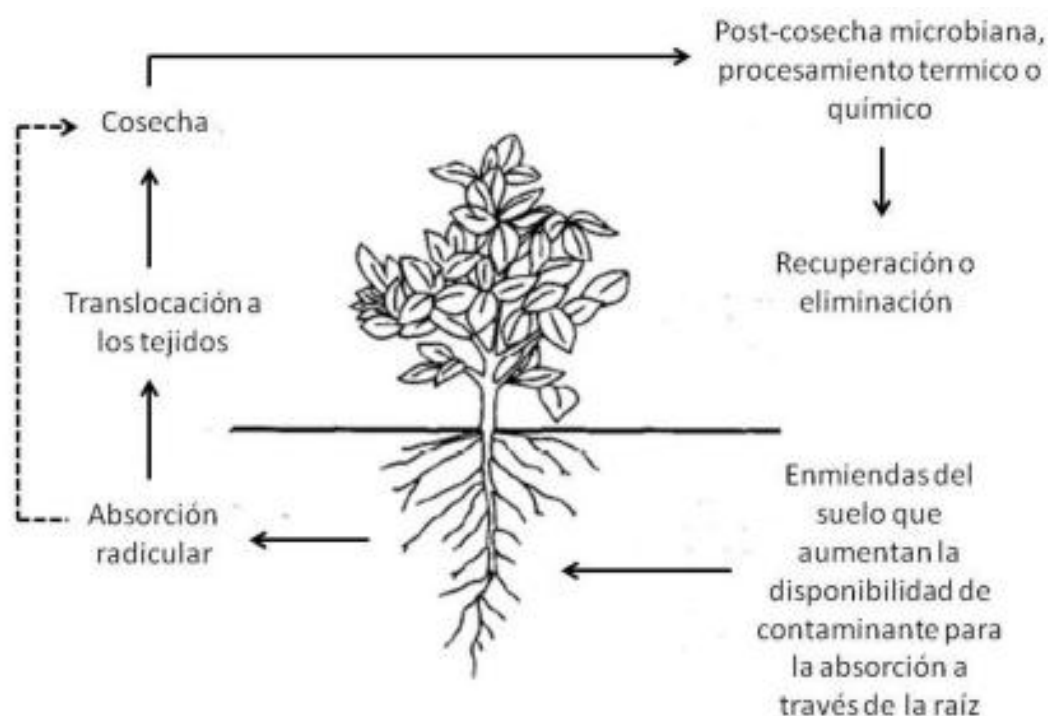


Figura 9

Proceso involucrado en la eliminación de contaminantes del suelo mediante fitoextracción

Nota: Cunningham et al. (1995)

Algunas plantas que se desarrollan en suelos ricos en metales han evolucionado para acumular grandes cantidades de estos elementos en sus tejidos sin presentar síntomas de toxicidad, siendo conocidas como hiperacumuladoras (Reeves & Brooks, 1983). En la Tabla 7 se incluyen ejemplos de estas especies comúnmente reportadas. Por otro lado, las plantas que crecen en suelos con concentraciones normalmente

tóxicas de metales se denominan “tolerantes a metales” o “metalofitos”. Dentro de estas, algunas evitan la absorción de los metales tóxicos, mientras que otras los incorporan en niveles elevados, denominándose “acumuladores”, definidos como plantas que presentan una concentración de metales en sus tejidos superior a la del suelo (Bolt et al., 1991). Ciertas especies poseen la capacidad natural de absorber y concentrar oligoelementos, mostrando adaptaciones que les permiten sobrevivir y reproducirse en suelos altamente contaminados con Zn, Cu, Pb, Cd, Ni y As. Estas plantas se clasifican en dos grupos principales: las pseudometalofitas, que pueden crecer tanto en suelos contaminados como no contaminados, y los metalofitos absolutos, que sólo prosperan en suelos contaminados y naturalmente ricos en metales. Hasta la fecha, se han identificado más de 400 especies hiperacumuladoras pertenecientes a familias como Asteraceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Cunoniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae y Euphorbiaceae (Baker et al., 1999). La Tabla 3 ilustra los potenciales de acumulación de metales pesados en algunas de estas plantas. Estas plantas se seleccionan y plantan en un sitio basado en los metales presentes y las condiciones del sitio. Después de que hayan crecido durante varias semanas o meses, se cosechan las plantas. La siembra y la cosecha se pueden repetir para reducir los niveles de contaminantes a los límites permitidos. El tiempo requerido para la remediación depende del tipo y extensión de la contaminación por metales, la duración de la temporada de crecimiento y la eficiencia de la eliminación de metales por las plantas, pero normalmente varía de 1 a 20 años. Este método resulta apropiado para la rehabilitación de extensas superficies de suelo afectadas, cuando la contaminación es superficial y los niveles de metales presentes son de bajos a moderados (Kumar et al., 1995).

Tabla 8*Ejemplos de fitoacumuladores y su potencial de acumulación*

Plantas	Metal	Contenido mg kg ⁻¹
T. caerulescens	Zn	39600
T. caerulescens	Cd	1800
Ipomea alpine	Cu	12300
Sebertia acuminata	Ni	25% en peso savia seca
Haumaniastrum robertii	Co	10200
A. racemosus	Se	14900
P. vittata	As	27000
Berkheta coddii	Ni	5500
Iberis intermedia	Ti	3070

Nota: Padmavathiamma & Li (2007)

Las estrategias básicas de la fitoextracción son (a) el desarrollo de la fitoextracción asistida por quelatos, que puede denominarse fitoextracción inducida; y (b) fitoextracción continua a largo plazo. Si la disponibilidad de metal no es adecuada para una absorción suficiente por parte de la planta, quelatos o pueden añadirse agentes acidificantes al suelo para liberarlos (Huang et al., 1997).

El hiperacumulador metálico más conocido puede ser *Thlaspi caerulescens* (berro alpino). Si bien la mayoría de las plantas muestran síntomas de toxicidad con una acumulación de Zn de aproximadamente 100 ppm, se demostró que *T. caerulescens* acumula hasta 26 000 ppm sin mostrar ningún daño (Brown et al., 1995). Se ha evidenciado que numerosos hiperacumuladores, como *Thlaspi caerulescens*, se establecen en suelos con alta concentración de metales, como los suelos de calamina (ricos en Pb, Zn y Cd). Según Ebbs et al., *Brassica juncea*, a pesar de presentar aproximadamente un tercio de la concentración de Zn en sus tejidos en comparación con *T. caerulescens*, resulta más eficiente en la extracción de Zn del suelo. La ventaja se debe principalmente al hecho de que *B. juncea* produce diez veces más biomasa que *T. caerulescens* (Fundación Chile, 2019).

El uso de hiperacumuladores en la fitoextracción está limitado por algunos factores (a) Los hiperacumuladores suelen absorber un metal específico. (b) La mayoría de los hiperacumuladores crecen lentamente y tienen una pequeña biomasa. (c) Las plantas crecen a menudo en áreas remotas y son raras; en ciertos casos, su

hábitat está amenazado por la minería y otras actividades de desarrollo. (d) Se sabe poco sobre su potencial de reproducción, manejo de plagas, características agronómicas y fisiología (Cunningham et al., 1997). Por lo tanto, el uso de plantas silvestres como fuente de semillas tampoco es confiable. Además, la selección y prueba de múltiples plantas hiperacumuladoras podría mejorar la tasa de fitorremediación, dando a este proceso un proceso prometedor para la biorremediación de la contaminación ambiental (Suresh & Ravishankar, 2004).

b) Fitovolatilización

La fitovolatilización consiste en emplear plantas para absorber contaminantes del suelo, transformarlos en compuestos volátiles y liberarlos al aire. Este proceso ocurre cuando árboles u otras plantas en crecimiento toman agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos; algunos de estos se trasladan hacia las hojas y se volatilizan en la atmósfera en concentraciones relativamente bajas (Mueller et al., 1999). Investigaciones recientes se han enfocado en plantas naturales o modificadas genéticamente capaces de captar metales elementales del suelo, convertirlos en especies gaseosas dentro de la planta y liberarlas al aire. La fitovolatilización de selenio ha recibido especial atención debido a su presencia problemática en suelos de diversas regiones del mundo (Brooks, 1994). También se ha aplicado para el mercurio, transformando el ión mercúrico en su forma elemental menos tóxica.

No obstante, este método debe evitarse en áreas cercanas a centros poblados o en lugares con condiciones climáticas que favorezcan la rápida deposición de los compuestos volátiles. Por ello, es fundamental evaluar cuidadosamente los posibles impactos de liberar metales al aire antes de implementar la fitovolatilización como estrategia de remediación.

c) Fitodegradación

El proceso de fitodegradación consiste en la eliminación de contaminantes orgánicos, como hidrocarburos, explosivos y agroquímicos, mediante su absorción, transporte y metabolismo dentro de la planta (Figura 9). Para que ocurra esta degradación, el contaminante debe penetrar en los tejidos vegetales, donde se desarrolla en tres etapas principales (López-Martínez et al., 2005):

I. Transformación. Se producen reacciones de oxidación, reducción e hidrólisis que alteran la estructura original de las moléculas orgánicas, incrementando su solubilidad en agua.

II. Conjugación. Las moléculas transformadas se enlazan con proteínas, péptidos, aminoácidos o carbohidratos, reduciendo su toxicidad y aumentando su hidrofiliidad, lo que mejora la movilidad de los contaminantes dentro de la planta.

III. Compartimentalización. Las moléculas más polares se almacenan en las vacuolas de la célula, evitando su acumulación en otras partes del tejido.

Durante estas fases actúan diversas enzimas, algunas de ellas inducibles. Por ejemplo, en hojas de especies como el álamo se ha identificado la glutatión S-transferasa (GST), que participa en la detoxificación celular y cataliza la conjugación de xenobióticos o sus metabolitos con glutatión (Hartmann et al., 2003).

A pesar de los avances, el conocimiento sobre la interacción específica entre los sistemas enzimáticos y los contaminantes tóxicos aún es limitado. El papel preciso de las enzimas en diferentes tejidos y su contribución a la fitodegradación exitosa sigue siendo poco comprendido. Ampliar este conocimiento permitirá optimizar la capacidad de las plantas para degradar hidrocarburos y mejorar la eficiencia de la fitorremediación.

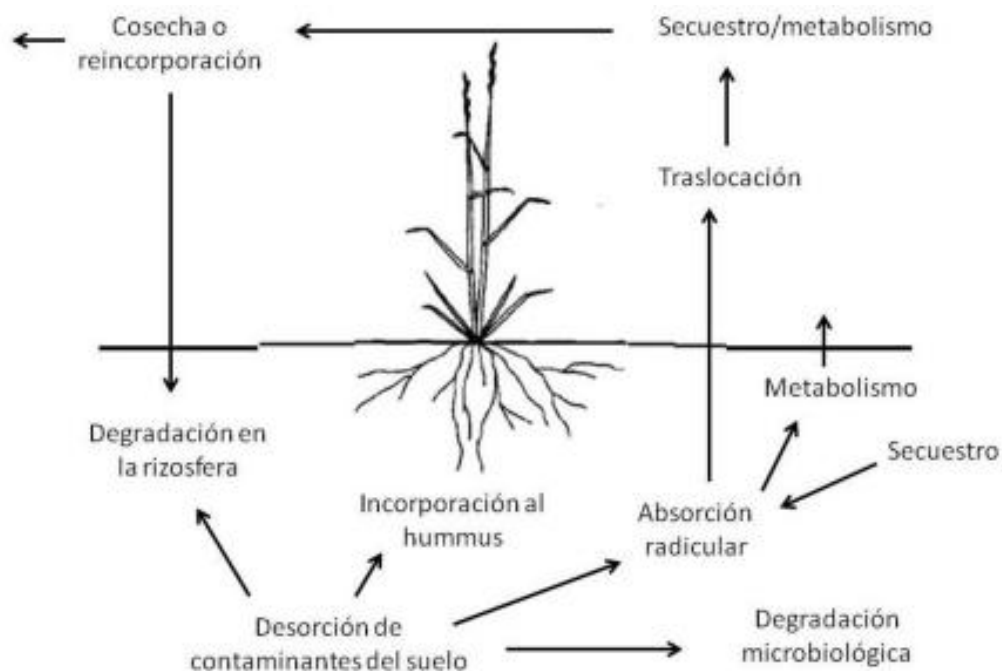


Figura 10

Proceso implicado en la fitoextracción de contaminantes del suelo

Nota: Cunningham et al. (1995)

d) Fitoestabilización

La fitoestabilización se refiere al uso de ciertas especies vegetales para inmovilizar contaminantes presentes en el suelo. Este proceso ocurre mediante la absorción y acumulación de metales por las raíces, la adsorción en estas o la precipitación dentro de la zona radicular, así como por la estabilización física del suelo. Su función principal es reducir la movilidad de los contaminantes y evitar su transferencia al agua subterránea o a la atmósfera. Además, puede facilitar la creación de una cubierta vegetal en áreas donde la vegetación natural ha sido desplazada debido a altas concentraciones de metales (Tordoff et al., 2000).

Para la revegetación, se pueden emplear especies tolerantes a metales, lo que contribuye a disminuir la dispersión de contaminantes mediante el viento, la erosión superficial, la lixiviación y la contaminación de aguas subterráneas. Las enmiendas del suelo también ayudan a reducir la contaminación de metales en el agua subterránea y a mejorar las condiciones agronómicas (Mendez et al., 2007). A diferencia de otras técnicas de fitorremediación, la fitoestabilización no busca eliminar los contaminantes,

sino mantenerlos inmovilizados en raíces o en la zona radicular, minimizando los riesgos ambientales y para la salud humana. La eficacia de este método depende de la especie vegetal, la disponibilidad de metales y las condiciones ambientales.

Diversos estudios han analizado la acumulación de metales por plantas de humedales alrededor del mundo, incluyendo *Salvania natanas*, *Lemna polyrrhiza*, *Ceratophyllum demersum* L., *Spirodela polyrrhiza* Schleid, *Bacopa monnieri*, *Hygrorrhiza aristata*, *Eichornia crassipes*, *Typha latifolia* y *Phragmites australis*. La fitoestabilización resulta especialmente adecuada para grandes áreas con contaminación superficial (Cunningham et al., 1997). No obstante, en sitios con niveles extremadamente altos de contaminación, el crecimiento vegetal puede ser inviable.

Entre sus ventajas, la fitoestabilización es menos costosa, más fácil de implementar y estéticamente favorable. (Yoon et al., 2006) evaluaron 36 plantas de 17 especies en sitios contaminados, concluyendo que aquellas con alto factor de bioconcentración (BCF) y bajo factor de translocación (TF) poseen mayor potencial para la fitoestabilización. Además, la ausencia de metales significativos en los brotes evita que estos residuos se consideren peligrosos. (Smith & Bradshaw, 1992) desarrollaron cultivares de *Agrostis tenuis* y *Festuca rubra* disponibles comercialmente para suelos contaminados con Pb, Zn y Cu. La estabilización puede complementarse con enmiendas del suelo que promuevan la formación de complejos metálicos insolubles, reduciendo la biodisponibilidad y la absorción por las plantas, lo que impide la entrada de metales a la cadena alimentaria. Esto puede lograrse mediante la modificación de propiedades fisicoquímicas del complejo metal-suelo, como la adición de fosfatos, que facilitan la adsorción y precipitación de metales (Bolan et al., 2003). La combinación de lodo o abono con cal para aumentar el pH es otra práctica común que inmoviliza metales pesados y mejora las condiciones del suelo, favoreciendo la revegetación (Williamson & Johnson, 1981).

La oxidación de sulfuros metálicos puede acidificar el suelo y aumentar la disponibilidad de metales, pero el encalado y los materiales orgánicos pueden reducir este efecto, promoviendo la fijación de metales en fracciones no disponibles. En

relaves mineros, suele ser necesario agregar fósforo; sin embargo, el fosfato puede movilizar arsénico (As). Estudios han mostrado que los lixiviados y la absorción de As son mayores con fertilizantes orgánicos que con superfosfato, especialmente en combinación con cebada (Mains et al., 2006).

Finalmente, la combinación de fitorremediación activa con atenuación natural ha mostrado ser eficaz en suelos contaminados con pirita. En plantas enmendadas, los factores de translocación de raíces a brotes fueron menores que en plantas control, indicando un menor riesgo de entrada de metales a la cadena alimentaria (Mains et al., 2006).

e) Rizofiltración

La fitofiltración es el uso de raíces de plantas (rizofiltración) o plántulas (blastofiltración) para absorber o adsorber contaminantes, principalmente metales, del agua y corrientes de desechos acuosos. Los mecanismos implicados en el proceso de biosorción incluyen quimisorción, complejación, adsorción-complejación de superficies y poros, intercambio iónico, microprecipitación, condensación de hidróxido en la subsuperficie y adsorción de superficie (Gardea et al., 2004).

Las raíces de las plantas o las plántulas que crecen en agua aireada mezclada con efluentes contaminados absorben, precipitan y concentran metales tóxicos. La rizofiltración utiliza plantas terrestres en lugar de plantas acuáticas porque las primeras presentan sistemas radiculares fibrosos mucho más grandes cubiertos con pelos radiculares con áreas de superficie extremadamente grandes.

El proceso implica cultivar plantas hidropónicamente y trasplantarlas a aguas contaminadas con metales donde las plantas absorben y concentran los metales en sus raíces y brotes. Las raíces de las plantas pueden solubilizar los metales pesados acidificando el entorno del suelo con protones extraídos de las raíces. Un pH más bajo libera iones metálicos ligados al suelo en la solución del suelo. Los iones metálicos solubilizados pueden ingresar a la raíz a través de las vías extracelulares o intracelulares. A medida que se saturan con los contaminantes metálicos, se cosechan raíces o plantas enteras para su eliminación (Flathman & Lanza, 1998).

(Dushenkov et al., 1995) aclaró que la translocación de metales a los brotes disminuiría la eficiencia de la rizofiltración al aumentar la cantidad de residuos vegetales contaminados necesarios para su eliminación. Sin embargo, (Zhu et al., 2009) sugieren que la eficiencia del proceso se puede incrementar utilizando plantas con una mayor capacidad para absorber y trasladar metales. Muchas plantas acuáticas tienen la capacidad de eliminar metales pesados del agua, incluido el *Eichhornia crassipes*, la pennywort (*Hydrocotyle umbellata* L.) y la *Lemna minor* L. Sin embargo, estas plantas tienen un potencial limitado de rizofiltración porque no son eficientes en la eliminación de metales como resultado de sus raíces pequeñas y de crecimiento lento (Dushenkov et al., 1995). El alto contenido de agua de las plantas acuáticas complica su secado, compostaje o incineración. *P. australis* tiene alta capacidad para eliminar metales de los humedales. El girasol (*Helianthus annuus* L.) y la mostaza india (*Brassica juncea* Czern.) son las plantas terrestres con mayor potencial para eliminar metales de la solución acuosa. Las raíces de la mostaza india son eficaces en capturando Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn (Dushenkov et al., 1995), mientras que el girasol elimina Pb, U y ¹³⁷Cs de las soluciones hidropónicas. (Sekhar et al., 2004) propusieron una nueva tecnología de fitofiltración para la eliminación y recuperación de plomo (Pb) de aguas residuales. Las plantas utilizadas para la fitofiltración deben poder acumular y tolerar cantidades significativas de los metales objetivo, junto con un fácil manejo, bajos costos de mantenimiento y un mínimo de desechos secundarios que requieren eliminación. También es deseable que las plantas produzcan cantidades significativas de biomasa de raíces o área superficial de raíces (Carpena & Bernal, 2007).

f) Fitoimmobilización

Consiste en la inmovilización y disminución de la biodisponibilidad de los contaminantes a través de la formación de compuestos químicos en la zona de contacto suelo-raíz, los cuales neutralizan las sustancias tóxicas mediante procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena & Bernal, 2007).

La Tabla 9 presenta un resumen de los distintos mecanismos involucrados en la fitorremediación.

Tabla 9*Mecanismos de fitorremediación*

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Orgánicos e inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Inorgánicos
Fitoinmovilización	Acumulación en la rizósfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar	Orgánicos
Rizofiltración	Uso de raíces para adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

Nota: Ghosh & Singh (2005)

2.3.4. Toxicidad por Metales Pesados en Plantas

Se considera que los metales pesados son aquellos elementos cuya densidad supera los 5 g cm⁻³ (Adriano, 2001). Entre ellos, algunos como cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn) son necesarios para el desarrollo de las plantas, mientras que otros, como el cromo (Cr) y el antimonio (Sb), son esenciales para los animales (Misra & Mani, 1991; Markert, 1993). Estos elementos metálicos pueden influir directamente en los procesos de crecimiento, senescencia y generación de energía debido a su alta reactividad. Su concentración en el suelo más allá de los límites permisibles es tóxica para las plantas, ya sea causando estrés oxidativo a través de radicales libres y/o alterando las funciones de las enzimas al reemplazar metales y nutrientes esenciales. Aunque los cambios en el metabolismo celular permiten que la planta se enfrente a la reducción en el crecimiento de la planta es el síntoma principal de la toxicidad de los metales. Sin embargo, la respuesta de las plantas al exceso de metales depende de su etapa de crecimiento. Por ejemplo, (Maksymiec & Baszyński, 1996) informaron que los frijoles (plantas dicotiledóneas) y la alfalfa eran más resistentes a los metales pesados en la etapa inicial de crecimiento. Por el contrario, en plantas más viejas expuestas a metales pesados, los mecanismos de adaptación en plantas más viejas expuestas a metales pesados no son tan flexibles y eficientes. Por lo tanto, los efectos tóxicos de los metales pesados sobre la fisiología y el metabolismo de las plantas son mucho más pronunciados.

Entre los metales pesados, el cromo y el cadmio son motivo de especial preocupación debido a su potencial toxicidad tanto para los animales como para las plantas, incluso en concentraciones bajas. El cadmio (Cd) se considera un contaminante especialmente riesgoso por su elevada toxicidad y su significativa solubilidad en medios acuosos. Los informes indican que, en algunas especies de plantas, el Cd interactúa con la absorción de nutrientes metálicos como Fe, Zn, Cu y Mn (Zhang et al., 2002; Wu & Zhang, 2002), además de inducir la peroxidación de lípidos y la descomposición de la clorofila en las plantas, lo que resulta en una mayor producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). El cadmio también inhibe la absorción de elementos como K, Ca, Mg, Fe porque usa los mismos portadores transmembrana. Su acumulación en plantas también puede representar un grave peligro para la salud de los seres humanos a través de la cadena alimentaria; sin embargo, presenta un riesgo adicional para los niños por la ingestión directa de suelo contaminado con Cd (Nordberg, 2003).

2.3.4.1. Origen y Ocurrencia.

Los metales pesados existen en fases coloidal, iónica, particulada y disuelta. Las formas solubles de los elementos metálicos son generalmente iones o quelatos organometálicos no ionizados. En el suelo, las concentraciones de metales varían desde trazas hasta 100 000 mg kg⁻¹, que depende de la ubicación y el tipo de metal. Entre los elementos químicos, el Cr se considera el séptimo elemento más abundante en la tierra y constituye de 0,1 a 0,3 mg kg⁻¹ de las rocas cristalinas. Aproximadamente el 60 - 70% de su producción mundial total se utiliza en aleaciones y el 15% en procesos industriales químicos, principalmente curtido de cuero, pigmentos, galvanoplastia y conservación de madera (McGrath, 1995). El cromo tiene varios estados de oxidación que van desde Cr²⁺ a Cr⁶⁺; sin embargo, también se ha demostrado que existen valencias de I, II, IV y V en varios compuestos. Además, el Cr (VI) se considera la forma más tóxica de cromo y generalmente se asocia con oxígeno en forma de oxianiones cromato (CrO₄²⁻) o dicromato (Cr₂O₇²⁻). El cromo trivalente (Cr III) presenta menor movilidad y toxicidad, y suele encontrarse principalmente ligado a la materia orgánica del suelo y los ambientes acuáticos (Becquer et al. 2003). El Cr se encuentra principalmente en forma de Cr (III) en el suelo y dentro de las estructuras minerales en forma de óxidos mixtos de Cr (III) y Fe (III). Cr y Fe (OH)₃

es una fase sólida de Cr (III) que tiene una solubilidad incluso menor que $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Por lo tanto, en el medio ambiente el Cr (III) soluble total permanece dentro de los límites permisibles para el agua potable para un amplio rango de pH (4–12) debido a la precipitación de $(\text{Cr}, \text{Fe})(\text{OH})_3$. Los metales pesados normalmente están presentes en bajas concentraciones en el agua dulce (Le Faucheur et al., 2006), pero la descarga de efluentes de una amplia variedad de industrias como galvanoplastia, acabado de metales, curtido de cuero, preparación de cromo, producción de baterías, fertilizantes fosfatados, pigmentos, estabilizadores y aleaciones ha impactado los ambientes. Además, también se ha informado que grandes áreas de tierra cultivada están contaminadas con As y Cd debido a prácticas agrícolas e industriales. La contaminación por cadmio también se desprende del caucho cuando los neumáticos de los automóviles pasan por las calles y, después de una lluvia, el Cd se lava en los sistemas de alcantarillado y se recoge en el lodo, que podría ser una fuente adicional de contaminación por Cd. Los informes indican que el lodo compostado de Topeka, Kansas contiene $4,2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Cd}$ (Liphadzi & Kirkham, 2006).

2.3.4.2. *Movilidad, absorción y acumulación de metales pesados.*

Los metales pesados que ingresan al medio ambiente se desplazan mediante agua y aire, depositándose finalmente en el suelo y los sedimentos, donde pueden permanecer inmovilizados. No obstante, este proceso de fijación puede tardar un tiempo considerable. Inicialmente, la fracción biodisponible de los metales en el suelo es elevada, pero disminuye de manera progresiva con el tiempo (Martin & Kaplan, 1998). La solubilidad y disponibilidad de los metales para las plantas dependen principalmente de las características químicas del suelo, como su pH, carga, capacidad de intercambio catiónico, potencial redox, textura, contenido de arcilla y materia orgánica (Williams et al., 1980; Logan & Chaney, 1983). En general, un mayor contenido de arcilla o materia orgánica y un pH elevado favorecen la unión firme de los metales al suelo, prolongando su tiempo de residencia y reduciendo su biodisponibilidad para las plantas. Además, la temperatura del suelo influye significativamente en la acumulación de metales por los cultivos. La disponibilidad de metales en el suelo puede incrementarse mediante distintos mecanismos, siendo uno de los más naturales la liberación de fitosideróforos en la rizosfera, los cuales quelan y solubilizan los metales presentes en el suelo (Kinnnersley, 1993). La acidificación de

la rizosfera y la liberación de carboxilatos se consideran estrategias efectivas para favorecer la acumulación de metales. Una vez movilizados en el suelo, los metales pesados son absorbidos por las células de las raíces de las plantas, y su desplazamiento en el suelo depende principalmente de: (i) la difusión de elementos metálicos a lo largo del gradiente de concentración que se forma debido a la absorción de elementos y, por lo tanto, al agotamiento del elemento en la vecindad de la raíz; (ii) intercepción por raíces, donde el volumen del suelo es desplazado por el volumen de la raíz después del crecimiento, y (iii) flujo de elementos metálicos desde la solución de suelo a granel hacia abajo del gradiente de potencial hídrico (Marschner, 1995). La pared celular actúa inicialmente como un intercambiador de iones con afinidad y selectividad relativamente bajas durante la unión de metales. Posteriormente, los sistemas de transporte y los sitios de unión intercelulares de alta afinidad facilitan y regulan la incorporación de estos metales a través de la membrana plasmática. El potencial de membrana, negativo en el interior de la célula y que puede superar los -200 mV en las células epidérmicas de la raíz, genera una fuerte fuerza impulsora para la absorción de metales mediante transportadores secundarios. Sin embargo, se ha informado que la absorción de algunos metales pesados es pasiva, metabólica o parcialmente metabólica y pasiva (Cataldo et al., 1983).

La captación de metales por raíces y hojas aumenta al incrementarse la concentración de metales en el medio circundante; sin embargo, esta absorción no sigue una relación lineal con la concentración. Esto se explica principalmente porque los metales que se unen a los tejidos provocan una saturación dependiente de la velocidad de absorción. La eficiencia de acumulación de metales por las plantas (factor de acumulación) es mayor cuando las concentraciones externas son bajas. Este fenómeno se observa tanto en cultivos en solución como en suelos con presencia de Cd, probablemente debido a que, a bajas concentraciones, la cantidad de metal por unidad de área de absorción es menor, lo que reduce la competencia entre iones en los sitios de absorción; por el contrario, a altas concentraciones, la competencia aumenta y la eficiencia disminuye. Las hojas pueden absorber tanto los metales esenciales como los no esenciales. En forma de gases, ingresan a las hojas a través de los estomas, mientras que en forma iónica los metales ingresan principalmente a través de la cutícula de la hoja (Lindberg, et al. 1992; Marschner 1995). El Hg en forma gaseosa

se absorbe a través de los estomas y se informa que su absorción es mayor en las plantas C3 que en las C4. La captación se produce en un alto grado a través de ectodesmos, "canales" no plasmáticos (que son partes menos densas de la capa cuticular) que se encuentran principalmente en el sistema de la pared celular epidérmica/membrana cuticular entre las células protectoras y las células subsidiarias. Además, la cutícula que cubre las células protectoras es a menudo diferente a la que cubre las células epidérmicas normales (Marschner 1995). La mayoría de los elementos metálicos son insolubles en el sistema vascular de las plantas y no pueden moverse libremente, por lo que generalmente forman precipitados de sulfato, fosfato o carbonato que los inmovilizan en compartimentos apoplásticos (extracelulares) y simplásticos (intracelulares) (Raskin et al., 1997). La alta capacidad de intercambio catiónico de las paredes celulares limita aún más el transporte apoplástico de iones metálicos a menos que el ión metálico se transporte como un quelato metálico no catiónico (Raskin et al., 1997). El continuidad de apoplasto de la epidermis de la raíz y la corteza es permeable al movimiento de solutos. En la vía apoplástica, el agua y las partículas de soluto pueden fluir y difundirse sin ninguna membrana cruzada, por lo que la vía permanece relativamente sin regular. La pared celular de la capa de células endodérmicas actúa como una barrera para la difusión apoplástica en el sistema vascular.

Generalmente, antes de la entrada de iones metálicos en el xilema, los solutos deben ser absorbidos por el simplasma de la raíz. Una vez que los metales son absorbidos por el simplasma de la raíz, su movimiento posterior desde la raíz hasta el xilema se rige principalmente por tres procesos, que incluyen: (i) retención de metales dentro del simplasma de la raíz, (ii) traslado a través del simplasma hacia la estela y (iii) liberación de los metales al xilema. El movimiento de iones hacia el xilema suele ser facilitado por proteínas transportadoras presentes en la membrana. Los elementos metálicos que no necesitan las plantas compiten eficazmente con los metales pesados esenciales para su transporte utilizando los mismos transportadores transmembrana (Tester & Leigh, 2001).

Algunos elementos (p. Ej., B, Cd, Mn, Mo, Se, Zn) se absorben y traslocan fácilmente dentro de los tejidos vegetales, mientras que otros (p. Ej., Al, Ag, Cr, Fe,

Hg, Pb) son menos móviles debido a su fuerte unión a los componentes del suelo o las paredes de las células de las raíces. Más allá de ciertos niveles de concentración, estos elementos pueden desplazarse dentro del sistema de transporte de la planta incluso en contra de un gradiente de concentración. Por ejemplo, estudios cinéticos indican que iones esenciales como Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} , así como el no esencial Cd^{2+} , compiten por el mismo transportador transmembrana para su movimiento (Crowley & Wang, 1991). Además, los complejos metálicos quelatados pueden ser trasladados mediante transportadores especializados a través de la membrana plasmática, como ocurre con el transporte de Fe-fitosideróforo en gramíneas (Cunningham & Berti, 1993). Entre los factores que afectan la acumulación de metales en plantas, el pH del suelo suele ser determinante: a valores de pH elevados, los metales forman compuestos poco solubles reduciendo su biodisponibilidad, mientras que a pH bajos, su disponibilidad para las plantas aumenta (Seregin & Ivanov, 2001). Sin embargo, se informa que el Cr aumenta la acumulación de Cd en plantas como *H. verticillata* y *Chara corallina*, pero se encuentra que la acumulación de Cr es mayor en comparación con el Cd cuando se aplica por separado (Shukla & Rai, 2005). Probablemente se deba al hecho de que las propiedades del Cr hacen que este elemento esté más disponible para la absorción de la planta.

2.3.4.3. *Mecanismo de Tolerancia al Metal.*

Las plantas utilizan procesos complejos para adaptar su metabolismo a un entorno que cambia rápidamente. Estos procesos incluyen la percepción, transducción y transmisión de estímulos de estrés. La adaptación a condiciones estresantes incluye mecanismos de resistencia y tolerancia, luego involucra la inmovilización de un metal en raíces y en paredes celulares (Garbisu & Alkorta, 2001). La tolerancia se ocupa del secuestro interno del elemento tóxico. Las plantas desarrollan una serie de mecanismos para evitar la toxicidad por metales pesados que incluyen: (i) producción de especies reactivas de oxígeno por autooxidación y reacción de Fenton, (ii) bloqueo de grupos funcionales principales y (iii) desplazamiento de iones metálicos de biomoléculas (Clemens, 2006). Todos estos mecanismos operan como estrategias para crecer en suelos contaminados. Se ha determinado que las plantas pueden crecer en suelos contaminados porque; (i) evitan la absorción de metales a través de partes aéreas o mantienen una concentración baja y constante de metales en un amplio rango de

concentración de metales en el suelo al retener metales en sus raíces (excluidores de metales) (Cunningham, 1995), (ii) acumulan activamente metales en sus tejidos aéreos debido a la producción de compuestos aglutinantes de metales (quelantes) o alteran el patrón de compartimentación de metales almacenando metales en partes no sensibles (indicadores metálicos), y (iii) pueden concentrar metales en sus partes aéreas a niveles muy superiores a los del suelo (hiperacumuladores). Aún se desconocen los mecanismos utilizados para la hiperacumulación. Muy pocos taxones de plantas superiores tienen adaptaciones que les permitan sobrevivir y reproducirse en suelos muy contaminados con Zn, Cu, Pb, Cd, Ni y As. Las raíces de los árboles de estas plantas pueden alimentarse activamente hacia zonas de suelo menos contaminadas (Turner & Dickinson, 1993) e, incluso con un crecimiento muy reducido, pueden “sentarse y esperar” condiciones favorables de crecimiento. Estas especies pueden clasificarse en dos grupos principales: (i) los pseudometalofitos, que se desarrollan tanto en suelos contaminados como en no contaminados, y (ii) los metalofitos absolutos, que únicamente prosperan en suelos con alta concentración de metales y naturalmente enriquecidos en estos elementos.

2.3.4.4. Efecto sobre el Crecimiento y el Desarrollo.

Los metales pesados retardan el crecimiento de toda la planta o de partes de esta. Las raíces, al ser las partes de la planta que interactúan directamente con suelos contaminados, suelen mostrar respuestas rápidas y sensibles en su crecimiento (Baker & Brooks, 1989). Se ha documentado ampliamente cómo diversos metales (Cu, Ni, Pb, Cd, Zn, Al, Hg, Cr, Fe) afectan el desarrollo de las partes aéreas de las plantas. La influencia de los metales pesados se manifiesta principalmente mediante la producción de radicales libres y especies reactivas de oxígeno (ROS), generando un estrés oxidativo que daña componentes celulares esenciales (Pandey et al., 2005). Por ejemplo, en plantas de pepino, el cobre (Cu) limita la absorción de potasio (K) en las hojas e inhibe la fotosíntesis debido a la acumulación de azúcares, retardando así la expansión celular. Los síntomas típicos de la toxicidad del Cd en las plantas de arroz son hojas marchitas, inhibición del crecimiento, clorosis progresiva en ciertas hojas y vainas foliares y sistemas de raíces pardas, especialmente las puntas de las raíces. Además, en el maíz (*Zea mays*) el Cd también reduce el crecimiento de las plantas (Talanova et al., 2001). Las plantas de tomate irrigadas con agua contaminada también

muestran algunas deformidades fenotípicas como retraso en el crecimiento, menor ramificación y fructificación. Sin embargo, la acumulación de metales pesados en los frutos parece ser extremadamente bajos en comparación con los tallos, raíces y hojas (Gupta et al., 2008).

a) Germinación

La germinación de semillas y el crecimiento temprano de las plántulas son bastante sensibles a las condiciones ambientales cambiantes. Por ello, el porcentaje de germinación y la velocidad de crecimiento de las semillas se emplean comúnmente para evaluar la tolerancia de las plantas a los metales (Peralta et al., 2001). Se ha observado que altas concentraciones (1, 5 y 10 μM) de metales pesados como Cu, Zn, Mg y Na inhiben de manera significativa la germinación y el desarrollo inicial de plántulas de cebada, arroz y trigo en comparación con plantas control. Dado que la germinación es el primer proceso fisiológico afectado por elementos tóxicos, la capacidad de una semilla para germinar en un medio que contenga un metal específico (por ejemplo, Cr) constituye un indicador directo de su nivel de tolerancia a dicho metal (Peralta et al., 2001). La germinación de la semilla de *Echinochloa colona* se reduce al 25% con un tratamiento de 200 μM de Cr (Rout y otros, 2000), y niveles altos (500 ppm) de Cr (VI) en el suelo reducen la germinación de *Phaseolus vulgaris* hasta en un 48%. Jain et al., (2000) observaron reducciones de hasta 32 y 57% en la germinación de las yemas de la caña de azúcar a 20 y 80 ppm de Cr, respectivamente. En otro estudio de (Peralta et al., 2001) la germinación de alfalfa (*Medicago sativa* cv. *Malone*) se redujo al 23% con un tratamiento de 40 ppm de Cr (VI). La germinación reducida de semillas bajo estrés por Cr podría ser un efecto depresivo del Cr sobre la actividad de las amilasas o el transporte de azúcares a los ejes del embrión, o un aumento en la actividad de la proteasa (Zeid, 2001).

b) Raíz

En las plantas, las raíces son los primeros órganos en entrar en contacto con elementos tóxicos y suelen acumular más metales que los brotes. La inhibición del alargamiento de las raíces parece ser el primer efecto visible de la toxicidad por metales. La extensión de la raíz puede verse limitada por la supresión de la división celular en la raíz o por una reducción en la expansión de las células en la zona de

elongación. Como la inhibición de la elongación radicular suele ser el primer signo visible de toxicidad por metales, la longitud de la raíz puede emplearse como un indicador clave de tolerancia (Hem, 1989).

Se informa (Han et al., 2004) que el Cr (III) precipita en las raíces de *Brassica juncea* evitando la translocación. De acuerdo con otro estudio (Peralta et al., 2001), plantas de alfalfa cultivadas en medio sólido regadas con 20 mg L⁻¹ de Cr (VI), la proporción de Cr en brotes a Cr en raíces fue aproximadamente 43%. Esto es una indicación de que la mayor parte del 50% del Cr absorbido se mantiene en las raíces.

La respuesta de las raíces a los metales pesados se ha estudiado ampliamente tanto en especies de plantas herbáceas como en árboles. Después del trabajo de numerosos investigadores (Barceló y Poschenrieder, 1990; Punz y Sieghardt 1993) los principales efectos morfológicos y estructurales provocados por la toxicidad de los metales en las raíces se pueden resumir en: (i) disminución de la elongación radicular, biomasa y diámetro del vaso, (ii) daño en la punta, (iii) colapso del pelo radicular o disminución en el número de raíces, (iv) aumento o disminución en la formación de raíces laterales, (v) mejora en la suberificación y lignificaciones, y (vi) alteraciones en el estructura de hipodermis y endodermis.

La toxicidad de los metales depende del tipo de elemento. El cromo (Cr) tiene un impacto más severo sobre la longitud de la raíz en comparación con otros metales pesados. Mokgalaka-Matlala et al. (2008) reportaron que el crecimiento radicular de *Prosopis juliflora* se redujo notablemente con el aumento de las concentraciones de As (V) y As (III). En *Salix viminalis*, la longitud de la raíz se ve más afectada por Cr que por Cd o Pb (Prasad et al., 2001). Fargašová (1994) indicó que el efecto inhibitor del Cr sobre el desarrollo radicular de *S. alba* es comparable al del Hg y más intenso que el del Cd y Pb, mientras que el Ni produce una reducción menor. Para los primordios de raíz en *S. viminalis*, el orden de toxicidad de los metales reportado es Cd > Cr > Pb (Prasad et al., 2001).

c) Tallo

Los metales pueden perjudicar tanto la altura de las plantas como el desarrollo de los brotes. La disminución en la altura se atribuye principalmente a la reducción del crecimiento radicular y a alteraciones en la absorción de micronutrientes y el transporte de agua hacia los tejidos aéreos. La presencia de Cr en las partes aéreas puede afectar directamente el metabolismo celular de los brotes, contribuyendo a la reducción del crecimiento de la planta (Shanker et al., 2005). Anderson et al. (1973) reportaron que, en plantas de avena cultivadas en arena con soluciones nutritivas, el contenido de Cr de 2, 10 y 25 ppm provocó disminuciones en la altura del 11%, 22% y 41%, respectivamente, en comparación con las plantas control. Cr (III) inhibe el crecimiento de brotes en cultivos de alfalfa (Barton et al., 2000). Hanus y Tomas (1993) informaron de una reducción significativa en la altura de *Sinapis alba* a un nivel de 200 o 400 mg kg⁻¹ de Cr en el suelo junto con fertilizantes N, P, K y S. Muy recientemente, se ha informado de una reducción en la altura del tallo a diversas concentraciones (10, 20, 40 y 80 ppm) de Cd y Cr en plántulas de *Dalbergia sissoo* en comparación con el control (Shah et al., 2008).

d) Hoja

Un crecimiento saludable de las hojas, el desarrollo del área y el número total de hojas contribuyen al rendimiento del cultivo. Los elementos metálicos como el Cd, sin embargo, inducen cambios morfológicos como el secado de las hojas más viejas y la clorosis y necrosis de las hojas más jóvenes. Las plantas de *Datura innoxia* cultivadas en suelos contaminados con Cr (VI) mostraron signos de toxicidad a 0,2 mM, incluyendo la caída de hojas, y a 0,5 mM presentaron marchitez foliar (Vernay et al., 2008). En contraste, estos síntomas no se observaron en condiciones con exceso de Cr (III). Por otra parte, Sharma y Sharma (1993) y Tripathi et al. (1999) reportaron que concentraciones elevadas de Cr (VI) (200 ppm) afectaron significativamente la biomasa y el área foliar de plántulas de *Albizia lebbeck*. Estos estudios sugieren que los cambios en rasgos de crecimiento foliar pueden emplearse como bioindicadores de contaminación por metales pesados y en la selección de especies tolerantes. Una adición de 100 ppm de Cr (VI) al suelo mostró una disminución de hasta un 45% en el rendimiento de hojas secas en las plantas de frijol. Aparece una reducción en el área foliar y el peso seco de la hoja en *Oryza sativa*, *Acacia holosericea* y *Leucaena*

leucocephala tratadas con efluentes de tenería de concentración variada (Karunyal et al., 1994). En un estudio sobre el efecto de Cr (III) y Cr (VI) en la espinaca, se informó que el Cr aplicado al suelo a una tasa de 60 mg kg⁻¹ y niveles más altos reducían el tamaño de la hoja y causan quemaduras en las puntas de las hojas. o márgenes y tasa de crecimiento foliar más lenta. Según Pedreno et al. (1997) la contaminación por metales pesados, especialmente Cr, afectó preferentemente a las hojas jóvenes de las plantas de tomate.

2.3.4.5. Efecto sobre la Fisiología Vegetal.

a) Fotosíntesis

El aparato fotosintético parece ser muy sensible a la toxicidad de los metales pesados, que invariablemente afectan las funciones fotosintéticas ya sea directa o indirectamente al inhibir las actividades enzimáticas del ciclo de Calvin y la deficiencia de CO₂ debido al cierre de los estomas (Seregin e Ivanov, 2001). Los impactos negativos del Cr sobre la fotosíntesis en plantas terrestres están bien citados en la literatura. Vernay et al. (2007) observaron fotoinhibición en las hojas de *Lolium perenne* debido al efecto de 250 µM Cr en la fotoquímica primaria de PSII y notaron una disminución en la eficiencia fotoquímica máxima del PSII de plantas a 500 µM Cr. Shanker et al. (2005) argumentó que el Cr causaba estrés oxidativo en las plantas porque el Cr podría mejorar los sumideros alternativos de los electrones debido a la reducción del oxígeno molecular (parte de la reacción de Mehler). Según Rocchetta et al. (2006), el efecto general de los iones Cr sobre la fotosíntesis y la transferencia de energía de excitación podría deberse a anomalías inducidas por Cr (ensanchamiento del tilacoide y disminución del número de grana) en la ultraestructura del cloroplasto. Aunque el efecto del Cr sobre la fotosíntesis en plantas superiores está ampliamente estudiado, no se comprende bien hasta qué punto el Cr induce la inhibición de la fotosíntesis debido a la desorganización de la ultraestructura del cloroplasto y la inhibición de transporte de electrones o la influencia del Cr en las enzimas del ciclo de Calvin (Vazques et al. 1987). Krupa y Baszynski (1995) explicaron algunas hipótesis sobre los posibles mecanismos de toxicidad de metales pesados en la fotosíntesis y presentaron una lista de enzimas clave de reducción de carbono fotosintético, que fueron inhibidas en plantas tratadas con metales pesados (principalmente cultivos de cereales y leguminosas). Se ha observado que la inhibición del 40% de la fotosíntesis

de toda la planta en plántulas de plantas de guisantes (*Pisum sativum*) de 52 días a 0,1 mM de Cr (VI) se incrementó aún más al 65 y 95% después de 76 y 89 días de crecimiento respectivamente. La desorganización de la ultraestructura del cloroplasto y la inhibición de los procesos de transporte de electrones debido a Cr y una desviación de electrones del lado donante de electrones de PS I a Cr (VI) es una posible explicación de la disminución inducida por Cr en la tasa fotosintética. Es posible que los electrones producidos por el proceso fotoquímico no se utilicen necesariamente para la fijación de carbono, como lo demuestra la baja tasa fotosintética de las plantas estresadas por Cr. Bera et al. (1999) estudiaron el efecto del Cr presente en el efluente de las curtidurías sobre el contenido de pigmento de cloroplasto en frijol mungo e informaron que, independientemente de la concentración de Cr, la clorofila a, la clorofila b y la clorofila total disminuyeron en las plántulas de 6 días en comparación con el control. Chatterjee y Chatterjee (2000) informaron que en coliflor (*cv. Maghi*) cultivada en arena refinada con nutrición completa (control) y Co, Cr y Cu a 0.5 mM cada uno, se registró una disminución drástica de las clorofilas a y b en las hojas. El orden de estrés fue $\text{Co} > \text{Cu} > \text{Cr}$. Por el contrario, un estudio sobre la tolerancia al Cr y Ni en *E. colona* mostró que el contenido de clorofila era alto en los callos tolerantes en términos de supervivencia en concentraciones altas de Cr. El cromo (VI) a 1 y 2 mg L⁻¹ disminuyó significativamente las concentraciones de clorofila a y b y carotenoides en *Salvinia minima* (Nichols et al. 2000). La disminución en la proporción de clorofila a/b (Shanker 2003) provocada por Cr indica que la toxicidad del Cr posiblemente reduce el tamaño de la parte periférica del complejo de antenas. También se ha planteado la hipótesis de que la disminución de clorofila b por Cr podría deberse a la desestabilización y degradación de las proteínas de la parte periférica. Se estableció una disminución significativa en el contenido de clorofila y carotenoide bajo la influencia del Cd en ambas etapas de crecimiento. Este efecto dependía de la concentración de Cd en la solución nutritiva. El PSII es inactivado por metales pesados como el Cd. Este efecto está relacionado con trastornos en la biosíntesis de clorofila o destrucción de clorofila. Además, los centros de reacción del PSII y el transporte de electrones del PSII se ven afectados por una interacción del Cd que afecta la actividad enzimática y la estructura de la proteína. La interacción de los metales pesados con los grupos funcionales SH de proteínas según Van Assche y Clijsters (1990) es un posible mecanismo de acción de los metales pesados. Sin embargo, un estudio anterior de

Haghiri (1974) informó que el alto contenido de Cd en el medio de crecimiento suprimió la absorción de Fe por las plantas, mientras que Root et al. (1975) afirman que la clorosis inducida por Cd en las hojas de maíz posiblemente podría deberse a cambios en las proporciones Fe: Zn. En otras especies de plantas, la toxicidad del Cd pareció inducir una deficiencia de fósforo o un transporte reducido de manganeso.

b) Relación con el agua

El agua constituye un factor clave en la regulación del crecimiento vegetal, ya que influye de manera directa e indirecta en todo el proceso de desarrollo. En suelos contaminados con metales, las plantas a menudo experimentan estrés hídrico, principalmente debido a las limitaciones fisicoquímicas del suelo y a sistemas radiculares poco profundos. Por ello, los estudios sobre la interacción entre disponibilidad de agua y plantas bajo estrés por metales pesados han cobrado relevancia. La elección de especies tolerantes a la sequía se considera un criterio importante para la fitorremediación de suelos con contaminación metálica.

Los metales pesados pueden generar estrés en las plantas mediante diversos mecanismos que resultan en una reducción de la pérdida de agua, incremento en la retención hídrica, disminución en el tamaño y número de hojas, alteraciones en el tamaño de los estomas, así como en el número y diámetro de los vasos del xilema. Además, provocan un aumento de la resistencia estomática, mayor enrollamiento y caída foliar, y un incremento en la suberización de las raíces (Barceló & Poschenrieder, 1990).

Se ha sugerido que los metales pesados pueden afectar la conductividad hidráulica de la raíz mediante múltiples mecanismos que operan en la vía apoplástica y/o simplástica. Puede producirse una expansión celular reducida a sus concentraciones relativamente bajas en el medio de crecimiento sin ningún daño a la integridad celular. Por ejemplo, en plantas de frijol se inhibió el crecimiento de la expansión foliar en plantas de frijol expuestas a Cd 3 μ M después de 48 h. La turgencia de la hoja en masa no se vio afectada, sin embargo, hubo una disminución en el contenido relativo de agua (Poschenrieder et al. 1989). Los datos sugirieron que una disminución de la extensibilidad de la pared celular inducida por Cd podría haber

resultado en una disminución de la conductividad hidráulica del sistema foliar en las plantas de frijol.

Chatterjee & Chatterjee (2000) indicaron que niveles elevados de Cr provocan una reducción del potencial hídrico y de la transpiración, así como un aumento en la resistencia a la difusión y en el contenido relativo de agua en las hojas de coliflor. De manera similar, Barcelo et al. (1985) registraron una disminución del potencial hídrico en las hojas de plantas de frijol expuestas a Cr. Las plantas de frijol arbustivo cuando se trataron con Cr mostraron síntomas de toxicidad como disminución de la turgencia y plasmólisis en las células epidérmicas y corticales y disminución del diámetro de los vasos traqueales, lo que finalmente resultó en una reducción del movimiento longitudinal del agua (Vazques et al. 1987).

Turner & Rust (1971) informaron del marchitamiento de varios cultivos y especies de plantas debido a la toxicidad del Cr, pero hay poca información disponible sobre el efecto exacto del Cr en las relaciones hídricas de las plantas superiores. La limitada distribución de las raíces y la menor superficie radicular en plantas afectadas por Cr pueden disminuir su habilidad para captar agua del suelo. Además, la toxicidad del Cr (VI) podría desempeñar un papel clave al reducir la conductancia estomática, lo que afecta negativamente a las células y membranas de las células que regulan los estomas. Esto podría afectar la relación del agua en todas las especies de plantas.

c) Nutrientes esenciales

Los metales pesados como micronutrientes son esenciales para las funciones biológicas y fisiológicas de las plantas. Estas funciones abarcan la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos, compuestos de crecimiento, clorofila y metabolitos secundarios, incluyendo el metabolismo de carbohidratos y lípidos, la tolerancia al estrés, así como la integridad estructural y funcional de diversas membranas y otros componentes celulares. No obstante, metales pesados como Cr y Cd interfieren con el correcto funcionamiento de los micronutrientes. Diversos estudios han reportado que niveles elevados de Cr en el suelo reducen el contenido de N y aumentan el de P en tejidos de avena, disminuyen la absorción de micronutrientes como Cu, Zn, Mn y Ni, reducen Fe y Zn mientras elevan Mn en frijol, afectan la captación de Ca, Cu, B, K, Pb y Mg en

soja, disminuyen Fe, Zn y Mn en maíz, y reducen la absorción de Fe, Ca, Cu, Mg, Mn y Zn en caña de azúcar (Zayed y Terry, 2003). Dado que el Cr es un elemento tóxico y no esencial, las plantas pueden carecer de un mecanismo específico para su transporte. Además, al ser estructuralmente similares y tener capacidades de unión competitivas con los portadores comunes a la de los elementos esenciales, puede afectar la absorción y el transporte de nutrientes minerales en las plantas de una manera compleja. Por ejemplo, Cr puede reducir la absorción de S y Fe. De manera similar, P y Cr son competitivos para los sitios de superficie y Fe, S y Mn compiten con Cr por la unión al transporte. Por lo tanto, la capacidad competitiva del Cr hace su rápida entrada en el sistema de la planta.

Según Barcelo et al. (1985), existe una fuerte correlación entre los pigmentos de clorofila y la absorción de Fe y Zn en plantas sometidas a estrés por Cr. El Cr dificulta la disponibilidad de nutrientes como Fe, Mn, Cu y Zn en partes de la planta como raíces, hojas y tallo. Los contenidos de N, P, K, Na, Ca y Mg en tallos y ramas de plantas de tomate tratadas con Cr a 50 y 100 mg L⁻¹ se redujeron significativamente. El cadmio también influye en la absorción y transporte de elementos esenciales en las plantas, ya sea reduciendo su disponibilidad en el suelo o disminuyendo los microbios en el suelo (Moreno et al. 1999). La toxicidad del Cd causa la deficiencia nutricional en las plantas, la inhibición de la síntesis de clorofila y la desorganización de la estructura del cloroplasto. Los informes muestran que una reducción en la absorción de Fe por las plantas de maíz y la concentración de Cd se incrementó en el suelo junto con una acumulación de Cd en los tejidos de las raíces y brotes de las plantas (Liu et al. 2006).

2.3.4.6. *Efecto sobre las Enzimas y Otros Compuestos.*

La actividad enzimática es indispensable para mejorar la respuesta de reacción al estrés en las plantas a través de la biosíntesis de moléculas de señalización. Se informa que los metales pesados impiden las enzimas asociadas con el ciclo de reducción de carbono fotosintético y las tres fases del ciclo de Calvin, como la carboxilación, reducción y regeneración, especialmente la fase de carboxilación, en plantas (Krupa y Baszynski 1995).

Se encuentran disponibles varias investigaciones sobre la hiperactividad de las enzimas antioxidantes en varias plantas bajo estrés de Cu, Pb, Zn (Ali et al. 2003). Sin embargo, hay menos informes disponibles sobre el papel del sistema antioxidante enzimático en la protección de las plantas de los efectos tóxicos de las especies reactivas de oxígeno (ROS) en un ambiente de estrés por Cr. Esto demuestra la hipótesis de que el sistema antioxidante, además de su función de desintoxicación, también puede ser un blanco sensible de la toxicidad por Cr en plantas. Dentro de la célula, una reducción de Cr (VI) a Cr (III) se debe a la formación de radicales libres debido a la fuerte capacidad oxidativa del Cr. Por lo tanto, las plantas que crecen en un ambiente estresado por Cr (VI) son propensas al riesgo potencial inducido por ROS. Por lo tanto, en respuesta al estrés por Cr, se activan en la célula sistemas de defensa antioxidante, que consisten en varios mecanismos enzimáticos y no enzimáticos. Uno de los mecanismos de protección es el sistema antioxidante enzimático, que implica la acción secuencial y simultánea de una serie de enzimas que incluyen superóxido dismutasa (SOD), peroxidasa (POD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX). Se observó que la toxicidad por Cr incrementó la actividad CAT en plantas de frijol. Sin embargo, Cr deprimió la actividad enzimática en *Zea mays*, *Triticum spp.* y *Brassica chinensis* (Sharma et al. 2003).

a) Reductasa de Fe (III) de raíz

La presencia de metales pesados dificulta la movilidad y absorción de Fe por las plantas, limitando la reducción de Fe (III) a Fe (II) y, por ende, su disponibilidad. Esta deficiencia de hierro provoca clorosis en las plantas. Cuando hay escasez de Fe, el aumento de la actividad de la reductasa de Fe (III) en las raíces mejora la capacidad de convertir Fe (III) a Fe (II), forma que las raíces pueden absorber (Alcantara et al., 1994). De manera similar, la exposición de *Plantago lanceolata* deficiente en hierro a Cr incrementó la actividad de la reductasa de Fe (III) asociada a las raíces. Wolfgang (1996), en un experimento de raíces divididas con tratamientos sin Cr y sin Fe, observó una actividad reductasa de Fe EDTA intermedia en comparación con plantas control no divididas. Además, en condiciones de deficiencia de hierro, la adición de 2 μM de Cr (III) redujo la actividad de la quelato-reductasa férrica en raíces de alfalfa, mientras que a 10 μM tendió a estimular dicha actividad en medios que contenían Co, Ni, Cr y Cu (Barton et al., 2000).

b) Nitrato reductasa

Varias especies de árboles se ven afectadas por un mayor contenido de metales pesados. En plantas de *Albizia lebbbeck* estresadas por Cr (VI), se ha observado que la actividad de nitrato reductasa (NR) de las hojas aumenta sustancialmente en comparación con el control. Sin embargo, la actividad se correlaciona negativamente con otras partes, es decir, la longitud de las raíces y los brotes, el área de las hojas y la biomasa de las plantas (Tripathi et al. 1999). De manera similar, la concentración de Cr de hasta 200 μM restringió significativamente la actividad de NR en plantas de *Nelumbo nucifera* y *Nymphaea alba* (Vajpayee et al. 2000). Aunque las concentraciones bajas de Cr (1 μM) mejoran la actividad de NR, las concentraciones más altas lo vuelven tóxico, al inhibir significativamente la actividad enzimática. Los metales pesados como el Cd también son fundamentales para reducir la actividad del nitrato reductasa a concentraciones más altas y la absorción y transporte de nitratos desde las raíces hasta los brotes de las plantas. También se mostró una reducción similar en la actividad enzimática debida al Cd en plantas de *Silene cucubalus* (Mathys, 1975).

c) Enzimas antioxidantes

El oxígeno afecta el metabolismo celular de dos maneras, ya sea proporcionando la energía para la combustión enzimática de compuestos orgánicos o causando daño a las células aeróbicas debido a la formación de intermediarios reactivos de oxígeno (Bartisz, 1997), que podrían producirse en exceso en varios compartimentos. u orgánulos incluso en condiciones normales. Sin embargo, los organismos vivos poseen sistemas de defensa altamente eficientes llamados sistemas antioxidantes o antioxidantes contra la toxicidad de los intermediarios reactivos del oxígeno (ROI). Estos sistemas de defensa se componen de componentes enzimáticos y no enzimáticos.

Los metales pesados, en bajas concentraciones, promueven la actividad antioxidante de las enzimas. Sin embargo, a contenidos metálicos más altos, la actividad de la catalasa se reduce y la actividad de la SOD no se ve afectada. Un estudio sobre el efecto del Cr (VI) sobre la actividad de la SOD de las mitocondrias de la raíz en las plantas de guisantes reveló que la actividad de la SOD aumentó en un 20% con

un contenido de Cr de 20 μM , mientras que los niveles más altos de Cr (200 μM) redujeron sustancialmente la actividad de la SOD (Dixit et al. 2002). La actividad específica de la catalasa en la caña de azúcar se inhibe con una dosis de Cr que oscila entre 20 y 80 ppm. Según Chatterjee y Chatterjee (2000), un exceso de Cr (0,5 mM) restringe la actividad de la catalasa en hojas de coliflor. Se informó que la actividad de peroxidasa y catalasa se incrementó en los callos tolerantes que en los no tolerantes en plantas de *Echinochloa colona* (L) con un tratamiento de Cr de 1.5 mg L⁻¹ (Samantaray et al. 2001). La aplicación de Cr a una concentración de 15 μM mostró un aumento en las actividades de catalasa y peroxidasa en callos derivados de *Leucaena leucocephala* (K8) que crecen en suelos tratados con Cr en comparación con suelos no tratados (Rout et al. 1999). Del mismo modo, el cadmio interviene negativamente en las enzimas antioxidantes.

2.3.5. Metales Pesados

El término “metales pesados” o “metales traza” se utiliza para describir un conjunto de metales y semimetales (metaloideos) que se vinculan con posibles efectos contaminantes o tóxicos en el medio ambiente; comúnmente incluye metales como el cobre, plomo y zinc. Sin embargo, el término está definido de manera vaga y no existe una definición autorizada única. Algunos definen un metal pesado como un metal con una masa atómica mayor que la del sodio, mientras que otros lo definen como un metal con una densidad superior a 3,5 – 6 g cm⁻³. Como se indicó previamente, este término también se extiende a semimetales, elementos que poseen características físicas de los metales, pero se comportan químicamente como no metales, como el arsénico, así como a no metales como el selenio, probablemente debido a la idea implícita de que “peso” y “toxicidad” se consideran de algún modo equivalentes. A pesar de que el término metales pesados no tiene una base terminológica o científica sólida, se utiliza aquí en la forma en que se ha utilizado en gran parte de la literatura científica medioambiental, es decir, para referirse a metales o semimetales que cumplen con las definiciones dadas anteriormente. Los metales pesados comunes incluyen zinc, cobre, plomo, cadmio, mercurio, cromo, níquel, estaño, arsénico y plata. Muchos de ellos, presentes en concentraciones naturales, son esenciales para diversas funciones bioquímicas y se requieren en pequeñas cantidades para un desarrollo normal de los organismos (por ejemplo, Zn, Cu, Se, Cr). En contraste, otros metales no son

esenciales y su ausencia no provoca deficiencias (por ejemplo, Pb, Cd, Sn, Hg y el arsénico semimetálico) (Diéz, 2009).

2.3.5.1. Plomo.

El plomo se encuentra en concentraciones moderadas en rocas ígneas y sedimentarias, predominando como sulfuro de plomo (galena; PbS). Su capacidad de movimiento en el ambiente natural es limitada, debido a la baja solubilidad de sus compuestos como hidróxido, carbonato y fosfato de plomo. La adsorción de plomo sobre superficies de sedimentos minerales y orgánicos y su coprecipitación con óxido de manganeso también tienden a mantener bajas concentraciones en aguas naturales. Las principales formas inorgánicas disueltas de plomo son el ión Pb^{2+} libre, los complejos de hidróxido y los pares de iones carbonato y sulfato. Los equilibrios que involucran carbonatos de plomo básicos mantienen la concentración de plomo disuelto por debajo de aproximadamente $50 \mu g\ l^{-1}$ en agua que tiene $61\ mg\ l^{-1}$ de HCO_3^- y un pH entre 7.5 y 8.5. El agua con menor alcalinidad y pH puede contener mayores concentraciones de plomo disuelto (Hem, 1989).

El plomo es un elemento no esencial y no es tan biodisponible como otros metales. Sin embargo, es tóxico para los mamíferos, incluidos los humanos. La exposición a altos niveles de plomo puede dañar el cerebro y los riñones y afectar la producción de hemoglobina y la fertilidad masculina (ATSDR, 2013). Los niños menores de siete años son particularmente sensibles incluso a pequeñas cantidades de plomo. Además, la exposición al plomo puede aumentar la presión arterial en los hombres de mediana edad, pero se desconoce si el plomo aumenta la presión arterial en las mujeres. El plomo puede ingresar al organismo al inhalar aire que contiene polvo o partículas de este metal. La mayor parte del plomo que llega a los pulmones pasa a la sangre y se distribuye hacia diferentes órganos y tejidos del cuerpo. La mayor parte del plomo se almacena en los huesos y los niveles de plomo en los huesos y los dientes aumentan a medida que la persona envejece. En los adultos, solo una pequeña parte del plomo ingerido de los alimentos, bebidas, agua, tierra o polvo ingresa a la sangre desde el tracto gastrointestinal y se traslada a otras partes del cuerpo. Sin embargo, cuando los niños ingieren alimentos o materiales que contienen plomo, como tierra contaminada que se encuentra en un sitio de desechos peligrosos o esquirlas de pintura

que contiene plomo, mucho más plomo ingresa a la sangre. En la primera mitad del siglo XX, muchos niños desnutridos del centro de la ciudad satisfacían sus antojos comiendo escamas de pintura vieja de edificios en ruinas, lo que causó muchos casos de envenenamiento por plomo. Por esta razón, se eliminó el plomo de los pigmentos de pintura (EPA, 2013).

El plomo utilizado por la industria proviene de minerales extraídos o de chatarra reciclada. El plomo tiene una amplia gama de usos. Su uso principal es la fabricación de acumuladores. Otros usos incluyen la producción de productos químicos, incluidos aditivos de gasolina, pigmentos de pintura, pigmentos para vidriar cerámica, diversos productos metálicos (por ejemplo, láminas de plomo, soldaduras, tuberías y pesas de pescador) y municiones. La contaminación del aire, el agua y el suelo por plomo se debe a la dispersión de estos productos químicos en el medio ambiente a través de vías similares a las descritas para el zinc y el cobre (consulte las secciones anteriores). Sin embargo, el camino a través del aire solía ser más significativo, especialmente en áreas de tráfico pesado de automóviles. Antes de la introducción de la gasolina sin plomo, se añadió tetraetilo de plomo a la gasolina para promover una combustión más eficiente.

El contenido de plomo del combustible se emite en forma de partículas de aerosol en los gases de escape, que se depositan dentro de un rango relativamente limitado desde la fuente. El uso de plomo en municiones para tiro al plato, caza y guerra es otro "caso especial" que causa contaminación por plomo. Por lo tanto, los campos de entrenamiento militar y los clubes de tiro al plato pueden contener concentraciones particularmente grandes de plomo. Aunque las municiones de plomo contienen plomo como metal nativo, la intemperie de los perdigones, balas y proyectiles en el suelo resulta en la dispersión de cantidades relativamente grandes de plomo en el suelo (Alloway y Ayres, 1997).

2.3.5.2. *Arsénico.*

El arsénico es un semimetal que puede formar arseniuros metálicos en los que el estado de oxidación es negativo. Además, puede formar sulfuros que se pueden encontrar en minerales de sulfuro. En soluciones acuosas, el arseniato (estado de

oxidación 5+) y el arsenito (estado de oxidación 3+) son las formas termodinámicamente estables. En condiciones levemente reducidas, la forma predominante es el ion arsenito sin carga HAsO_2 (aq). En condiciones oxidantes, el anión arsenato monovalente H_2As_4^- predomina en el rango de pH entre 3 y 7, mientras que la especie divalente $\text{H}_2\text{As}_4^{2-}$ predomina entre pH 7 y pH 11 (Hem, 1989). Los compuestos de arsénico tienen la capacidad de unirse a óxidos e hidróxidos de Fe (III), Al (III) y Mn (III/IV), así como a materiales húmicos y a minerales de tipo arcilloso (Bissen y Frimmel, 2003). Como el fosfato, el arseniato es fuertemente absorbido por oxihidróxidos férricos. Además, los arseniatos férricos y de otros metales son poco solubles. Esto permite que los arseniatos se acumulen en zonas de precipitación de hierro cuando el agua subterránea reducida que se filtra hacia arriba cruza la interfaz de oxidación-reducción. En aguas superficiales aireadas, la adsorción por óxidos de hierro hidratados o la precipitación o coprecipitación con sulfuro en sedimentos de fondo reducidos mantienen las concentraciones de arsénico en el agua a niveles muy bajos (generalmente por debajo de $10 \mu\text{g l}^{-1}$). El arsénico también está involucrado en procesos bioquímicos. La metilación mediada biológicamente produce complejos orgánicos, como el ácido dimetil arsénico $((\text{CH}_3)_2\text{AsOOH})$ y el ácido metil arsónico $(\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2)$. El ácido dimetilarsénico es difícil de oxidar y puede constituir la principal especie de arsénico en las aguas superficiales. La importancia del estado redox y la formación de complejos orgánicos solubles de arsénico dan como resultado que las concentraciones de arsénico en el agua natural varíen en varios órdenes de magnitud. Algunos compuestos de arsénico son relativamente volátiles, lo que es un factor importante en la circulación natural del arsénico en el medio ambiente.

El arsénico es un elemento tóxico y no esencial. Como la importancia toxicológica del arsénico se atribuye en parte a su similitud química con el fósforo (aunque el estado de oxidación del fósforo no es sensible al potencial redox), puede alterar fácilmente las vías metabólicas que involucran al fósforo (Alloway y Ayres, 1997). Las formas orgánicas de arsénico suelen ser menos tóxicas que las formas inorgánicas. La mayor fuente de ingesta de arsénico para los humanos son los alimentos (generalmente se ingieren entre 25 y 50 μg por día), y cantidades más pequeñas provienen del agua potable y el aire. Sin embargo, en áreas con concentraciones de arsénico naturalmente elevadas en el agua subterránea que se usa

para beber, como en el sur de Bangladesh y Bengala Occidental, India, la principal fuente de ingesta de arsénico es el agua potable. Algunos pescados y mariscos comestibles contienen niveles elevados de arsénico, pero este se encuentra predominantemente en formas orgánicas menos tóxicas. Los niños pequeños que tragan pequeñas cantidades de tierra mientras juegan, pueden estar expuestos al arsénico si ingieren tierra que contiene niveles elevados de arsénico. La mayor parte del arsénico que ingresa al organismo es metabolizada por el hígado, convirtiéndose en compuestos menos tóxicos que se eliminan eficazmente a través de la orina. Por ello, el arsénico tiende a acumularse poco en el cuerpo, salvo en situaciones de exposición elevada. Desde la antigüedad, se reconoce que el arsénico inorgánico es altamente venenoso para los humanos. Dosis elevadas pueden ser fatales, considerándose tóxica una ingesta diaria de 5 a 50 mg y letal si supera los 50 mg. La exposición crónica a cantidades menores puede provocar disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, alteraciones cardíacas, daño vascular, hepático o renal, así como afectaciones en el sistema nervioso. Además, se ha vinculado con el desarrollo de cáncer de piel (ATSDR, 2013).

El arsénico está presente en los gases volcánicos y es un componente común de las aguas geotermales. En algunas partes del mundo, los depósitos minerales naturales contienen grandes cantidades de arsénico; esto puede resultar en niveles elevados de arsénico inorgánico en el suelo y el agua. Se han informado concentraciones elevadas de arsénico de $50 \mu\text{g l}^{-1}$ o más en las aguas subterráneas de varios acuíferos grandes en diversas partes del mundo, incluidos Bangladesh, el sudeste de Asia, el interior de Mongolia, Hungría, el sudoeste de EE. UU., El centro de México, y Argentina. Sin embargo, estas concentraciones mejoradas tienen diferentes causas: además de ocurrir en aguas geotérmicas, pueden ser el resultado de la concentración evaporativa o la movilización del material del acuífero. Sin embargo, las altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea no están necesariamente relacionadas con las altas concentraciones de arsénico en las rocas generadoras. En los acuíferos sedimentarios de las cuencas interiores áridas, las concentraciones elevadas probablemente estén relacionadas con la desorción de arseniato de hierro y otros óxidos en condiciones alcalinas y tóxicas, mientras que en los acuíferos aluviales y deltaicos jóvenes, como en Bangladesh, la movilización de arsénico se produce en

condiciones muy reductoras (Smedley y Kinniburgh, 2001). Tales condiciones son producidas por la descomposición mediada microbianamente de depósitos de turba enterrados, lo que induce tanto la reducción de arsenato a arsenito (menos adsorbido por los oxihidróxidos férricos) como la disolución reductora de oxihidróxidos férricos, liberando así la carga adsorbida de arsénico al agua subterránea (Smedley y Kinniburgh, 2001; McArthur et al., 2001).

Las fuentes antropogénicas de arsénico incluyen actividades mineras, fundiciones de metales, combustión de combustibles fósiles, aplicaciones de pesticidas, productos domésticos y eliminación de desechos. Aproximadamente el 40 por ciento de las emisiones antropogénicas se derivan de la fundición de cobre y otros metales que liberan arsénico inorgánico a la atmósfera. En la mayoría de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gasolina) se encuentran niveles bajos de arsénico, por lo que la quema de estos materiales produce emisiones de arsénico inorgánico al aire. La quema de combustible representa aproximadamente el 20 por ciento de las emisiones antropogénicas. El arsénico se ha utilizado como componente de varios pesticidas. Algunos productos, en su mayoría herbicidas, contienen arsénico orgánico como ingrediente activo, mientras que otros pesticidas que se utilizan para controlar las malas hierbas, insectos o roedores, o para la conservación de la madera, contienen arsénico inorgánico. En el pasado, el arsénico inorgánico también se encontraba en productos domésticos como pinturas, tintes, medicinas y venenos para ratas. Sin embargo, estos productos ya no son de uso general. Como resultado de la eliminación de estos productos agrícolas y domésticos, algunos sitios de eliminación de desechos contienen grandes cantidades de arsénico y pueden ser una importante fuente local de contaminación del suelo y el agua por arsénico (Diéz, 2009).

2.3.6. Identificación de Plantas frente a la Presencia de Metales Pesados en el Suelo

Muchas especies vegetales pueden tolerar altas concentraciones de metales en el suelo al limitar su absorción o su transporte hacia las hojas, manteniendo así niveles relativamente bajos y constantes en la biomasa aérea, independientemente de la concentración del metal en el suelo (Baker, 1981). Otras plantas, en cambio, absorben activamente los metales del suelo y los almacenan en formas no tóxicas en sus partes

aéreas, siguiendo una estrategia acumuladora. Entre estas estrategias también se encuentran las plantas indicadoras, cuya concentración de metales refleja la del suelo (Baker, 1981). Dentro de las acumuladoras, los niveles de metales pueden variar desde ligeros incrementos sobre el nivel de fondo hasta concentraciones extremadamente altas de metales como Ni, Zn y Co sin manifestar síntomas visibles de toxicidad. Algunas de estas especies no pueden completar su ciclo vital en suelos normales y se conocen como hiperacumuladoras. El término “hiperacumuladora” fue introducido por Brooks y Reeves para describir plantas de campo capaces de concentrar más de 1.000 mg de Ni por kg de materia seca en algún tejido de la biomasa aérea (Brooks et al., 1977). En general, estas plantas pueden alcanzar concentraciones en las hojas entre 10 y 100 veces mayores que los niveles considerados normales (Chaney et al., 2000). Actualmente, se considera hiperacumuladora a cualquier planta que pueda concentrar más de 10.000 mg/kg de Mn y Zn, más de 1.000 mg/kg de Co, Cu, Pb, Ni, As y Se, y más de 100 mg/kg de Cd.

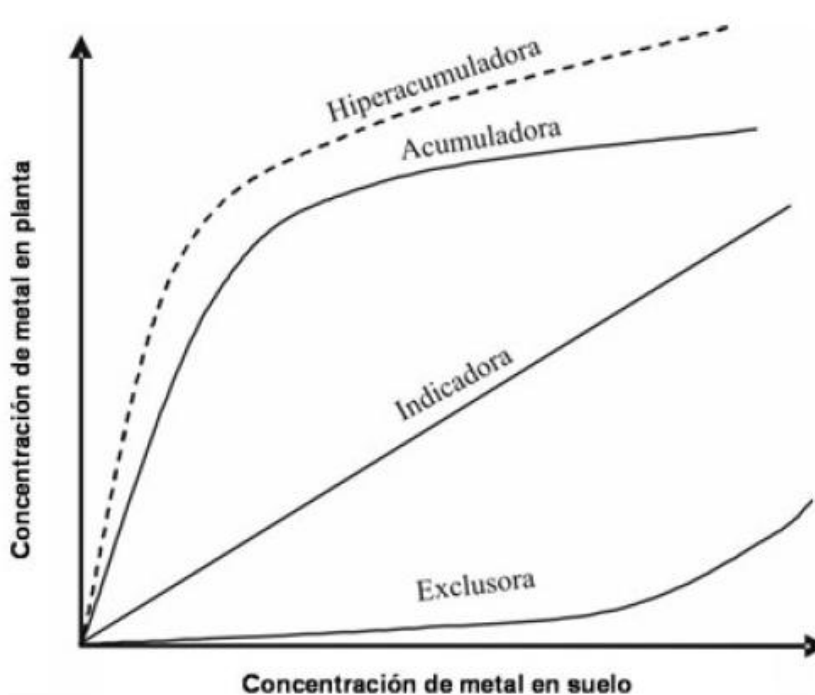


Figura 11

Respuestas típicas de las plantas frente a la presencia de metales pesados en el suelo

Nota: Adriano (2001)

2.3.7. *Cálculo de las Relaciones de Concentración*

La capacidad de las plantas para acumular metales pesados se evalúa mediante dos indicadores principales: el factor de bioconcentración (BCF) y el factor de translocación (TF).

2.3.7.1. *Factor de Bioconcentración (BCF).*

El factor de bioacumulación en la raíz de la planta se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula (Olivares & Peña, 2009):

$$BCF_{\text{raíz}} = \frac{\text{Concentración del metal}_{\text{raíz}}}{\text{Concentración del metal}_{\text{suelo}}}$$

Las concentraciones de metal tanto en las raíces como en el suelo se expresan en mg/kg. Se considera que una planta tiene potencial de hiperacumulación si su BCF en raíces (BCF_{raíz}) es mayor a 1, mientras que se clasifica como planta exclusora si este valor es menor a 1. El factor de bioacumulación en los tejidos aéreos de la planta se determina mediante la siguiente fórmula (Olivares & Peña, 2009):

$$BCF_{\text{aérea}} = \frac{\text{Concentración del metal}_{\text{aérea}}}{\text{Concentración del metal}_{\text{suelo}}}$$

Las concentraciones de metal en los tejidos aéreos de la planta y en el suelo se expresan en mg/kg. Una planta se considera potencialmente hiperacumuladora cuando el valor de su BCF en la parte aérea (BCF_{aérea}) supera 1, mientras que se clasifica como planta exclusora si este valor es inferior a 1.

2.3.7.2. *El Factor de Translocación (TF).*

Se calculó dividiendo la concentración de metal en la biomasa aérea (mg/kg) entre la concentración en la biomasa de la raíz de la planta, siguiendo lo propuesto por Zhang et al. (2002) y Olivares y Peña (2009), mediante la siguiente fórmula:

$$TF = \frac{\text{Concentración del metal}_{\text{parte aérea}}}{\text{Concentración del metal}_{\text{suelo}}}$$

Donde las unidades de la concentración del metal en la parte aérea de la planta y en el suelo están en mg/kg.

Cuando el valor del TF es superior a uno, indica que la planta tiende a acumular metales en la biomasa aérea, es decir, es capaz de transferir los metales pesados desde la raíz hacia los tallos, proceso conocido como fitoextracción o fitoacumulación (Figura 7). Por el contrario, si el TF es inferior a uno, significa que la planta no transfiere eficazmente los metales desde la raíz a la parte aérea, concentrándolos principalmente en las raíces; este proceso se denomina fitoestabilización.

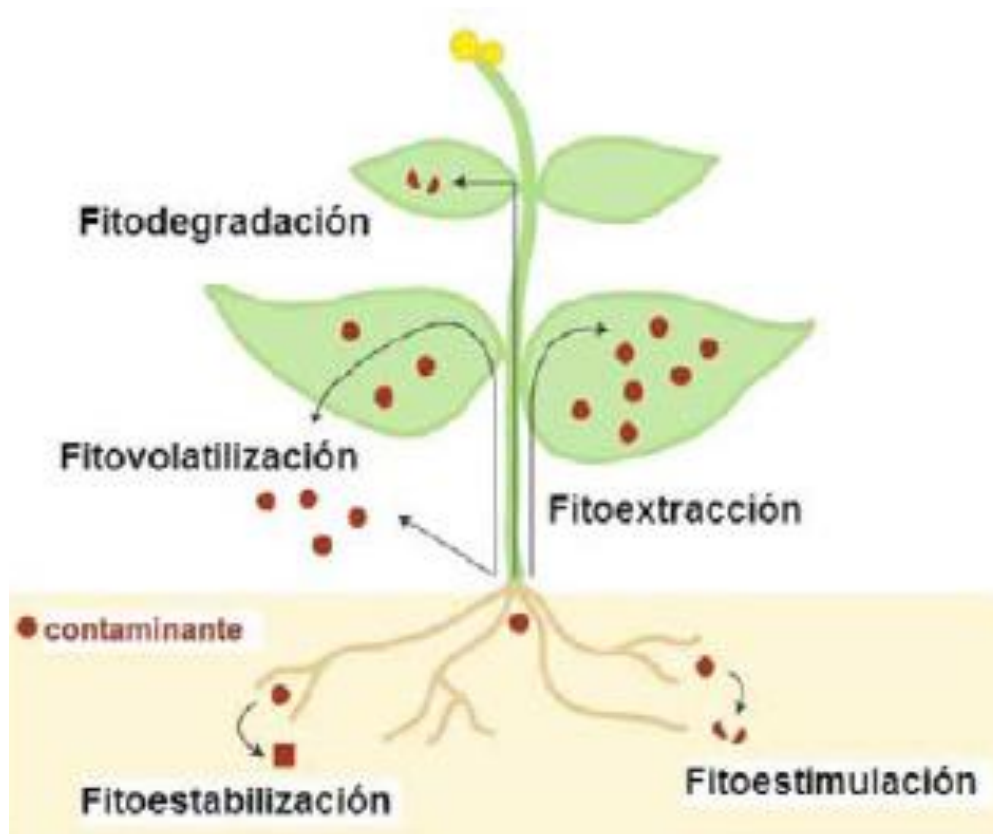


Figura 12

Mecanismos de fitoestabilización y fitoextracción que ocurren a lo largo del sistema planta-suelo, desde las raíces hasta los tallos

Nota: Díez (2009)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Antecedentes del Problema

La investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental.

Presenta un diseño experimental bifactorial para la etapa de lixiviación (concentración y tiempo), y un diseño preexperimental longitudinal para la etapa de fitorremediación, evaluando la variación de metales pesados en el tiempo.

3.2. Variables de Investigación

3.2.1. *Variable Independiente (VI)*

Lixiviación con Sandioss

Fitorremediación

3.2.2. *Variable Dependiente (VD)*

Recuperación de Au y Ag

Eficiencia de la remediación

3.2.3. Matriz de Operacionalización de Variables

Tabla 10

Operacionalización de Variables

Variable	Conceptualización	Tipo de variable	Operacionalización	Dimensiones	Indicador	Índice	Unidad de medida
Lixiviación con Sandioss	Proceso metalúrgico aplicado a relaves mineros que emplea el reactivo Sandioss como alternativa al cianuro para la disolución y recuperación de Au y Ag.	Variable independiente	Aplicación de ensayos de lixiviación en botella variando concentración (1000–3000 ppm) y tiempo (12–24 h) bajo diseño factorial.	Preparación del relave	Granulometría	% -200 malla	%
				Parámetros químicos	Concentración de Sandioss	1000 – 3000 ppm	ppm
				Parámetros operativos	Tiempo de lixiviación	12 – 24 h	h
				Condición del medio	pH de operación	10.5	-
Recuperación de Au y Ag	Porcentaje de oro y plata recuperados del relave mediante el proceso de lixiviación con Sandioss.	Variable dependiente	Determinación del contenido metálico inicial y final mediante balances metalúrgicos y análisis químico.	Cinética de disolución	Au y Ag disueltos en solución	Concentración en solución	mg/L
				Recuperación de Au	Au recuperado	% Recuperación Au	%
				Recuperación de Ag	Ag recuperado	% Recuperación Ag	%
				Ley inicial	Au y Ag en relave inicial	g/t	g/t
		Variable independiente	Siembra de Caesalpinia spinosa en relave lixiviado, en pozas experimentales de 2.5 m x 4 m, con riego semanal durante 6 meses y monitoreo periódico.	Ley final	Au y Ag en relave final	g/t	g/t
				Adaptación vegetal	Supervivencia	Plantas vivas	%
				Crecimiento	Altura de planta	Altura promedio	cm
				Biomasa	Peso raíz y parte aérea	Peso seco	g
Fitorremediación	Técnica de remediación ambiental que emplea la especie Caesalpinia spinosa para la reducción, acumulación o estabilización de metales pesados presentes en relaves reprocesados.	Variable independiente		Fitoacumulación	As, Pb en raíz	mg/Kg	mg/Kg
				Fitoacumulación	As, Pb en parte aérea	mg/Kg	mg/Kg
				Translocación	Factor de translocación (FT)	Parteo aérea / raíz	
				Bioconcentración	Factor de bioconcentración (FBC)	Planta / suelo	
				Concentración de As	As en suelo	mg/kg	mg/kg
				Concentración de Pb	Pb en suelo	mg/kg	mg/kg
Eficiencia de la remediación	Cambio en la concentración de metales pesados y parámetros físicoquímicos del relave después del proceso de fitorremediación.	Variable dependiente	Análisis comparativo del relave en tres etapas: inicial, reprocesado y post-fitorremediación, mediante ICP y evaluación según ECA Perú.	Reducción de metales	% reducción respecto al inicial	% reducción	%
				Conductividad eléctrica	CE del relave	µS/cm	µS/cm
				pH del relave	Variación de pH	Δ pH	
				Cumplimiento normativo	Comparación con ECA	Cumple / No cumple	

Nota: Resumen de la investigación.

3.3. Unidad de Análisis

3.3.1. Ubicación Geográfica

La zona de estudio se encuentra ubicada en el fundo Laytaruma de esta minera en el Departamento de Ayacucho, provincia de Sancos, distrito de Lucanas ($15^{\circ}24'59.90''$ de latitud sur, $74^{\circ}18'4.67''$ de longitud oeste y a 1044 msnm) (figura 13). Este depósito de relaves fue generado entre 1992 al 2004 que fue producto del procesamiento de minerales auríferos en aquella época.



Figura 13

Mecanismos de fitoestabilización y fitoextracción que ocurren a lo largo del sistema suelo–raíz–tallo en las plantas

Nota: Google Earth Pro (2023)

El levantamiento topográfico se llevó a cabo siguiendo un cronograma de trabajo planificado y utilizando información de imágenes satelitales, lo que proporcionó datos técnicos que sirvieron como soporte para los trazados y complementaron el levantamiento establecido.

Asimismo, esta relavera está a 18.8 km del pueblo de Jaqui (figura 14) y se encuentra limitada según la Tabla 11.

Tabla 11*Límites de la relavera en estudio*

Punto cardinal	Ubicación
Norte	Minera Sotrami
Sur	Montañas de Convento
Este	Camino a Chulbe
Oeste	Acceso a Pueblo de Jaqui

Nota: Ubicación en base a los puntos cardinales.**Figura 14***Límites de la relavera en estudio**Nota:* Google Earth Pro (2023)

3.3.2. Levantamiento Topográfico

El levantamiento topográfico de la relavera se realizó utilizando los puntos geodésicos proporcionados por esta minera, aplicando la metodología de estación libre y medición radial con una estación total con las siguientes especificaciones:

- Alcance de 1 000 m sin prisma
- Precisión de 2 mm + 2 ppm en cualquier superficie
- Velocidad de medición extremadamente rápida (1 segundo)
- Precisión de 1 mm + 1.5 ppm con prisma
- Puntero láser y sistema de medición coaxial

Se emplearon como apoyo los puntos de control GPS-A y GPS-B, estableciendo la estación libre con GPS-A como primer punto y GPS-B como segundo. Se levantaron en campo todos los detalles del terreno natural y de la relavera antigua, ajustando los datos a una escala 1:1. El levantamiento se realizó mediante medición radial, asegurando que los errores de margen de la estación fueran inferiores a 2 mm, tanto en planimetría como en altimetría.

Toda la información recolectada se procesó mediante software especializado, generando triangulaciones con ángulos, distancias y niveles necesarios para elaborar los planos. Los resultados se representaron en dibujos vectorizados utilizando AutoCAD Civil 3D, con archivos en unidades métricas. El levantamiento planimétrico se efectuó cumpliendo los límites de precisión indicados en la Tabla 12.

Tabla 12

Topografía mediante estación total en modo libre

Descripción	Factor de escala 1 en 1		
	X = Este	Y = Norte	Z = Cota
GPS – A	574501.621	8295678.216	1059.076
GPS – B	575238.406	8295511.499	1084.105
Estación libre (Trisección)			
Tolerancia planimetría	0.002 m	0.001 m	
Tolerancia altimétrica		0.0008 m	

Nota: A una escala 1 en 1.

3.3.3. Determinación del Volumen de la Relavera

3.3.3.1. Etapa de Campo.

Se registraron ángulos internos horizontales y ángulos verticales utilizando una Estación Total Leica con precisión de un segundo, tomando lecturas de los prismas ubicados en cada vértice de la relavera antigua.

Las longitudes de los lados se midieron con el distanciómetro de la Estación Total, con una exactitud de 0,001 m. Adicionalmente, se realizó un levantamiento taquimétrico para obtener los detalles del terreno natural y los restos de la relavera en estudio.

Para el control vertical, se ejecutó una nivelación geométrica, colocando estratégicamente los puntos de control P1 y P2, ambos referenciados con mini prismas de constante -17,5 mm.

3.3.3.2. *Etapas de Poscampo.*

Para establecer pendientes se utilizó la Estación Total en modo Tribach, permitiendo obtener posiciones precisas y niveles de error mínimos. Se tomaron lecturas repetidas y en modo fino, promediando los resultados en intervalos de 2,5 segundos por visada. Los rayos infrarrojos de onda corta, viajando a la velocidad de la luz, proporcionaron gran precisión en los desniveles calculados a partir de los puntos fijos del Tribach.

El perímetro de la berma de la relavera se determinó mediante fórmulas conocidas y el ajuste de la poligonal por vectorización en el programa Global Mapper. Este método garantiza un cierre lineal y angular preciso, cumpliendo con los términos de referencia, y permite evitar los cálculos manuales gracias al uso de equipos digitales en topografía.



Figura 15

Polígono de la berma

Nota: Google Earth Pro (2023)

a) Puntos topográficos

Estos puntos se registraron como nodos topográficos con el propósito de construir las curvas de nivel (Figura 16).

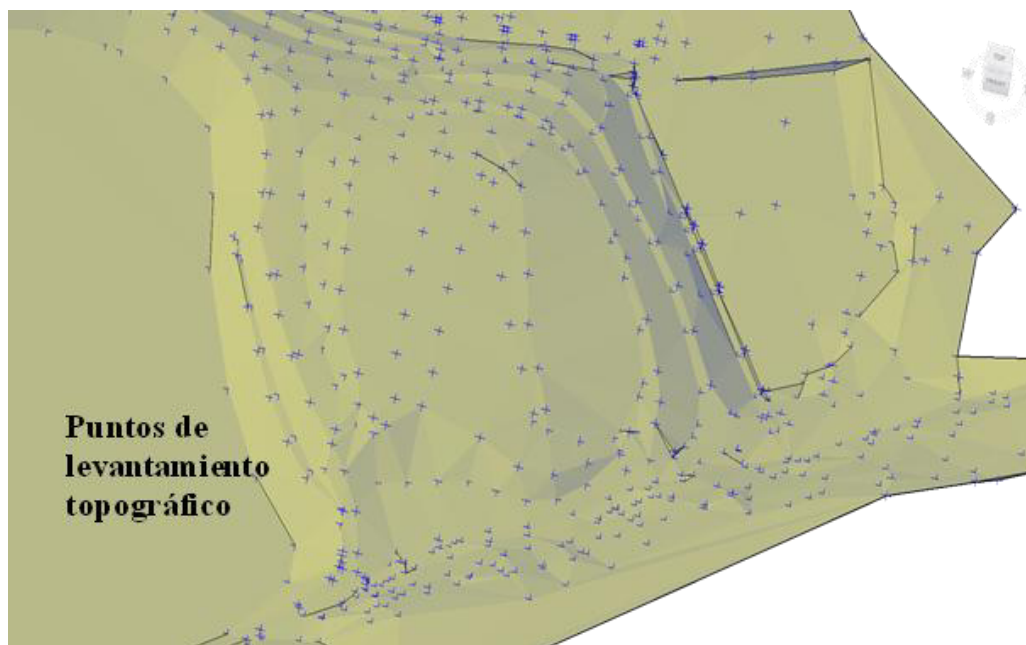


Figura 16

Puntos de levantamiento topográfico

Nota: Realizado en AutoCAD.

Se empleó una Estación Total para su localización en el terreno, respaldando estos puntos con coordenadas y cotas obtenidas a partir de las estaciones de control utilizadas en los levantamientos previamente mencionados.

Luego de las etapas de campo y poscampo, se obtuvieron los siguientes resultados en las coordenadas de los vértices más importantes (figura 17); llegando obtener la característica de la relavera en estudio y hacer los cálculos de columnas con el terreno actual levantado.

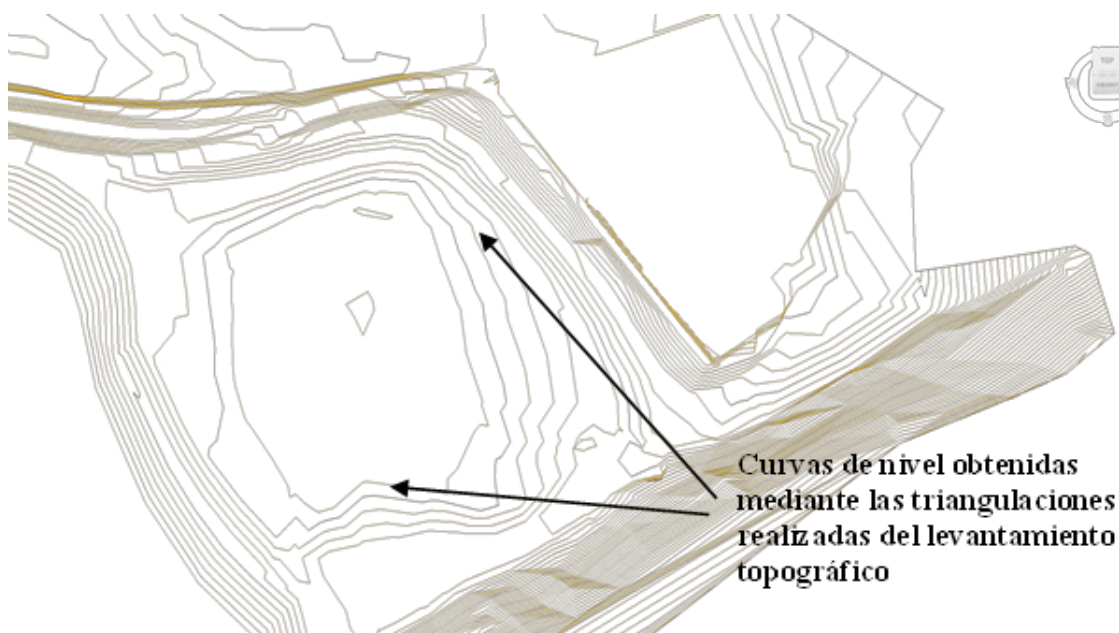


Figura 17

Curvas de nivel de la relavera en estudio

Nota: Realizado en AutoCAD.

b) Elaboración de planos

Para la realización de los planos topográficos se empleó el software AutoCAD Civil 3D 2018, que permite generar planos con curvas de nivel. Finalmente, se presenta un cuadro resumen con los planos obtenidos del levantamiento topográfico de la relavera en análisis.

Tabla 13

Planos topográficos

	Planos topográficos	Código de Plano	Escala
1	Plano levantamiento topográfico	PL-01	1/500
2	Plano de cortes	PL-02	1/500
3	Plano de sección 1	SEC-01	1/500
4	Plano de sección 2	SEC-02	1/500

Nota: Los planos topográficos según código y escala (Anexo 1).

3.3.3.3. Resultados del Estudio Topográfico

Finalmente, acabado el levantamiento topográfico de la relavera antigua de esta minera, determinamos con los datos obtenidos un volumen 190 348.11 m³.

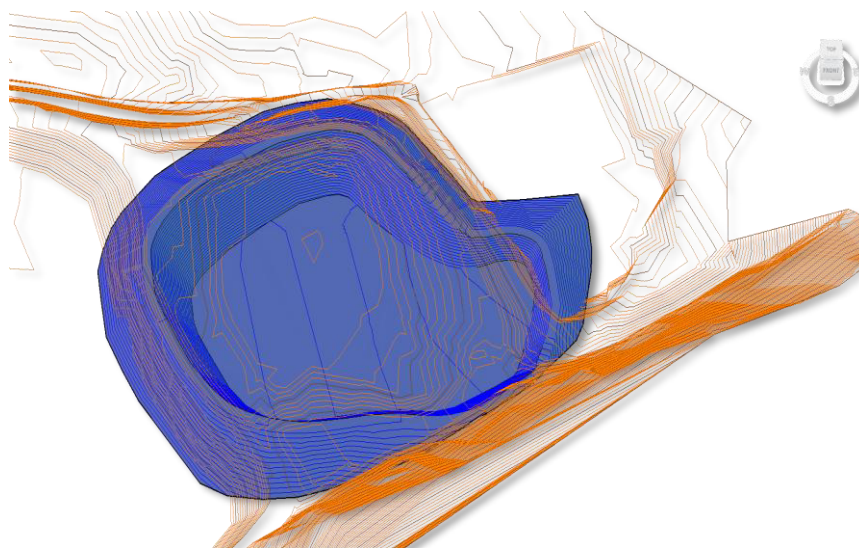


Figura 18

Volumen de la relavera de 190,348.11 m³

Nota: Realizado en AutoCAD.

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población

La población de estudio estuvo constituida por el total del relave depositado en la cancha de relaves ubicada en la zona de estudio.

De acuerdo con el levantamiento topográfico realizado, se determinó un volumen total de 190 348.11 m³. Considerando una densidad aparente de 2.28 T/m³, se estimó una masa aproximada de 433 993.69 toneladas de relave depositado.

Esta totalidad del material constituye la población sobre la cual se evaluó el potencial de recuperación metalúrgica (Au–Ag) y la eficiencia de remediación ambiental (As–Pb).

3.4.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por 156 muestras obtenidas mediante sondajes sistemáticos, las cuales fueron empleadas para:

- Caracterización fisicoquímica
- Análisis químico por ICP
- Caracterización mineralógica (sección delgada y pulida)
- Ensayos metalúrgicos
- Ensayos de fitorremediación

Para los análisis de recuperación de valores se elaboró un compósito representativo del relave, obtenido a partir de la homogenización de las muestras recolectadas.

Las características fisicoquímicas del compósito se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14

Características fisicoquímicas del relave

Parámetro	Valor
pH Natural	8.20
% CN	21 ppm
% Humedad	4.70
% - Malla 200	80 %
Gravedad específica	2.66

Nota: Parámetro operativos

La Tabla 14 resume las características fisicoquímicas del relave. El pH Natural es 8.20, indicando una ligera alcalinidad. Se detectó un % CN residual de 21 ppm y un % Humedad del 4.70%. El % - Malla 200 es 78.2%, lo que significa que la mayoría de las partículas son finas. Finalmente, la Gravedad específica del material es 2.66.

Los resultados del análisis químico por triplicado mediante ICP-Masa se muestran en la Tabla 15.

Los análisis químicos ICP de la muestra de relave por triplicado del compósito se representan en la Tabla 15, detallando la concentración de varios elementos en miligramos por kilogramo. Además de los resultados directos, la tabla incluye datos estadísticos para cada elemento, como el coeficiente de variación, que refleja la uniformidad de la muestra analizada.

Tabla 15*Análisis químico del compuesto de relave*

Parámetro		Resultados					Estadísticos		
Metales Totales ICP-Masa	Límites de Detección	Unidad	N1	N2	N3	Media	Mínimo	Máximo	Coef. Variación
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	4260	4200	4225	4228.33	4200	4260	0.007
Antimonio (Sb)	0.04	mg/Kg	25.23	24.88	24.51	24.87	24.51	25.23	0.014
Arsénico (As)	0.02	mg/Kg	192	199	197	196.00	192	199	0.018
Bario (Ba)	0.04	mg/Kg	71.21	70.55	69.12	70.29	69.12	71.21	0.015
Berilio (Be)	0.01	mg/Kg	0.48	0.46	0.39	0.44	0.39	0.48	0.107
Bismuto (Bi)	0.05	mg/Kg	25.48	26.80	25.13	25.80	25.13	26.8	0.034
Boro (B)	1	mg/Kg	3.15	3.28	3.12	3.18	3.12	3.28	0.027
Cadmio (Cd)	0.02	mg/Kg	1.50	2.10	1.90	1.83	1.5	2.1	0.167
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	11126	11109	11138	11124.33	11109	11138	0.001
Cobalto (Co)	0.02	mg/Kg	7.11	6.90	8.50	7.50	6.9	8.5	0.116
Cobre (Cu)	0.02	mg/Kg	129	126	130	128.33	126	130	0.016
Cromo (Cr)	0.2	mg/Kg	39	45	42	42.00	39	45	0.071
Estaño (Sn)	0.025	mg/Kg	3.31	3.48	3.59	3.46	3.31	3.59	0.041
Estroncio (Sr)	0.045	mg/Kg	36.4	35.7	35.6	35.90	35.6	36.4	0.012
Fosforo (P)	1	mg/Kg	580	591	602	591.00	580	602	0.019
Hierro (Fe)	0.5	mg/Kg	41950	42150	42550	42216.67	41950	42550	0.007
Litio (Li)	0.025	mg/Kg	1.97	2.05	2.14	2.05	1.97	2.14	0.041
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	3695	3609	3595	3633.00	3595	3695	0.015
Manganeso (Mn)	0.03	mg/Kg	2025	2018	2022	2021.67	2018	2025	0.002
Mercurio (Hg)	0.03	mg/Kg	3.24	3.96	2.98	3.39	2.98	3.96	0.15
Molibdeno (Mo)	0.02	mg/Kg	15.1	19.8	17.6	17.47	15	19.8	0.138
Níquel (Ni)	0.1	mg/Kg	89	84	87	86.67	84	89	0.029
Plata (Ag)	0.02	mg/Kg	31.56	30.23	33.49	31.76	30.23	33.49	0.052
Plomo (Pb)	0.02	mg/Kg	997	1102	1131	1076.67	997	1131	0.065
Potasio (K)	10	mg/Kg	1288	1297	1291	1292.00	1288	1297	0.004
Selenio (Se)	0.03	mg/Kg	2.80	2.90	2.50	2.73	2.5	2.9	0.076
Silicio (Si)	1	mg/Kg	1.20	1.80	2.40	1.80	1.2	2.4	0.333
Sodio (Na)	2	mg/Kg	1801	1788	1796	1795.00	1788	1801	0.004
Talio (Ta)	0.02	mg/Kg	0.33	0.25	0.29	0.29	0.25	0.33	0.138
Telurio (Te)	0.05	mg/Kg	19	25	22	22.00	19	25	0.136
Titanio (Ti)	0.05	mg/Kg	41	48	43	44.00	41	48	0.082
Uranio (U)	0.005	mg/Kg	3.25	3.60	3.45	3.43	3.25	3.6	0.051
Vanadio (V)	0.02	mg/Kg	91	92	99	94.00	91	99	0.046
Wolframio (W)	0.05	mg/Kg	21	19	22	20.67	19	22	0.074
Zinc (Zn)	0.02	mg/Kg	368	355	342	355.00	342	368	0.037

Nota: La unidad empleada es miligramos por kilogramo

Para la etapa de fitorremediación se emplearon las muestras superficiales del relave.



Figura 19

Muestreo del compuesto de relave

Nota: Foto capturada de las labores.

3.4.3. Tipo de Muestreo

El muestreo se realizó siguiendo como referencia la Guía para el Muestreo de Suelos Contaminados del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), la cual establece criterios para áreas de forma regular.

No obstante, con la finalidad de obtener mayor representatividad espacial y vertical del depósito, se implementó un muestreo sistemático en malla regular.

Diseño del muestreo:

- Se estableció una malla imaginaria con separación de 10 metros.
- Se ejecutaron 32 sondajes distribuidos uniformemente.
- Profundidad promedio: 10 metros.

- En cada sondaje se extrajo una muestra cada 3 metros, obteniéndose 5 niveles por sondaje.
- En los puntos 1, 3, 7 y 13 se alcanzaron hasta 12 metros debido a la pendiente del terreno.
- Total de muestras obtenidas: 156 muestras.

Las muestras fueron consolidadas por niveles para análisis químico y mineralógico.

3.4.3.1. Características Mineralógica del Relave.

Se hizo un estudio mineralógico para determinar el contenido de especies de la muestra, este fue realizado sobre dos secciones, una sección pulida y la otra sección delgada; sobre las cuales se dan a continuación los resultados:

3.4.3.1.1. Análisis en Sección Delgada.

Los minerales transparentes determinados en la sección delgada son los que a continuación se dan en forma porcentual (tabla 19 y figura 20).

La Tabla 16 muestra los minerales transparentes identificados en la sección delgada. El feldespato (plagioclasa) es el más abundante con un 33.41%. Otros componentes significativos son los opacos (metálicos), la sericita y el cuarzo. En menor proporción, se identificaron biotita, calcita y hornblenda.

Tabla 16

Minerales encontrados en la sección delgada

Minerales	Fórmulas	Porcentajes
Feldespato (Plagioclasa)	(Na, Ca) (Si, Al) ₃ O ₈	33.41
Opacos (Metálicos)		20.58
Sericita (Moscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	19.22
Cuarzo	SiO ₂	12.62
Biotita	K (Mg, Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂	8.93
Calcita	CaCO ₃	5.05
Hornblenda	Ca ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ (Al,Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₂	0.19
Total		100.00

Nota: Realizado por BIZALAB S.A.C.

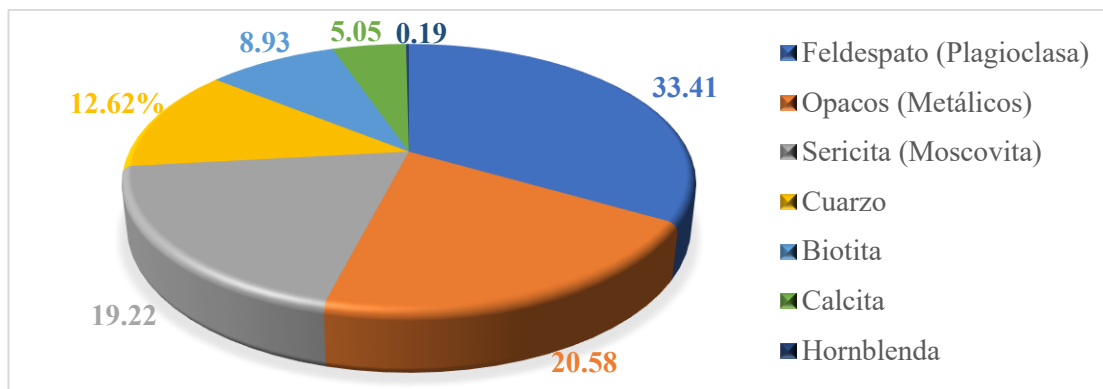


Figura 20

Porcentaje de minerales encontrados en la sección delgada (%)

Nota: Gráfico circular del porcentaje de las especies.

3.4.3.1.2. Análisis en Sección Pulida.

Los minerales opacos que se han determinado en esta muestra son los siguientes (tabla 17):

Tabla 17

Minerales encontrados en la sección pulida

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Electrum	(Au,Ag)	El
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp
Covelita	CuS	Cv
Esfalerita	(Zn,Fe)S	Ef
Pirita	FeS ₂	Py
Arsenopirita	FeAsS	Apy
Pirrotita	Fe _{1-x} S	Po
Marcasita	FeS ₂	Mc
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Mt
Hematita	Fe ₂ O ₃	Hm
Goethita	FeO.OH	Gt
Rutilo	TiO ₂	Rt
Rejalgar	As ₄ S ₄	Rjg
Gangas		GGs

Nota: Realizado por BIZALAB S.A.C.

3.4.3.1.3. Distribución Elemental en los Minerales Observados.

Los elementos que integran los minerales observados se distribuyen del modo siguiente:

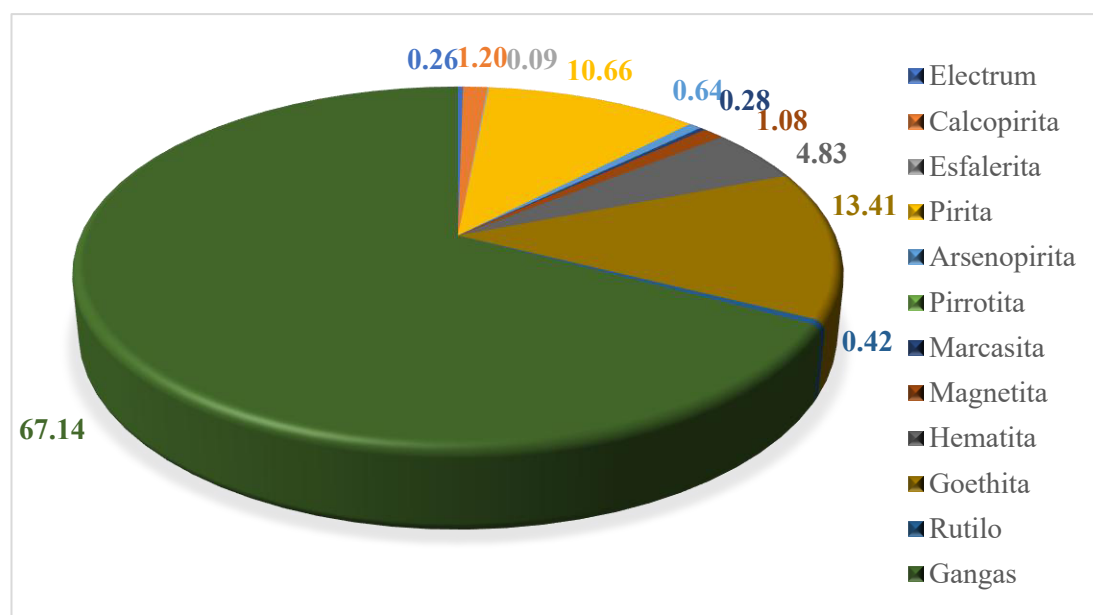
- Minerales auríferos: El electrum es el mineral de oro que ha sido observado.
- Minerales de Plata: El electrum es el único mineral de plata observado.
- Minerales cupríferos: Los minerales de cobre que han sido observados son la calcopirita y la covelita.
- Minerales zincíferos: La esfalerita es el único mineral de zinc que ha sido observado.
- Minerales ferríferos: Los minerales ferríferos son la pirita, arsenopirita, marcasita, magnetita, hematita y goethita.
- Minerales arseníferos: Los minerales que contienen arsénico son la arsenopirita y el rejalgar.
- Mineral titanífero: El rutilo es el mineral de titanio.
- Minerales cianicidas: Los minerales cianicidas en esta muestra son la calcopirita, esfalerita, pirita, arsenopirita, pirrotita y marcasita; además de éstos están la covelita y el rejalgar; estos dos últimos minerales se hallan en el orden de trazas.

3.4.3.1.4. Distribución Volumétrica Porcentual

Los minerales que se detallan a continuación corresponden a los considerados en el análisis modal, presentándose su distribución en porcentaje (ver Tabla 18 y Figura 21):

Tabla 18*Distribución volumétrica porcentual*

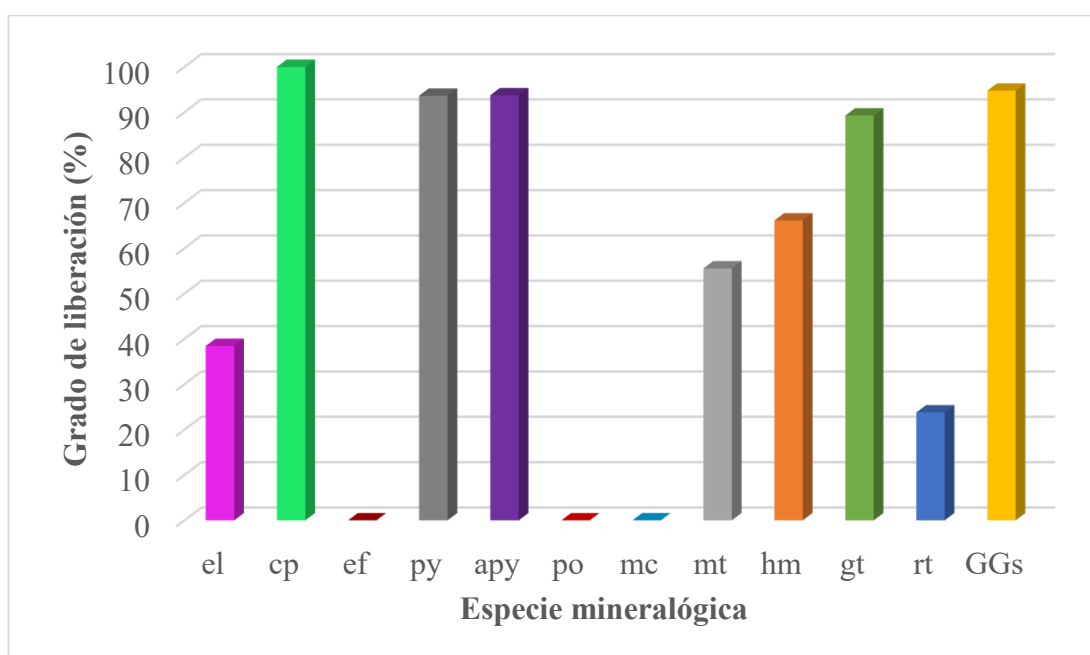
Minerales	Volumen porcentual (%)
Electrum	0.26
Calcopirita	1.20
Esfalerita	0.09
Pirita	10.66
Arsenopirita	0.64
Pirrotita	Trz
Marcasita	0.28
Magnetita	1.08
Hematita	4.83
Goethita	13.41
Rutilo	0.42
Gangas	67.14
TOTAL	100.00

Nota: Realizado por BIZALAB S.A.C.**Figura 21***Distribución volumétrica de las especies mineralógicas (%)**Nota:* Gráfico circular de la distribución volumétrica de las especies.**3.4.3.1.5. Grado de Liberación.**

Los minerales incluidos en el análisis modal muestran sus grados de liberación expresados en porcentaje, tal como se indica en la Tabla 19 y la Figura 22.

Tabla 19*Grado de liberación de los minerales en la muestra de relave*

Minerales	Grado de liberación (%)
Electrum	38.46
Calcopirita	100.00
Esfalerita	0.00
Pirita	93.64
Arsenopirita	93.75
Pirrotita	0.00
Marcasita	0.00
Magnetita	55.56
Hematita	66.12
Goethita	89.29
Rutilo	23.81
Gangas	94.75

Nota: Realizado por BIZALAB S.A.C.**Figura 22***Grado de liberación de las especies mineralógicas**Nota:* Gráfico de barras del grado de liberación de las especies

3.4.3.1.6. Interpretación de los Grados de Liberación de los Minerales que han Intervenido en el Análisis Modal.

A partir de las dos tablas anteriores, se puede realizar la siguiente interpretación sobre los minerales analizados en el estudio modal (Tablas 20 y 21):

- Electrum: representa el 0,26 % del volumen total de la muestra, de los cuales el 38,46 % está libre y el 61,54 % restante permanece entrelazado. La liberación incompleta se debe a los diferentes tipos de interconexiones geométricas presentes.
- Calcopirita: ocupa el 1,20 % del volumen total, encontrándose totalmente libre (100 %), lo que indica que todas las partículas de este mineral analizadas están completamente liberadas.
- Esfalerita: constituye el 0,09 % del volumen de la muestra, pero ninguna partícula está libre (0 %), permaneciendo el 100 % entrelazado debido a sus interconexiones geométricas.
- Pirita: representa el 10,66 % del volumen total, con un 93,64 % libre y un 6,36 % entrelazado, siendo los entrelazamientos geométricos la causa de la liberación parcial.
- Arsenopirita: ocupa el 0,64 %, con un 93,75 % libre y 6,25 % entrelazado, por las mismas razones geométricas de entrelazamiento.
- Pirrotita: se encuentra en trazas, generalmente incluida en cristales de pirita, por lo que su grado de liberación es nulo.
- Marcasita: representa el 0,28 % del volumen total, con un 0 % libre y 100 % entrelazado debido a su configuración geométrica.
- Magnetita: ocupa el 1,08 %, con un 55,56 % libre y un 44,44 % entrelazado, condicionado por los tipos de interconexiones.
- Argentita: constituye el 0,16 %, con un 83,33 % libre y 16,67 % entrelazado, afectado por las conexiones geométricas.

- Hematita: representa el 4,83 %, con un 66,12 % libre y 33,88 % entrelazado.
- Goethita: ocupa el 13,41 %, con un 89,29 % libre y 10,71 % entrelazado.
- Rutilo: constituye el 0,42 %, con un 23,81 % libre y 76,19 % entrelazado; los detalles de los tipos de entrelazamiento se encuentran en la Tabla 25, mostrando las dificultades de liberación de este mineral.
- Gangas: ocupa el 67,14 % del volumen total, con un 94,25 % libre y 5,75 % entrelazado, siendo las interconexiones geométricas responsables de la liberación parcial.

En general, la Tabla 20 indica que el 91,02 % de las partículas analizadas están libres; sin embargo, según la Tabla 21, los minerales económicamente relevantes restantes permanecen fuertemente entrelazados con otros, lo que dificulta su liberación completa.

Tabla 20*Volúmenes y grados de liberación de la muestra de relave*

MINERALES			ELECTRUM		CALCOPIRITA		ESFALERITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		PIRROTITA		MARCASITA		MAGNETITA		HEMATITA		GOETHITA		RUTILO		GANGAS				
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V			
Total de Partículas Libres			912		1		12		0		100		6		0		0		6		32		120		1		634		
% Volumen Partículas libres				91.02		0		1		0		10		1		0		0		1		3		12		0		63	
TOT.PARTICULAS ENTRELAZADAS	NUMERO PARTICUL.	VOLUMEN PORCENTUAL	ELECTRUM		CALCOPIRITA		ESFALERITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		PIRROTITA		MAGNETITA		MAGNETITA		HEMATITA		GOETHITA		RUTILO		GANGAS				
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V			
el-gt	3	0.30	1.60	0.16																	1.40	0.14							
ef-GGs	1	0.10					0.90	0.09																	0.10	0.01			
py-po	1	0.10							0.99	0.10				0.01	0.00														
py-mc	8	0.80							5.20	0.52						2.80	0.28												
py-GGs	8	0.80							0.60	0.06															7.40	0.74			
apy-gt	1	0.10									0.40	0.04									0.60	0.06							
mt-hm	8	0.80															4.80	0.48	3.20	0.32									
hm-gt	20	2.00																	11.60	1.16	8.40	0.84							
hm-GGs	8	0.80																	1.60	0.16					6.40	0.64			
gt-GGs	20	2.00																			4.00	0.40			16.00	1.60			
rt-GGs	12	1.20																					3.20	0.32	8.80	0.88			
TOTAL ENTREL.	90	8.98	1.60	0.16	0.00	0.00	0.90	0.09	6.79	0.68	0.40	0.04	0.01	0.00	2.80	0.28	4.80	0.48	16.40	1.64	14.40	1.44	3.20	0.32	38.70	3.86			
TOT.LIB+ENLZ	1002	100.00	2.60		12.00		0.90		106.79		6.40		0.01		2.80		10.80		48.40		134.40		4.20		672.70				
TOT.VOL.PORCENTUAL		100.00		0.26		1.20		0.09		10.66		0.64		0.00		0.28		1.08		4.83		13.41		0.42		67.14			
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			38.46		100.00		0.00		93.64		93.75		0.00		0.00		55.56		66.12		89.29		23.81		94.25				
Símbolos:			N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																										
			%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																										

Nota: Realizado por BIZALAB S.A.C.

Tabla 21

Tipos geométricos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa del relave

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc. (%)	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		912	91.02	
el-gt	2aI	3	0.30	Muy difícil a imposible
ef-GGs	1bII	1	0.10	Moderadamente fácil
py-po	1eI	1	0.10	Muy difícil a imposible
py-mc	1aII	4	0.40	Fácil
	3bI	4	0.40	Imposible
py-GGs	1eI	4	0.40	Muy difícil a imposible
	1eII	4	0.40	Muy difícil a imposible
apy-gt	2aI	1	0.10	Muy difícil a imposible
mt-hm	2bIII	4	0.40	Muy difícil
	3cII	4	0.40	Muy difícil a imposible
hm-gt	1bII	4	0.40	Moderadamente fácil
	1bIV	4	0.40	Moderadamente fácil
	3dII	8	0.80	Muy difícil a imposible
	4cII	4	0.40	Muy difícil a imposible
hm-GGs	1dII	8	0.80	Imposible
gt-GGs	1dII	4	0.40	Imposible
	1eI	8	0.80	Muy difícil a imposible
	1eII	4	0.40	Muy difícil a imposible
	3dII	4	0.40	Muy difícil a imposible
py-el-gn-GGs	1aIII	4	0.40	Fácil
	1bIV	4	0.40	Moderadamente fácil
	1dII	4	0.40	Imposible
TOTAL		1002	100.00	

Nota: Realizado por BIZALAB S.A.C.

3.4.3.1.7. Fotomicrografías

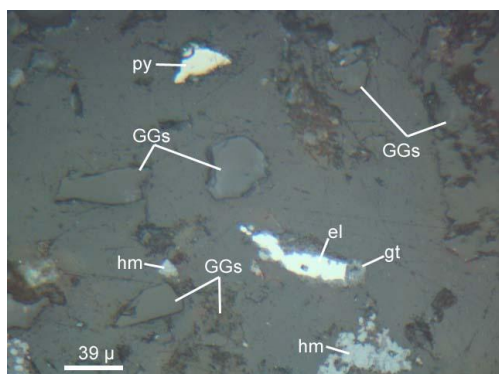


Figura 23

Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt); adyacente están las partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs)

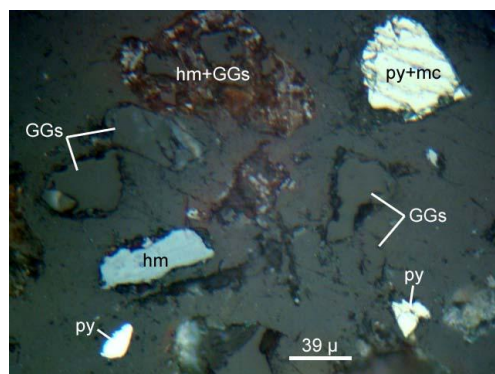


Figura 24

Partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de pirita con la marcasita (py+mc) y de hematita con la ganga (hm+GGs)

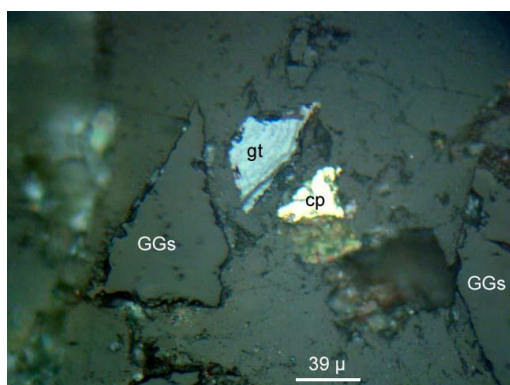


Figura 25

Partículas libres de calcopirita 8cp, de goethita (gt) y de gangas (GGs)

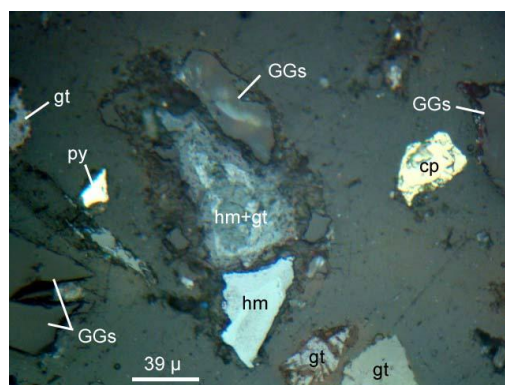


Figura 26

Partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de pirita con la marcasita (py+mc) y de hematita con la ganga (hm+GGs).

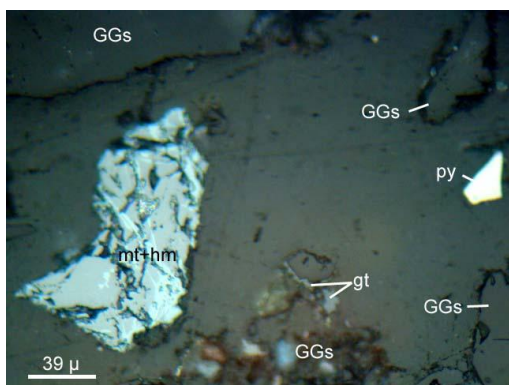


Figura 27

Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de magnetita con la hematita (mt+hm) y de goethita (gt) con la ganga (GGs)

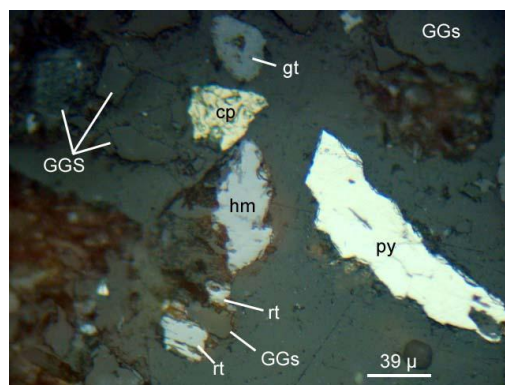


Figura 28

Partículas libres de calcopirita (cp), de pirita (py), de goethita (gt) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de hematita (hm) con la ganga (GGs) y del rutilo (rt) con la ganga (GGs)

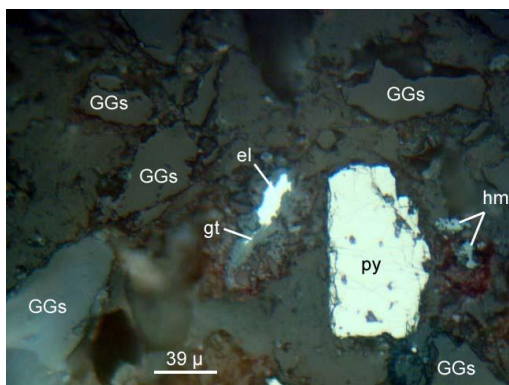


Figura 29

Partículas libres de pirita (pi) y de gangas (GGs); partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y partícula entrelazada de hematita (hm) con la ganga (GGs).

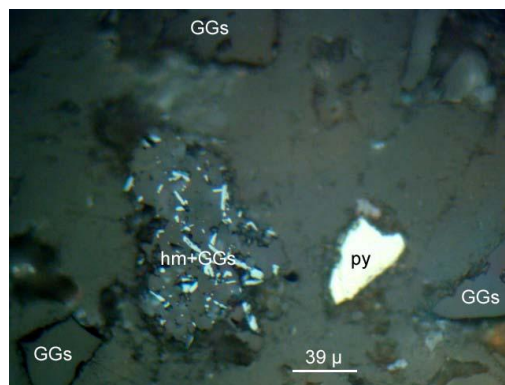


Figura 30

Partícula entrelazada hematita con la ganga (hm+GGs) y partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs)

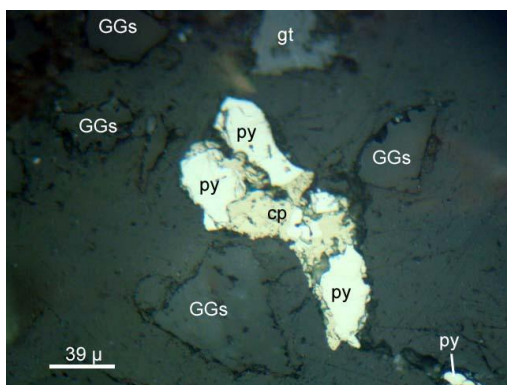


Figura 31

Partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la pirita (py) y partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs) 500X.

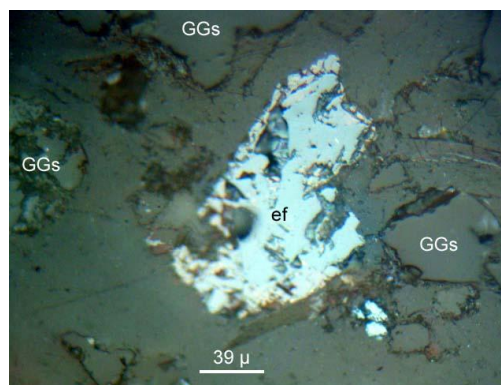


Figura 32

Partículas libres de esfalerita (ef) y de gangas (GGs) 500X.

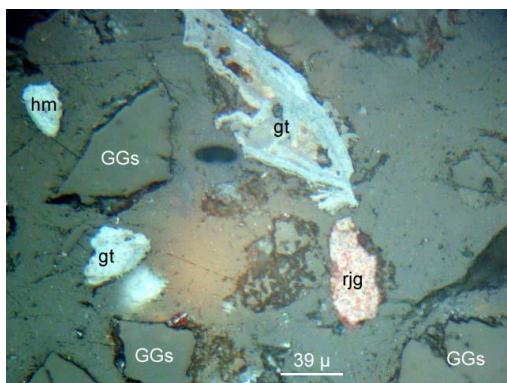


Figura 33

Partículas libres de hematita (hm), de gangas, de rejalgar (rjg), de goethita (gt) y de gangas (GGs)

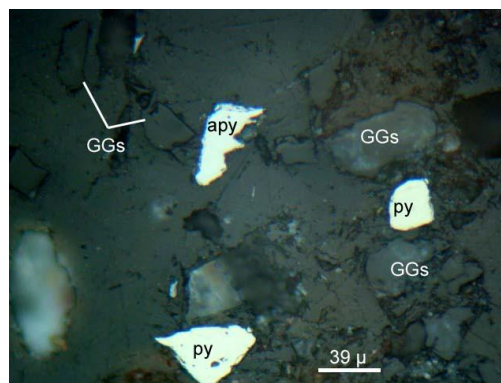


Figura 34

Partículas libres de esfalerita (ef) y de gangas (GGs)

Nota: Micrografías obtenidas a un aumento de 500X, reportado por BIZALAB S.A.C. en el análisis mineralógico.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En la presente investigación se emplearon técnicas experimentales y analíticas orientadas a obtener información confiable sobre el comportamiento metalúrgico del relave y la eficiencia del proceso de remediación. Estas técnicas permitieron recolectar datos relacionados con las variables de estudio: lixiviación con Sandioss, fitorremediación, recuperación de Au y Ag, y eficiencia de remediación.

Después de haber recopilado y analizado la información existente sobre las características del relave, se optó por desarrollar tres alternativas de reprocesamiento para recuperar los valores de oro y plata de la relavera en estudio. Las alternativas fueron:

- Lixiviación
- Flotación
- Concentración gravimétrica

Cabe señalar que hay distintas alternativas adicionales a las mencionadas para recuperar los valores de oro y plata, pero la mayoría usan químicos y lo que se quiere para este estudio es usar la tecnología más limpia ya que posteriormente se hará una remediación de los relaves tratados. La alternativa más recomendable es la concentración gravimétrica por solamente usar agua en su proceso.

3.5.1. Técnica de Investigación

Las principales técnicas utilizadas fueron:

- Experimentación metalúrgica, aplicada en las pruebas de lixiviación para evaluar la recuperación de oro y plata mediante el reactivo Sandioss.
- Análisis químico de laboratorio, empleado para determinar la concentración de metales en muestras de relave y material vegetal.
- Observación y registro experimental, utilizados durante el seguimiento del proceso de fitorremediación para evaluar la reducción de metales pesados en el relave.

3.5.2. Instrumentos de Investigación

Los instrumentos utilizados para la recolección y registro de los datos fueron:

- Protocolos de ensayos metalúrgicos para las pruebas de lixiviación.

- Equipos de análisis químico de laboratorio (ICP, absorción atómica u otros métodos equivalentes).
- Fichas de registro experimental para el control de variables operativas como pH, concentración del reactivo y tiempo de lixiviación.
- Formatos de registro para el análisis de concentraciones de metales en suelo y en tejidos vegetales durante el proceso de fitorremediación.

3.5.3. Procedimiento Metodológico y Trabajo de Campo

La presente investigación se desarrolló de manera secuencial en etapas de campo, laboratorio, experimentación de fitorremediación y proyección de escalamiento, con la finalidad de evaluar el retratamiento de relaves para la recuperación de Au y Ag, así como la aplicación de la fitorremediación como postratamiento ambiental. Esta organización metodológica guarda coherencia con el diseño experimental planteado para la lixiviación y con el diseño preexperimental longitudinal aplicado a la etapa de fitorremediación. Asimismo, se articula con la población y muestra definidas en la tesis, donde se considera un compósito representativo del relave, submuestras para pruebas metalúrgicas y dos pozas experimentales de 2.5 m × 4 m para la fase de remediación.

3.5.3.1. Etapa de Campo.

En la etapa de campo se realizó el reconocimiento integral del área de estudio correspondiente a la relavera objeto de investigación, con el propósito de identificar sus características físicas, topográficas y operativas. Esta fase comprendió la ubicación geográfica del depósito, la delimitación del área de trabajo, la inspección visual de la disposición del relave y la identificación de las zonas representativas para el muestreo. Asimismo, se efectuó el levantamiento topográfico del depósito, lo que permitió establecer sus límites, configuración superficial y volumen estimado, constituyéndose en la base para la planificación del muestreo y la evaluación del potencial de retratamiento. Esta etapa es coherente con los apartados ya desarrollados en la tesis sobre ubicación geográfica, levantamiento topográfico y determinación del volumen de la relavera.

Posteriormente, se ejecutó el muestreo del relave con criterio representativo, a partir de la toma de muestras por niveles en distintos puntos del depósito, con la finalidad de conformar un compósito de relave. Las muestras obtenidas fueron codificadas, acondicionadas y trasladadas al laboratorio para su preparación y análisis. De acuerdo con la tesis, la muestra estuvo conformada por un compósito representativo del relave, del cual se tomaron submuestras de 1000 g para ensayos de lixiviación y flotación, y 3000 g para pruebas de concentración gravimétrica. Esta fase permitió disponer del material necesario para la caracterización mineralógica, química y metalúrgica, así como para las pruebas posteriores de fitorremediación.

3.5.3.2. *Etapas de Laboratorio.*

La etapa de laboratorio comprendió la preparación, caracterización y evaluación experimental de las muestras de relave obtenidas en campo. Inicialmente, las muestras fueron sometidas a procesos de secado, homogenización, cuarteo y reducción de tamaño, con la finalidad de asegurar su representatividad y uniformidad para los ensayos. Luego se efectuó la caracterización fisicoquímica, química y mineralógica del material, incluyendo el análisis granulométrico, el análisis químico del compósito y el estudio mineralógico mediante secciones delgadas y pulidas, distribución elemental, distribución volumétrica porcentual y grado de liberación. Esta información permitió identificar la naturaleza del relave y sustentar técnicamente la selección de las pruebas metalúrgicas aplicadas.

Con la muestra preparada se desarrollaron ensayos metalúrgicos a escala experimental para evaluar alternativas de recuperación de oro y plata. En la etapa de lixiviación se aplicó un diseño factorial en botella, variando concentración y tiempo, conforme a las condiciones de operación y al diseño experimental señalados en la tesis. Asimismo, se realizaron pruebas comparativas de flotación y concentración gravimétrica, con el propósito de establecer la alternativa más eficiente para la recuperación de Au y Ag del relave. Los resultados obtenidos en esta etapa constituyeron la base técnica para la comparación entre métodos de retratamiento y para la posterior proyección del proceso a nivel planta piloto.

3.5.3.3. *Etapa Experimental de Fitorremediación.*

La etapa experimental de fitorremediación se desarrolló empleando relave previamente reprocesado, con el propósito de evaluar la remediación del material mediante el establecimiento de especies vegetales adaptadas a las condiciones del sustrato. Para ello, se dispusieron dos pozas experimentales de 2.5 m × 4 m, tal como se consigna en la matriz de consistencia y en la descripción metodológica de la tesis. En dichas unidades experimentales se realizó el acondicionamiento del terreno, el riego de lixiviación de sales y la incorporación de enmiendas, principalmente guano y yeso agrícola, a fin de mejorar las condiciones del sustrato para el establecimiento vegetal. Posteriormente, se efectuó la siembra de especies vegetales seleccionadas de la zona, evaluándose su comportamiento sobre el relave tratado.

Durante un periodo de seis meses se realizó el monitoreo del crecimiento, adaptación y supervivencia de las especies sembradas. Al término de esta etapa, se efectuó el muestreo aleatorio estratificado por triplicado de suelo, raíz y parte aérea, y las muestras fueron acondicionadas, rotuladas y enviadas para análisis químico mediante ICP. Esta fase permitió evaluar la eficiencia de la fitoextracción, considerando la disminución de metales pesados en el relave y la capacidad de acumulación de la especie vegetal seleccionada. Además, se registró el crecimiento vegetal y la biomasa generada durante el periodo de monitoreo, en concordancia con lo indicado en la matriz metodológica de la tesis.

3.5.3.4. *Criterios de Escalamiento y Tamaño de Planta Piloto.*

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, la investigación se proyectó hacia una aplicación a nivel planta piloto, tal como se señala en la justificación práctica del estudio. En ese sentido, el escalamiento se planteó como criterio de validación técnico-económica del proceso propuesto, orientado a recuperar valores metálicos remanentes del relave y, al mismo tiempo, disminuir su carga contaminante para facilitar el postratamiento ambiental.

Para la proyección del proceso se consideró una capacidad de tratamiento de **500 t/día** de relave, con remoción mecánica del material y alimentación a una tolva de finos. El circuito propuesto contempla un molino de 7'×9' y tres tanques

acondicionadores de 18'×18', constituyéndose estos equipos en la base del tamaño de planta considerado para la validación del proceso a nivel piloto. La inclusión de este criterio de escalamiento en la metodología permite precisar que la investigación no solo se desarrolló a nivel experimental de laboratorio y campo, sino que además se planteó con proyección operativa hacia una aplicación en planta piloto.

3.6. Análisis e Interpretación de la Información

Los datos obtenidos en los ensayos experimentales fueron organizados y procesados mediante análisis estadístico descriptivo. Se calcularon porcentajes de recuperación de oro y plata en las pruebas de lixiviación, así como la reducción de las concentraciones de arsénico y plomo en el relave durante el proceso de fitorremediación.

Posteriormente, los resultados fueron interpretados mediante comparaciones entre las condiciones experimentales evaluadas, con el fin de determinar la eficiencia del reactivo Sandioss en la recuperación de metales preciosos y la efectividad de la fitorremediación en la reducción de metales pesados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de Resultados

4.1.1. Estudio Metalúrgico del Relave

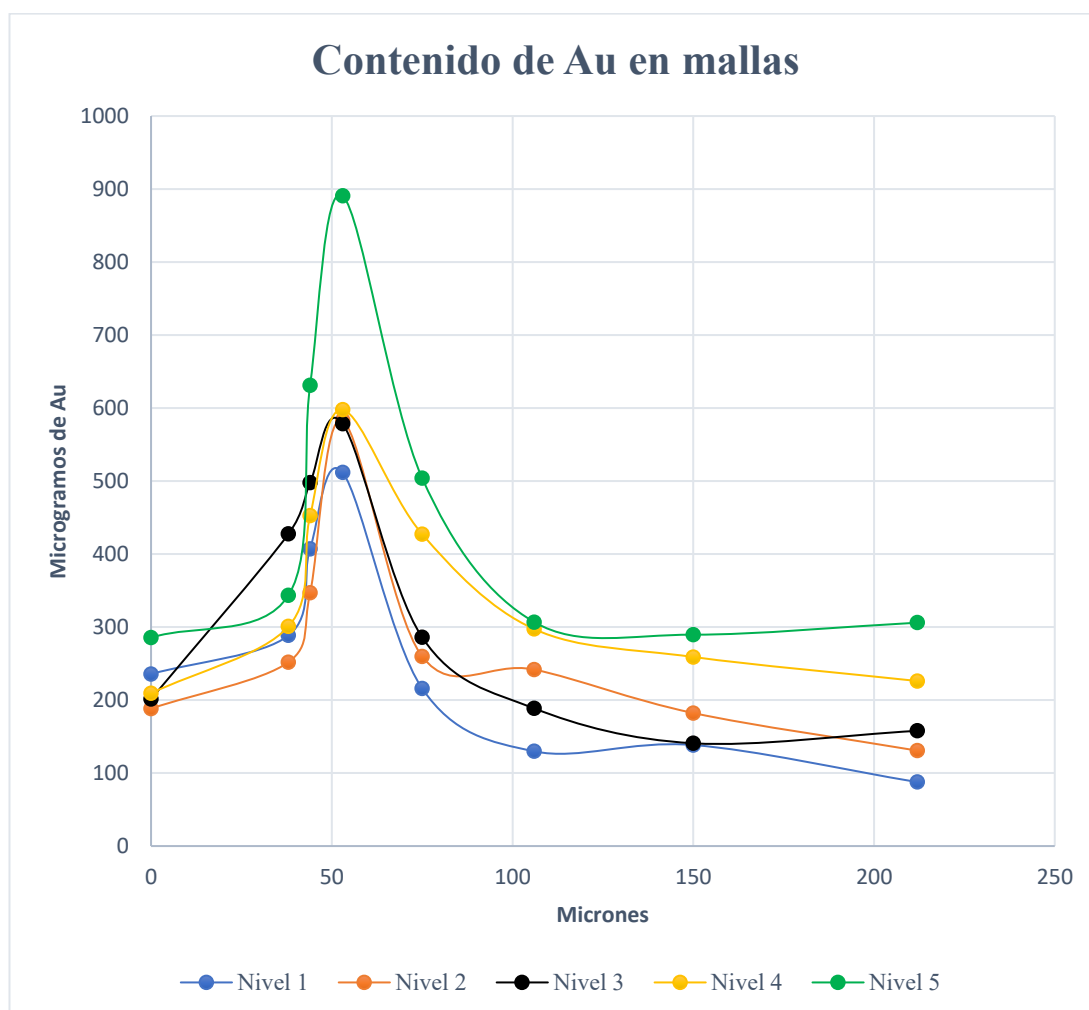
4.1.2. Análisis Granulométrico

Se hizo el análisis granulométrico del relave a 7 mallas y se determinaron leyes de oro y plata correspondientes a cada nivel. Se quiere determinar en qué fracción de malla se encuentra la mayor cantidad de oro y plata para tener más claro el proceso de retratamiento y mejorar la eficiencia en la recuperación de estos valores.

Los análisis se llevaron a cabo en las instalaciones de la empresa, incluyendo los ensayos químicos. La toma de muestras utilizada para estos análisis se detalla en la Tabla 22, indicando la distancia desde la superficie de la relavera y la cantidad de muestras recolectadas en cada nivel (Anexo 2).

Tabla 22*Descripción de la toma de muestra por niveles*

Nivel	Distancia de la superficie de la relavera	Muestras por nivel
1	3	32
2	6	32
3	9	32
4	12	32
5	15	28

Nota: Distancia de la superficie según el nivel.**Figura 35***Contenido de Au según la granulometría**Nota:* Comparación de las curvas según el nivel gráfica obtenida en Microsoft Excel (Anexo 3).

En la figura 35 se logra apreciar que en mallas finas se encuentra gran parte del oro, por lo que un proceso gravimétrico no es lo recomendable.

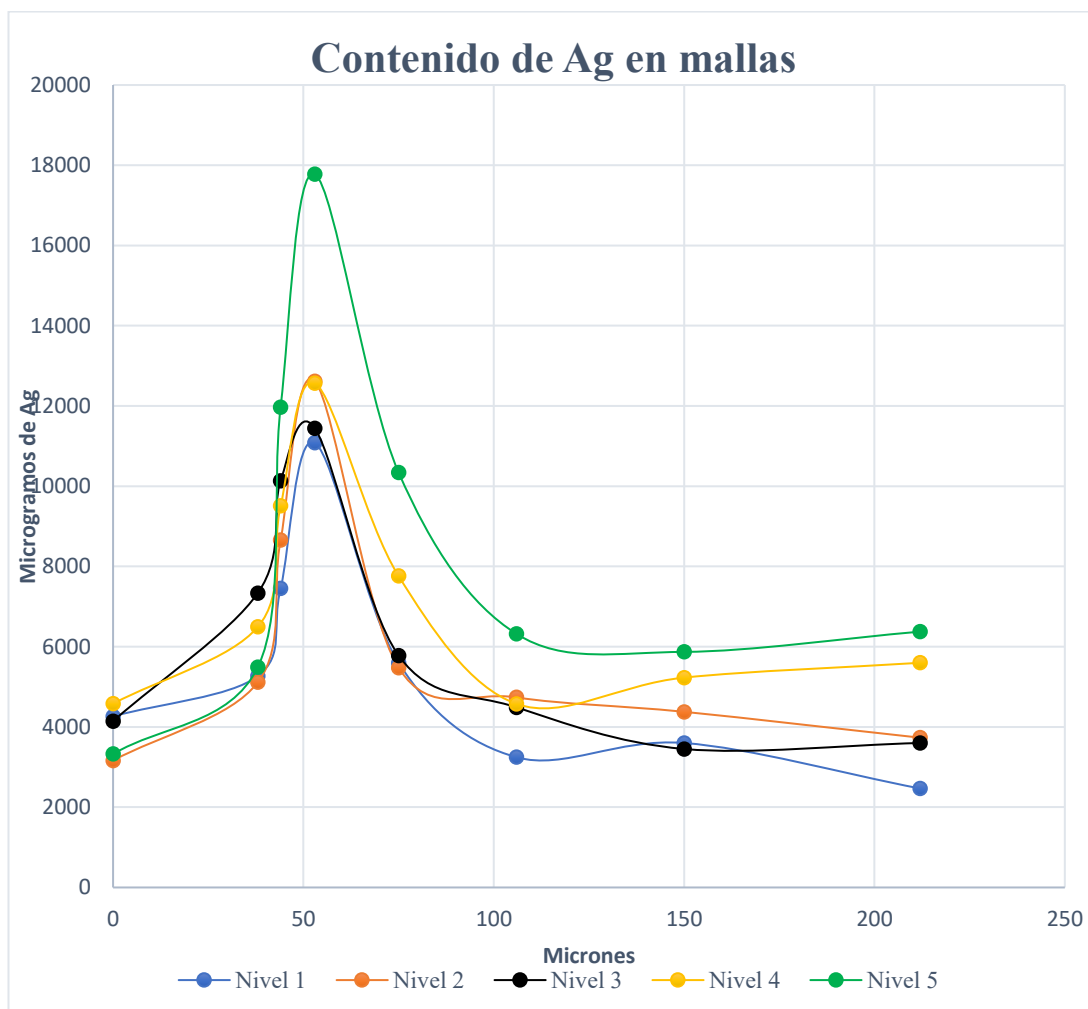


Figura 36

Contenido de Ag según la granulometría

Nota: Comparación de las curvas según el nivel, gráfica obtenida en Microsoft Excel (Anexo 3).

La figura 36, con respecto a la plata, tiene la misma tendencia del comportamiento del oro.

En ambas figuras, se puede apreciar que la mayor cantidad de oro y plata se encuentra en la m270, por lo que se atenuarán las pruebas sobre esa malla.

Para la obtención de las muestras, se hizo un compósito de los 5 niveles y se obtuvo la muestra representativa por cuarteo, y de las muestras obtenidas, tres fueron destinadas para las pruebas metalúrgicas y la restante fue para análisis químico, cuyo resultado está consignado en la Tabla 23, la cual representa el análisis de cabeza para las pruebas metalúrgicas.

Tabla 23

Leyes de cabeza de la muestra

Muestra	Leyes	
	Au (g/t)	Ag (g/t)
Relave	1.72	31.76

Nota: Las unidades empleadas son onzas por toneladas cortas y gramos por toneladas métricas.

4.1.3. Lixiviación

a) Procedimiento experimental

La muestra fue previamente secada, pulverizada a 80% - Malla 200 y homogenizada. Después fue acondicionada con reactivos para la prueba de agitación en botella. Se usó un kilo de muestra seca, la cual fue acondicionada con cianuro de sodio (7.5 gr.) e hidróxido de sodio (4 gr.).

b) Condiciones de operación

La Tabla 24 muestra las condiciones operativas para la lixiviación, dichos parámetros son considerados en base a la experiencia operativa y a las referencias bibliográficas revisadas.

Tabla 24

Condiciones de operación de la lixiviación

Parámetro	Valor
Muestra	1 kg (80% - Malla 200)
Relación L/S	2.5/1
pH de operación	12
Tiempo	72 horas

Nota: Parámetros operativos

c) Controles efectuados

La Tabla 25 describe el control de los parámetros, mostrando que el pH sea 12, con un cianuro libre del 0.28%. La recuperación final fue 66.65% (Au) y 40.67% (Ag) a las de 72 horas.

Tabla 25

Control en el tiempo de los parámetros

Tiempo (h)	PLS (mL)	pH	CN libre %	CN adicion. (g)	CN compen. (g)	NaOH adicion. (g)	PLS Au (g/m ³)	PLS Ag (g/m ³)	Rec. Au (%)	Rec. Ag (%)
0	2500	12	0.00	7.50	0.3	4	0	0	0	0
0.5	2490	12	0.24	1.43	0.3	0	0.068	0.730	9.81	5.01
4	2480	12	0.29	0.37	0.3	0	0.152	1.321	21.84	9.03
8	2470	12	0.30	0.00	0.3	0	0.215	2.312	30.82	16.27
16	2460	12	0.27	0.86	0.3	0	0.244	3.045	35.05	20.76
24	2450	12	0.27	0.73	0.3	0	0.314	3.812	44.99	25.95
48	2440	12	0.28	0.41	0.3	0	0.407	4.785	59.16	33.11
72	2430	12	0.28	0.00	0.3	0	0.462	5.941	66.65	40.67

Nota: La recuperación se representada en porcentaje.

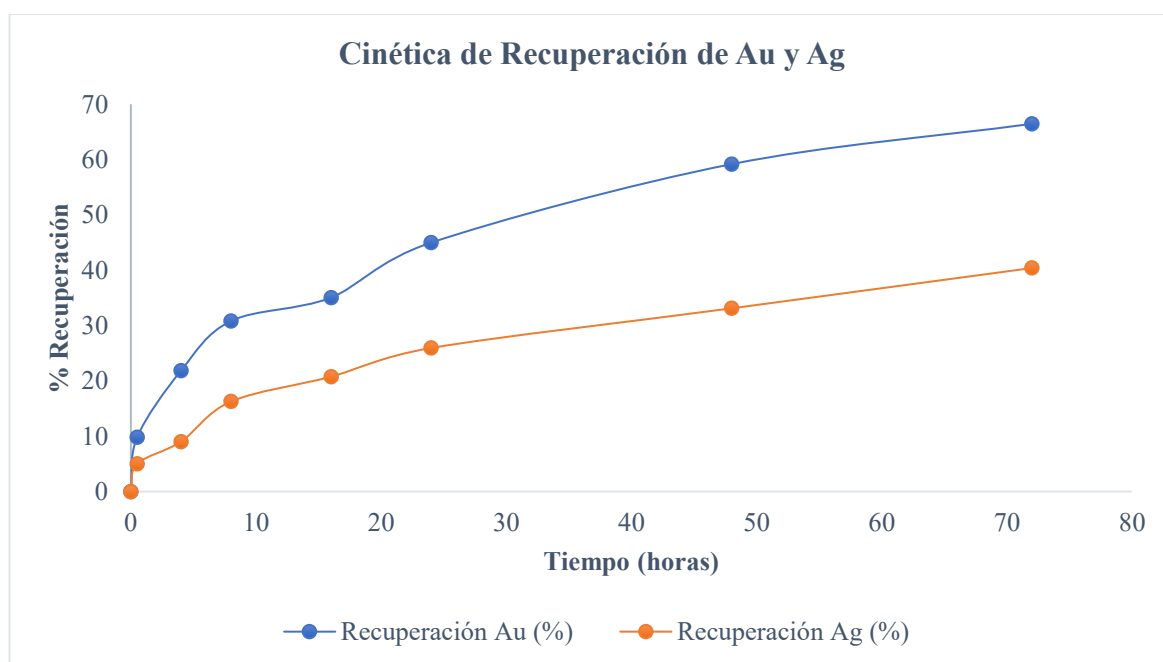


Figura 37

Cinética de la recuperación de oro y plata

Nota: Presentación de las gráficas de la cinética de extracción, gráfica obtenida en Microsfot Excel.

d) Consumo de reactivos

La Tabla 26 detalla el consumo de reactivos: se usaron 11.31 g de NaCN. El gasto efectivo fue de 4.51 g, teniendo un consumo de 4.51 kg/t de muestra y para el NaOH fue de 4 kg/t.

Tabla 26

Control del reactivo

Consumo		Valor
Cianuro de sodio añadido		11.31 g
Concentración final	0.280% en 2.43 litros es equivalente a 6.80 g	
Gasto efectivo		4.51 g
Consumo de cianuro por peso	4.51 g / 1 kg = 4.51 kg/t de muestra	
Consumo de hidróxido de sodio	4 g / 1 kg = 4 kg/t de muestra	

Nota: Cálculo del consumo de reactivo

Tabla 27

Balance Metalúrgico de Au y Ag - Cianuración por agitación en Botella en 72 horas

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1 kg						
Solución rica	2.43 l	0.51	5.76	1.239	13.99	66.65	40.67
Relave	1 kg	0.62	20.42	0.62	20.42	33.35	59.33
Cabeza calculada	1 kg	1.85	34.41	1.85	34.41	100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

El porcentaje de recuperación de Au es 66.65 % y de Ag es 40.67 %.

4.1.3.1. Pruebas Metalúrgicas de Lixiviación con Reactivos Ecológicos.

Se elaboró un plan de pruebas metalúrgicas de lixiviación en botella con reactivo ecológico Sandioss. Este agente lixivante intenta sustituir al cianuro y genera menos impacto ambiental.

a. Lixiviación en botella con Sandioss

Se realizaron ensayos metalúrgicos de cinética de lixiviación en botella utilizando Sandioss para la muestra de relave. Se diseñó un experimento factorial con

dos niveles, dos factores y dos réplicas, con el objetivo de analizar cómo influyen el tiempo y la concentración de Sandioss en la recuperación de oro y plata.

La Tabla 28 detalla las condiciones de operación para la lixiviación de relaves con sandios, especificando que se utilizó una muestra de 1000 gramos con una granulometría de 80% -200 Malla. La relación L/S (Líquido/Sólido) fue de 2.5/1 y el pH se mantuvo en 10.5. Por su parte, la Tabla 29 presenta un diseño factorial para este mismo proceso, variando el tiempo (12 y 24 horas) y la concentración (1000 y 3000 ppm) en diferentes corridas experimentales para evaluar el efecto de estas variables en la lixiviación. Así también, los balances metalúrgicos como respuesta del desarrollo de las pruebas experimentales se describen en las tablas 30 al 37.

Tabla 28

Condiciones de operación de lixiviación con sandioss para muestra de relave

Parámetro	Valor
Peso de mineral	1 kg
Relación L/S	2.5/1
Granulometría	80% - Malla 200
pH	10.5

Nota: Parámetros operativos

Tabla 29

Diseño factorial de la lixiviación con sandioss

Orden Est	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	Tiempo (h)	Concentración (ppm)
1	1	1	1	12	1000
2	2	1	1	24	1000
3	3	1	1	12	3000
4	4	1	1	24	3000
5	5	1	1	12	1000
6	6	1	1	24	1000
7	7	1	1	12	3000
8	8	1	1	24	3000

Nota: Diseño factorial en orden de las corridas.

Tabla 30

Prueba 1 de la lixiviación con Sandioss ($t = 12h$, Concentración de Sandioss = 1000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación(%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.22	8.12	0.55	20.3	41.35	65.11
Relave	1	0.78	10.88	0.78	10.88	58.65	34.89
Cabeza calculada	1	1.33	31.18			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 31

Prueba 2 de la lixiviación con Sandioss ($t = 24h$, Concentración de Sandioss = 1000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.25	12.01	0.625	30.025	46.47	78.73
Relave	1	0.72	8.11	0.72	8.11	53.53	21.27
Cabeza calculada	1	1.345	38.135			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 32

Prueba 3 de la lixiviación con sandioss ($t = 12h$, Concentración de Sandioss = 3000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación(%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.28	13.07	0.7	32.675	50.00	82.19
Relave	1	0.7	7.08	0.7	7.08	50.00	17.81
Cabeza calculada	1	1.4	39.755			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 33

Prueba 4 de la lixiviación con sandioss ($t = 24h$, Concentración de Sandioss = 3000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación(%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.3	13.17	0.75	32.925	52.08	83.01
Relave	1	0.69	6.74	0.69	6.74	47.92	16.99
Cabeza calculada	1	1.44	39.665			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 34

Prueba 5 de la lixiviación con Sandioss ($t = 12h$, Concentración de Sandioss = 1000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación(%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.23	7.98	0.575	19.95	43.40	63.96
Relave	1	0.75	11.24	0.75	11.24	56.60	36.04
Cabeza calculada	1	1.325	31.19			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 35

Prueba 6 de la lixiviación con Sandioss ($t = 24h$, Concentración de Sandioss = 1000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.25	11.95	0.625	29.875	47.17	79.13
Relave	1	0.7	7.88	0.7	7.88	52.83	20.87
Cabeza calculada	1	1.325	37.755			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 36

Prueba 7 de la lixiviación con Sandioss ($t = 12h$, Concentración de Sandioss = 3000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación(%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.27	12.94	0.675	32.35	49.82	83.16
Relave	1	0.68	6.55	0.68	6.55	50.18	16.84
Cabeza calculada	1	1.355	38.9			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Tabla 37

Prueba 8 de la lixiviación con Sandioss ($t = 24h$, Concentración de Sandioss = 3000ppm)

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación(%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.3	13.44	0.75	33.6	53.19	84.68
Relave	1	0.66	6.08	0.66	6.08	46.81	15.32
Cabeza calculada	1	1.41	39.68			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

b. Análisis de Varianza para la Recuperación de Oro

La Tabla 38 presenta el análisis de varianza (ANOVA) para la recuperación de oro, mostrando que el modelo es estadísticamente significativo con un alto porcentaje de contribución (97.50%). La Tabla 39 resume el modelo, indicando que el coeficiente de determinación (R^2) es del 97.50%, y el R^2 ajustado es del 95.63%, lo que sugiere que el modelo explica una gran parte de la variabilidad en la recuperación del oro. Finalmente, la Tabla 40 muestra los coeficientes de codificación, revelando que el tiempo y la concentración tienen efectos significativos en la recuperación, mientras que la interacción entre ambas variables no es estadísticamente significativa. El valor T y el valor p confirman la relevancia de los factores principales.

Tabla 38*Análisis de varianza para la recuperación de oro*

Fuente	GL	SC Sec.	Contrib.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	116.295	97.50%	116.295	38.765	52.06	0.001
Lineal	2	114.816	96.26%	114.816	57.4079	77.1	0.001
Tiempo (h)	1	25.704	21.55%	25.704	25.7045	34.52	0.004
Concentración (ppm)	1	89.111	74.71%	89.111	89.1113	119.67	0
Interacciones de 2 términos	1	1.479	1.24%	1.479	1.4792	1.99	0.232
Tiempo (h)*Concentración (ppm)	1	1.479	1.24%	1.479	1.4792	1.99	0.232
Error	4	2.978	2.50%	2.978	0.7446		
Total	7	119.273	100.00%				

Nota: Análisis individual y mixto de las variables.**Tabla 39***Resumen del modelo para la recuperación de oro*

S	R-cuad.	R- cuad.(ajust.)	PRESS	R- cuad.(pred)	AICc	BIC
0.862917	97.50%	95.63%	11.914	90.01%	54.8	25.2

Nota: Datos estadísticos resaltantes.**Tabla 40***Coefficientes de codificación para la recuperación de oro*

Término	Efecto	Coef	EE coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante		47.935	0.305	(47.088; 48.782)	157.12	0	
Tiempo (h)	3.585	1.792	0.305	(0.945; 2.640)	5.88	0.004	1.00
Concentración (ppm)	6.675	3.337	0.305	(2.490; 4.185)	10.94	0	1.00
Tiempo (h)*Concentración (ppm)	-0.86	-0.43	0.305	(-1.277; 0.417)	-1.41	0.232	1.00

Nota: Análisis individual y mixto de las variables.

c. Ecuación de Regresión para la Recuperación de Oro en Unidades no Codificadas

Se propone un modelo matemático que describe la recuperación de oro en función de las variables independientes consideradas durante el proceso de lixiviación con Sandioss aplicado al relave analizado.

$$\text{Rec \%Au} = 33.30 + 0.442 \text{ Tiempo (h)} + 0.004628 \text{ Concentración (ppm)} - 0.000072 \text{ Tiempo (h)} * \text{Concentración (ppm)}$$

La Figura 38 muestra un diagrama de Pareto que indica que la concentración (B) y el tiempo (A) son los factores más influyentes en la recuperación de oro. La interacción entre ambos, AB, tiene un efecto mínimo y no es estadísticamente significativa.

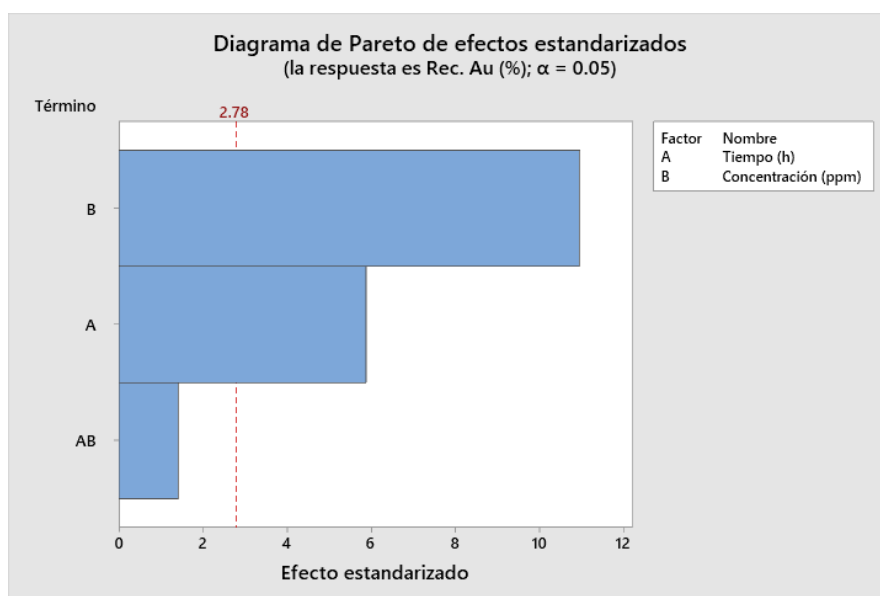


Figura 38

Pareto de efectos estandarizados para la recuperación de oro

Nota: Gráfica de barras de efecto estandarizado de las variables, gráfica obtenida en Minitab 19.

La Figura 39 muestra la gráfica normal de efectos estandarizados para la recuperación de oro. Los factores significativos son aquellos que se alejan de la línea roja, destacando el tiempo (A) y la concentración (B) como los más influyentes. La interacción entre ambos no es significativa, ya que se alinea con la línea central.

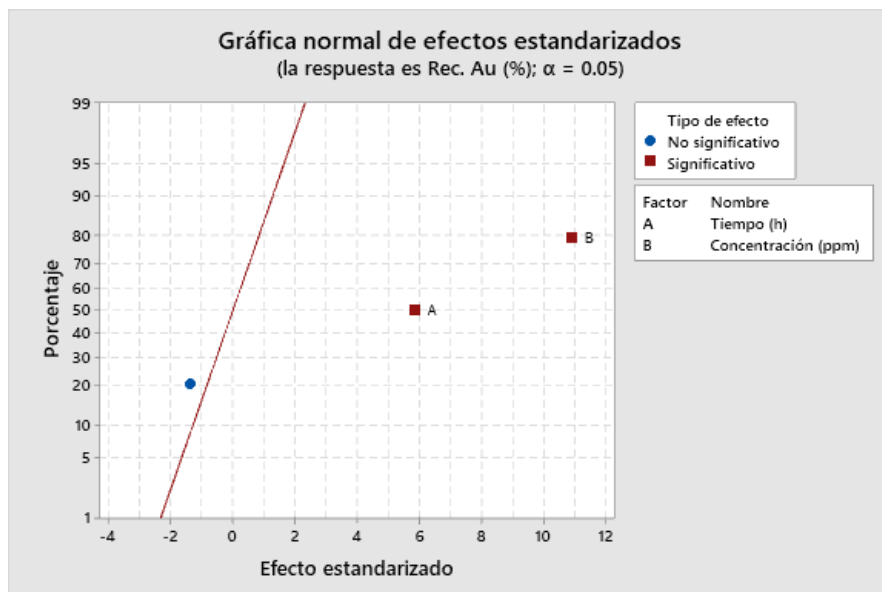


Figura 39

Gráfica normal de efecto estandarizados para la recuperación de oro

Nota: Gráfica con puntos de estandarizado de las variables, gráfica obtenida en Minitab 19.

d. Análisis de Varianza para la Recuperación de Plata

En la Tabla 41 se expone el análisis de varianza correspondiente a la recuperación de plata, mientras que en las Tablas 42 y 43 se presentan, respectivamente, los coeficientes de correlación y los coeficientes de codificación. El análisis de varianza y el resumen del modelo muestran una alta confiabilidad, con un R^2 ajustado del 99.04%. Los coeficientes de codificación indican que el tiempo, la concentración y su interacción son factores significativos en la recuperación de plata.

Tabla 41*Análisis de varianza para la recuperación de plata*

Fuente	GL	SC Sec.	Contrib.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	474.351	99.45%	474.351	158.117	242.68	0.000
Lineal	2	386.901	81.12%	386.901	193.451	296.91	0.000
Tiempo (h)	1	121.135	25.40%	121.135	121.135	185.92	0.000
Concentración (ppm)	1	265.767	55.72%	265.767	265.767	407.91	0.000
Interacciones de 2 términos	1	87.45	18.34%	87.45	87.45	134.22	0.000
Tiempo (h)*Concentración (ppm)	1	87.45	18.34%	87.45	87.45	134.22	0.000
Error	4	2.606	0.55%	2.606	0.652		
Total	7	476.958	100.00%				

Nota: Análisis individual y mixto de las variables.**Tabla 42***Resumen del modelo para la recuperación de plata*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.807179	99.45%	99.04%	10.4246	97.81%	53.73	24.13

Nota: Datos estadísticos resaltantes.**Tabla 43***Coefficientes de codificación para la recuperación de plata*

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	IC de 95%	Valor T	Valor p	FIV
Constante		77.496	0.285	(76.704; 78.289)	271.55	0.000	
Tiempo (h)	7.783	3.891	0.285	(3.099; 4.684)	13.64	0.000	1.00
Concentración (ppm)	11.527	5.764	0.285	(4.971; 6.556)	20.2	0.000	1.00
Tiempo (h)*Concentración (ppm)	-6.612	-3.306	0.285	(-4.099; - 2.514)	-11.59	0.000	1.00

Nota: Análisis individual y mixto de las variables.

e. Ecuación de Regresión para la Recuperación de Plata en Unidades no Codificadas

Se propone un modelo matemático que describe la recuperación de plata en función de las variables que intervienen en el proceso de lixiviación con Sandioss. La

influencia de los reactivos colectores se analiza mediante el diagrama de Pareto y la gráfica normal de efectos (figuras 40 y 41).

$$\text{Rec \%Ag} = 34.46 + 1.751 \text{ Tiempo (h)} + 0.015682 \text{ Concentración (ppm)} - 0.000551 \text{ Tiempo (h)*Concentración (ppm)}$$

La Figura 40 muestra el diagrama de Pareto para la recuperación de plata. La concentración (B) es el factor más influyente, seguido del tiempo (A) y su interacción (AB), que también resulta significativa. Esto indica que ambos factores y su combinación afectan el proceso.

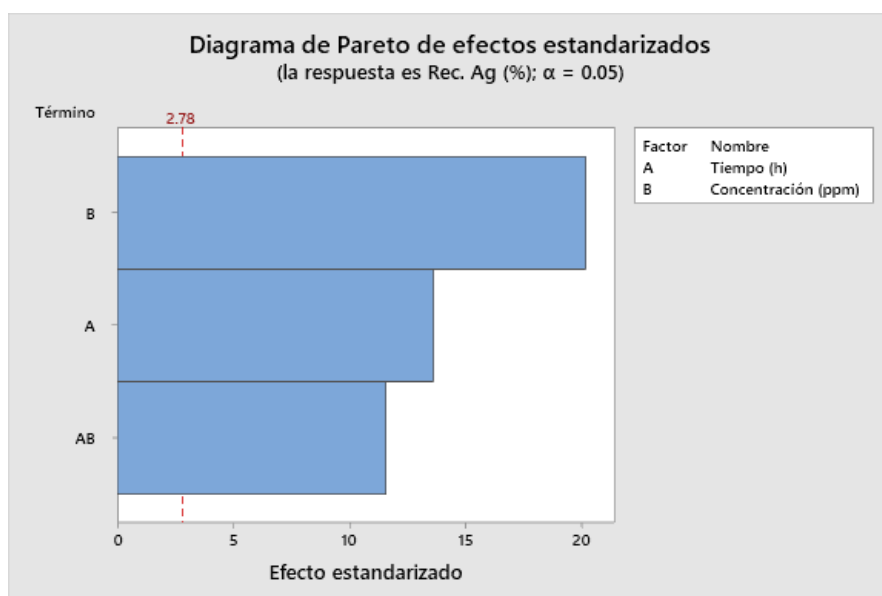


Figura 40

Pareto de efectos estandarizados para la recuperación de plata

Nota: Gráfica de barras de efecto estandarizado de las variables, gráfica obtenida en Minitab 19.

La Figura 41 es una gráfica normal de efectos estandarizados para la recuperación de plata. En el gráfico, los puntos que están lejos de la línea de referencia indican un efecto significativo. Se puede observar que la concentración (B), el tiempo (A) y la interacción entre ambos (AB) se encuentran alejados de esta línea, lo que indica que los tres son efectos significativos en la recuperación de la plata. Esto contrasta con el oro, para el cual la interacción no era significativa.

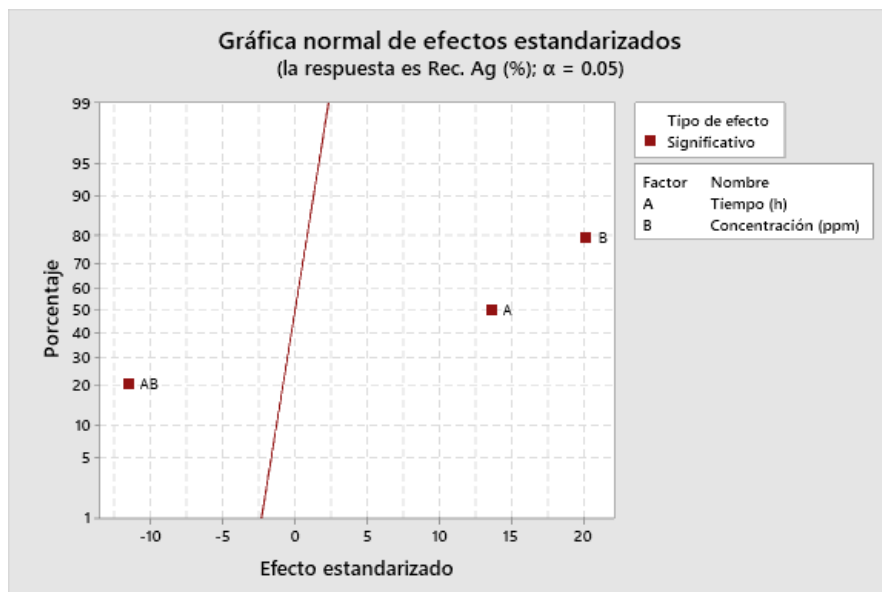


Figura 41

Gráfica normal de efecto estandarizados para la recuperación de plata

Nota: Gráfica con puntos de estandarizado de las variables, gráfica obtenida en Minitab 19.

f. Cinética de Lixiviación con Sandioss para recuperar Oro y Plata

Se estudió la cinética de disolución de oro y plata utilizando el reactivo Sandioss mediante ensayos en botella durante un período de 24 horas. Los resultados de estas pruebas metalúrgicas se presentan en las tablas 44, 45, 46 y 47, mientras que la figura 42 muestra la evolución de la disolución de oro y plata a lo largo del tiempo.

Tabla 44

Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 6 h

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.22	8.12	0.55	20.3	41.35	65.11
Relave	1	0.78	10.88	0.78	10.88	58.65	34.89
Cabeza calculada	1	1.33	31.18			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Consumo de Sandioss: 6.23 kg/t

Consumo de cal: 2.01 kg/t

Tabla 45

Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 12 h

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.25	10.01	0.63	25.03	46.47	75.52
Relave	1	0.72	8.11	0.72	8.11	53.53	24.48
Cabeza calculada	1	1.345	33.135			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Consumo de Sandioss: 7.42 kg/t

Consumo de cal: 2.55 kg/t

Tabla 46

Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 18 h

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.28	11.07	0.7	27.68	50.00	81.99
Relave	1	0.7	6.08	0.7	6.08	50.00	18.01
Cabeza calculada	1	1.4	33.755			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Consumo de Sandioss: 8.33 kg/t

Consumo de cal: 2.11 kg/t

Tabla 47

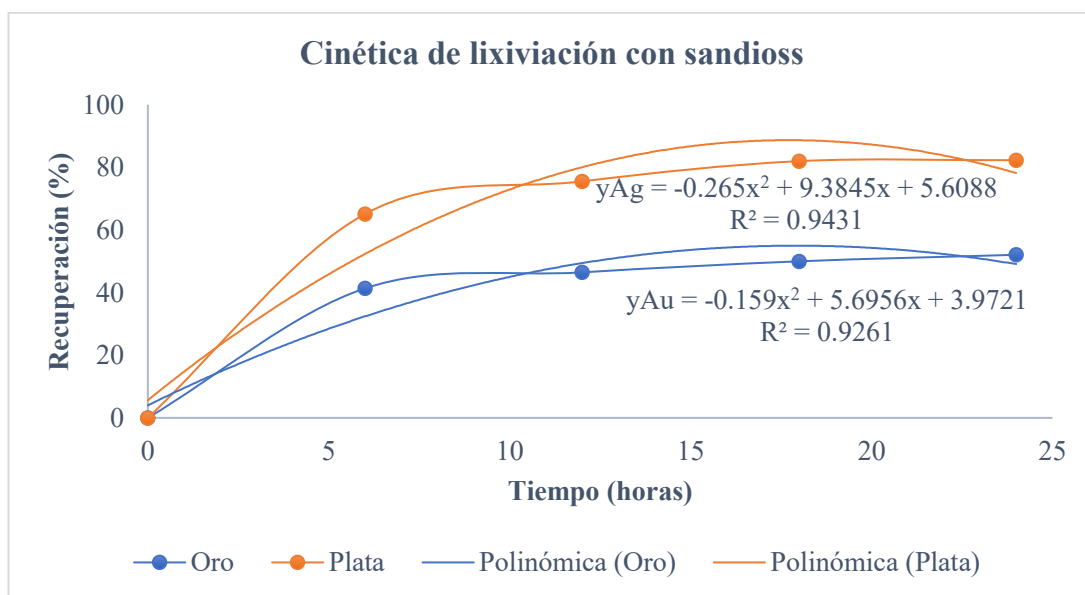
Resultado de Lixiviación con sandioss para un tiempo de 24 h

Productos	Peso / Volumen (kg/L)	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)	
		Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag
Cabeza ensayada	1					100.00	100.00
Solución rica	2.5	0.3	11.17	0.75	27.93	52.08	82.29
Relave	1	0.69	6.01	0.69	6.01	47.92	17.71
Cabeza calculada	1	1.44	33.935			100.00	100.00

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, kg/L: kilogramos por litro, %: porcentaje.

Consumo de Sandioss: 8.45 kg/t

Consumo de cal: 2.11 kg/t

**Figura 42**

Cinética de lixiviación con sandioss

Nota: Presentación de las gráficas de la cinética de extracción, gráfica obtenida en Microsoft Excel.

4.1.4. Flotación

Esta prueba tuvo como finalidad evaluar la recuperación de oro y plata en función de la granulometría del relave, mediante un diseño experimental factorial que analizó el efecto de los colectores AR-1208 y AR-1242.

La Tabla 48 muestra las condiciones operativas para la flotación de relaves, utilizando 1000 gramos de muestra con una granulometría de 80% - Malla 200. Se establecieron tiempos de acondicionamiento y flotación de 6 y 15 minutos, respectivamente. Se usaron reactivos como AR 1242, AR 1208, Z 11 y MIBC en cantidades específicas.

Tabla 48

Condiciones de operación para pruebas metalúrgicas de flotación

Parámetros	Valor
Peso de muestra	1000 g
% - Malla 200	80
pH	Natural
Tiempo de acondicionamiento	6 min
Tiempo de flotación	15 min
AR 1242	70 g/t
AR 1208	75 g/t
Z 11	30 g/t
MIBC	45 g/t

Nota: Parámetros de operación.

La Tabla 49 presenta un balance metalúrgico de la prueba de flotación. El concentrado, que pesaba 32.4 gramos, mostró una recuperación del 38.95% para el oro y 19.18% para la plata. El resto de los metales se encontró en el relave.

Tabla 49

Balance metalúrgico de la prueba de flotación

Componentes	Peso	% Peso	Leyes (g/t)		Contenido Fino		% Recuperación		Ratio
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
Cabeza	1000	100	2.26	41.76					
Concentrado	32.4	3.24	20.7	150.48	0.67	4.88	38.95	19.18	36.66
Medio	5.8	0.58	2.12	102.1	0.01	0.59	0.71	2.33	
Relave	961.8	96.18	1.08	20.75	1.04	19.96	60.33	78.49	
Cabeza Calculada			1.72	25.43	1.72	25.43	100.00	100.00	

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, %: porcentaje.

4.1.5. Concentración Gravimétrica

A partir de la muestra del compósito, se tuvo como variable el grado de liberación, por lo que se prepararon 4 muestras para la evaluación, se consideró usar granulometrías de 80, 85, 90 y 95% - 200 Malla, empleando un concentrador Falcon Icon.

La Tabla 50 muestra los parámetros de operación de la prueba de concentración centrífuga gravimétrica. Se trabajó con una muestra de 3000 gramos y una densidad de pulpa de 1380 g/L. La centrífuga funcionó con una presión de agua de 3 PSI, aplicando una fuerza centrífuga de 60 G y una velocidad de rotación de 1700 rpm.

Tabla 50

Condiciones de operación de la concentración centrífuga gravimétrica

Parámetro	Valor
Densidad de pulpa	1380 g/l
Presión de agua	3 PSI
Fuerza de gravedad	60 G's
Velocidad	1700 rpm
Peso de muestra	3000 g

Nota: Parámetros de operación.

Los resultados de las pruebas metalúrgicas se representan en los balances de las tablas 51, 52, 53 y 54 y la figura 43 representa un gráfico de barras que representa la recuperación en función al tamaño de partícula.

Tabla 51

Resultados de la Concentración gravimétrica a 80% - Malla 200

Componentes	Peso	%	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)		Ratio
			Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag	
Cabeza	3000	100							
Concentrado	82.6	2.75	20.48	350.12	56.39	964.00	36.47	28.84	36.32
Relave	2917.4	97.25	1.01	24.456	98.22	2378.26	71.16	71.16	
Cabeza calculada			1.55	33.42	154.61	3342.26			

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, %: porcentaje.

Tabla 52*Resultados de la Concentración gravimétrica a 85% - Malla 200*

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)		Ratio
			Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag	
Cabeza	3000	100							
Concentrado	80.6	2.69	31.05	468.4	83.42	1258.43	45.18	34.82	37.22
Relave	2919.4	97.31	1.04	24.21	101.21	2355.96	65.18	65.18	
Cabeza calculada			1.85	36.14	184.63	3614.39			

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, %: porcentaje.

Tabla 53*Resultados de la Concentración gravimétrica a 90% - Malla 200*

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)		Ratio
			Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag	
Cabeza	3000	100							
Concentrado	61.1	2.04	35.42	456.72	72.19	930.80	47.03	25.95	49.07
Relave	2938.9	97.96	0.83	27.11	81.31	2655.75	74.05	74.05	
Cabeza calculada			1.53	35.87	153.49	3586.55			

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, %: porcentaje.

Tabla 54*Resultados de la Concentración gravimétrica a 95% - Malla 200*

Componentes	Peso	% Peso	Ley		Contenido fino		Recuperación (%)		Ratio
			Au (g/t)	Ag (g/t)	Au	Ag	Au	Ag	
Cabeza	3000	100	2.26	41.76					
Concentrado	54.1	1.80	28.48	350.12	51.38	631.62	30.19	20.82	55.43
Relave	2945.9	98.20	1.21	24.456	118.82	2401.48	79.18	79.18	
Cabeza calculada			1.70	30.33	170.20	3033.10			

Nota: Las unidades de los datos son g: gramos, g/t: gramos por tonelada métrica, %: porcentaje.

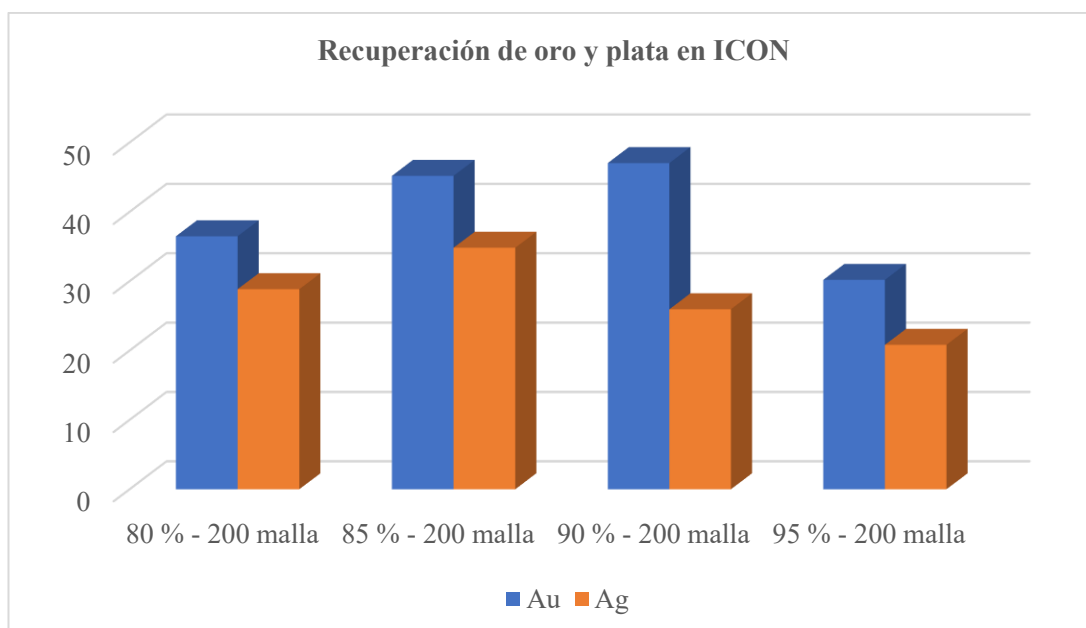


Figura 43

Recuperación de oro y plata a distintas granulometrías

Nota: Gráfica de barras comparativa de la recuperación, gráfica obtenida en Microsoft Excel.

4.1.6. Fitorremediación

4.1.6.1. Recolección y Selección de Especies Vegetales.

Hay diversas especies vegetales en la zona, por lo que una selección adecuada en la que se evalúan el reconocimiento del sitio es esencial para la colecta y selección de las especies vegetales.

Se aplicaron el Método de Muestreo Selectivo (CCME, 1993) y el Método de la Línea de Intercepción (ITR, 1999), los cuales se basan en seleccionar áreas que presenten diferencias representativas, evaluadas por el muestreador, considerando factores como cambios de color en el suelo y presencia o ausencia de vegetación. Durante el muestreo se registraron distintos ejemplares, tomando en cuenta la altitud, fecha de recolección, estado fenológico y características morfológicas relevantes para la taxonomía, cuyos datos fueron debidamente etiquetados y consignados en fichas.

- Las especies vegetales fueron recolectadas de las inmediaciones de la zona de estudio, se extrajeron cuidadosamente las plantas del suelo,

procurando no dañar las raíces y posteriormente separar el suelo de las raíces lavándose con agua (tabla 58).

Tabla 55

Plantas recolectadas para el estudio

Nombre de la Planta	Nombre científico	Presentación
Sábila	<i>Aloe barbadensis</i> Miller	
Tuna	<i>Opuntia ficus-indica</i>	
Casuarina	<i>Casuarina equisetifolia</i>	
Geranio	<i>Geranium phaeum</i>	
Tara	<i>Caesalpinia spinosa</i> (Molina)	
Planta hormiga	<i>Dischidia nummularia</i>	

Nota: Presentación fotográfica de las plantas, tomadas en la empresa.

4.1.6.2. Preparación de Terreno y Determinación de la Especie Vegetal Adecuada.

4.1.6.2.1. Análisis de Metales Totales por ICP.

Para acondicionar el terreno, se realizó la lixiviación con Sandioss de un volumen considerable del relave muestreado, seguido del filtrado de la pulpa con el

fin de obtener un relave apto para reprocesamiento. Una muestra representativa de relave reprocesado fue enviado al laboratorio para ensayar químicamente la concentración de metales, tal y como se describe en la tabla 56.

Tabla 56*ICP del relave reprocesado*

Parámetro			Resultados				Estadísticos		
Metales Totales ICP-Masa	Límites de Detección	Unidad	N1	N2	N3	Media	Mínimo	Máximo	Coef. Variación
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	4250	4168	4085	4167.67	4085	4250	0.020
Antimonio (Sb)	0.04	mg/Kg	24.70	25.77	23.55	24.67	23.55	25.77	0.045
Arsénico (As)	0.02	mg/Kg	158	160	165	161.00	158	165	0.022
Bario (Ba)	0.04	mg/Kg	66.6	67.8	64.5	66.30	64.5	67.8	0.025
Berilio (Be)	0.01	mg/Kg	0.21	0.28	0.25	0.25	0.21	0.28	0.142
Bismuto (Bi)	0.05	mg/Kg	21.4	19.5	20.2	20.37	19.5	21.4	0.047
Boro (B)	1	mg/Kg	2.5	3.0	1.5	2.33	1.5	3	0.327
Cadmio (Cd)	0.02	mg/Kg	0.5	1.0	0.8	0.77	0.5	1	0.328
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	10253	11054	10900	10735.67	10253	11054	0.040
Cobalto (Co)	0.02	mg/Kg	5.4	4.7	5.0	5.03	4.7	5.4	0.070
Cobre (Cu)	0.02	mg/Kg	85	90	88	87.67	85	90	0.029
Cromo (Cr)	0.2	mg/Kg	31	30.2	30	30.40	30	31	0.017
Estaño (Sn)	0.025	mg/Kg	1.91	1.94	1.85	1.90	1.85	1.94	0.024
Estroncio (Sr)	0.045	mg/Kg	30.5	30	31	30.50	30	31	0.016
Fósforo (P)	1	mg/Kg	520	540	525	528.33	520	540	0.020
Hierro (Fe)	0.5	mg/Kg	41103	39520	41500	40707.67	39520	41500	0.026
Litio (Li)	0.025	mg/Kg	2.15	2.0	2.0	2.05	2	2.15	0.042
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	3520	3500	3450	3490.00	3450	3520	0.010
Manganeso (Mn)	0.03	mg/Kg	2008	2006	2007	2007.00	2006	2008	0.000
Mercurio (Hg)	0.03	mg/Kg	2	2.06	2.01	2.02	2	2.06	0.016
Molibdeno (Mo)	0.02	mg/Kg	12	12.1	12.4	12.17	12	12.4	0.017
Níquel (Ni)	0.1	mg/Kg	80	82	81	81.00	80	82	0.012
Plata (Ag)	0.02	mg/Kg	29	28	30	29.00	28	30	0.034
Plomo (Pb)	0.02	mg/Kg	910	995	995	966.67	910	995	0.051
Potasio (K)	10	mg/Kg	1210	1220	1200	1210.00	1200	1220	0.008
Selenio (Se)	0.03	mg/Kg	2	2.2	2.2	2.13	2	2.2	0.054
Silicio (Si)	1	mg/Kg	menor a 1	menor a 1	menor a 1	menor a 1	menor a 1	menor a 1	menor a 1
Sodio (Na)	2	mg/Kg	1650	1630	1640	1640.00	1630	1650	0.006
Talio (Ta)	0.02	mg/Kg	0.15	0.15	0.17	0.16	0.15	0.17	0.074
Telurio (Te)	0.05	mg/Kg	10	10	12	10.67	10	12	0.108
Titanio (Ti)	0.05	mg/Kg	35	37	37.5	36.50	35	37.5	0.036
Uranio (U)	0.005	mg/Kg	2.2	2.1	2.18	2.16	2.1	2.2	0.024
Vanadio (V)	0.02	mg/Kg	75	74	73.9	74.30	73.9	75	0.008
Wolframio (W)	0.05	mg/Kg	10	11	14	11.67	10	14	0.178
Zinc (Zn)	0.02	mg/Kg	340	320	345	335.00	320	345	0.039

Nota: La unidad empleada es miligramos por kilogramo.

4.1.6.2.2. Preparación de Terreno.

La mayoría de los suelos con elevadas concentraciones de sales se catalogan como Solonchak y presentan una conductividad eléctrica mayor a 4 Ω /cm. Estas sales afectan la asimilación de nutrientes a las plantas por lo que se le hizo un riego antes del sembrío.

Se hicieron dos pruebas en campo, en la que se sembraron las especies vegetales descritas anteriormente en relave reprocesado con reactivo Sandioss, mezclado con otros componentes sobre dos tipos de pozas, tal y como se describe en las tablas 57 y 58. Las dimensiones de las pozas fueron de 2.5m x 4m para cada prueba. Posteriormente se adicionaron los aditivos, se tomó lectura de la conductividad eléctrica y finalmente se sembraron las especies.

Tabla 57

Composición de la poza 1 con variedades de plantas de la zona

Producto	Unidad	Cantidad	%
Guano	Kg	40	2.00
Yeso	Kg	20	1.00
Tierra agrícola	Kg	970	48.50
Relave	Kg	970	48.50

Nota: La composición es expresada en porcentaje.

Tabla 58

Composición de la poza 2 con variedades de plantas de la zona

Producto	Unidad	Cantidad	%
Guano	Kg	40	1.94
Yeso	Kg	20	0.97
Relave	Kg	2000	97.09

Nota: La composición es expresada en porcentaje.

En las pozas 1 y 2 se hizo el riego cada 7 días (15 L/planta), se inspeccionó cada 15 días y todo esto se realizó durante 6 meses. Estas pruebas sirvieron para determinar la resistencia y adecuación de las especies. Los resultados se darán a conocer en las secciones más adelante. Se muestra evidencia fotográfica del trabajo.



Figura 44

Acondicionado de la poza



Figura 45

Riego de lixiviación de sales



Figura 46

Aplicado de guano y yeso agrícola



Figura 47

Conductividad eléctrica al inicio de la prueba



Figura 48

Sembrado de especies en la poza 1



Figura 49

Sembrado de especies en la poza 2



Figura 50

Regado de las especies vegetales



Figura 51

Especies vegetales sembradas en las pozas de relave en estudio

Nota: Conjunto de imágenes obtenidas durante la preparación de terreno.

4.1.6.2.3. Determinación de la Especie Vegetal.

Después de 6 meses, las especies vegetales en la poza 1 no tuvieron inconvenientes en el crecimiento, mientras que en la poza 2, solo la *Caesalpinia spinosa* (tara) continuó con el crecimiento a pesar de las condiciones agresivas del suelo, tal y como lo representan las figuras 52, 53 y 54.



Figura 52

Vista fotográfica de la poza 1, se puede apreciar que las plantas continuaron con su crecimiento



Figura 53

Vista fotográfica de la poza 2, se aprecia la alta mortandad por las características de un suelo agresivo, pero la tara siguió con su crecimiento



Figura 54

Vista fotográfica de la poza 3 con Caesalpinia spinosa en un suelo con características de la poza 2

Nota: Conjunto de imágenes obtenidas durante el crecimiento.

4.1.6.3. Muestreo de Suelos y Plantas después de la Remediación.

Después de 6 meses de haber sembrado la *Caesalpinia spinosa*, se obtuvieron alturas de crecimiento de dicha planta en suelo agrícola y en relave. Además, se analizaron la parte aérea de la planta, las raíces y el suelo. Se hizo un muestreo aleatorio estratificado por triplicado de la raíz, parte aérea y de sus respectivos suelos. A continuación, se detalla la codificación empleada en esta investigación:

Tabla 59

Resumen de las pruebas realizadas

Prueba 1 (M1)	Prueba 2 (M2)	Prueba 3 (M3)
Crecimiento de variedades de especies vegetales de la zona con relave y tierra agrícola (1:1)	Crecimiento de variedades de especies vegetales de la zona con relave	Crecimiento de la <i>Caesalpinia spinosa</i> con relave

Nota: Presentación de las tres pruebas.

a) Colecta de las muestras de plantas

La colecta de ejemplares se hizo según el Protocolo para Herborización (OSINFOR, 2013):

- Se recolectó tres duplicados por planta.

- Se delimitó la zona del suelo y de la raíz a extraer, por lo que se hizo con mucho cuidado en no dañar ni cortar las raíces.
- Se separó el tallo y las hojas (parte aérea) de la raíz, así como también se lavó con agua las raíces para retirar el suelo de estas.
- Las muestras colectadas fueron puestas en papel periódico procurando distribuir las en toda el área del papel periódico, repitiendo este proceso para los duplicados obtenidos en campo colocando uno encima del otro siendo (apiladas) separadas entre sí por papel periódico. Posteriormente estas muestras se colocaron en prensas de madera sujetadas con pabilo.
- Se etiquetaron las muestras con códigos, altitud, fecha, hora de recolección y ubicación.

UNASAM	VEGETACIÓN	FCAM
N° colecta: MP 1-1	N. Vulgar: Juncus	
Ubicación: Fundo Laytaruma		
Distrito: Sancos	Provincia: Lucanas	
Fecha: 25/05/2023	Hora: 09:30	
Altitud: 1044 msnm	Coordenadas: S: 15°24'59.9" O: 74°18'4.67"	
Observaciones:		

Figura 55

Datos de la vegetación

Nota: Se indica la ubicación mediante coordenadas.

b) Envasado de la muestra de planta

- Las muestras son colocadas en bolsas rotuladas. Cada muestra, tanto de la raíz como la parte aérea tienen un peso aproximado entre 1kg y 2kg.
- Posteriormente las muestras fueron rotuladas y transportadas hacia CERPER para los respectivos análisis de la raíz y de la parte aérea.

c) Colecta de las muestras de suelos

- Se hizo la excavación de un hoyo de aproximadamente de 10 cm de profundidad por un lado cuadrado de 20 cm (MINAM, 2014).
- Se obtuvieron un total de 3 muestras, cada una de las cuales fueron cuarteadas hasta obtener muestras aproximadamente de 1kg.

d) Envasado de la muestra de suelo

- Las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico con su respectiva identificación.
- Posteriormente las muestras fueron rotuladas y transportadas hacia el Laboratorio CERPER para los respectivos análisis.

4.1.6.4. *Análisis de Metales Totales por ICP.*

Los análisis se realizaron en el Laboratorio CERPER S.A., empleando el método de metales por ICP-Masa según EPA METHOD 6020A, Revisión 1, 2007 (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), con preparación de muestras siguiendo EPA Method 3051A, que consiste en digestión ácida asistida por microondas de sedimentos, lodos, suelos y aceites.

Se procesaron los datos obtenidos de los análisis de metales pesados en el suelo contaminado, así como en las raíces y la parte aérea de la planta, con el objetivo de evaluar el grado de acumulación de metales en *Caesalpinia spinosa* y determinar los factores de bioconcentración y translocación.

4.1.7. *Análisis de Metales Pesados de la Planta*

La raíz de tara logró absorber 45.47 mg-As/Kg y la parte aérea 48.93 mg-As/Kg, así también, en el caso del plomo la raíz ensayó 204.17 mg/Kg, y en la parte aérea 235.40 mg/Kg. El análisis ICP de la planta se detalla en la tabla 60, y se realizó luego de 6 meses de monitoreo.

Tabla 60*Análisis por metales pesados en la planta*

Metales Totales ICP-Masa	Parámetro	Unidad	Resultados							
			Raíz - ML002				Aérea - ML003			
			N1	N2	N3	Media	N1	N2	N3	Media
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	509	503	521	511.00	161.7	157.6	169.7	163.00
Antimonio (Sb)	0.04	mg/Kg	0.91	0.81	0.89	0.87	0.37	0.33	0.35	0.35
Arsénico (As)	0.02	mg/Kg	45.6	45.5	45.3	45.47	48.5	49.2	49.1	48.93
Bario (Ba)	0.04	mg/Kg	12.5	13.8	12.1	12.80	4.7	4.6	4.8	4.70
Berilio (Be)	0.01	mg/Kg	0.12	0.02	0.1	0.08	0.06	0.04	0.05	0.05
Bismuto (Bi)	0.05	mg/Kg	0.06	0.09	0.09	0.08	0.23	0.18	0.22	0.21
Boro (B)	1	mg/Kg	0.85	0.73	0.64	0.74	0.53	0.61	0.69	0.61
Cadmio (Cd)	0.02	mg/Kg	0.36	0.46	0.41	0.41	0.19	0.23	0.21	0.21
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	8990	9011	9005	9002.00	8880	8852	8863	8865.00
Cobalto (Co)	0.02	mg/Kg	0.81	0.35	0.4	0.52	0.16	0.22	0.13	0.17
Cobre (Cu)	0.02	mg/Kg	38.7	41.9	40.9	40.50	27.6	22.4	26.8	25.60
Cromo (Cr)	0.2	mg/Kg	0.5	0.4	0.9	0.60	0.18	0.22	0.20	0.20
Estaño (Sn)	0.025	mg/Kg	0.21	0.11	0.13	0.15	0.02	0.04	0.03	0.03
Estroncio (Sr)	0.045	mg/Kg	22	21	20	21.00	18.1	18.7	18.3	18.37
Fósforo (P)	1	mg/Kg	382	352	362	365.33	395	308	303	335.33
Hierro (Fe)	0.5	mg/Kg	561	589	575	575.00	283	286	280	283.00
Litio (Li)	0.025	mg/Kg	0.44	0.51	0.49	0.48	0.22	0.24	0.20	0.22
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	1878	1883	1915	1892.00	1632	1626	1620	1626.00
Manganeso (Mn)	0.03	mg/Kg	48.5	47.3	47.9	47.90	31	31.5	31.4	31.30
Mercurio (Hg)	0.03	mg/Kg	0.29	0.32	0.17	0.26	0.47	0.48	0.46	0.47
Molibdeno (Mo)	0.02	mg/Kg	3.82	3.39	3.68	3.63	0.33	0.39	0.42	0.38
Níquel (Ni)	0.1	mg/Kg	0.4	0.7	0.4	0.50	0.1	0.13	0.19	0.14
Plata (Ag)	0.02	mg/Kg	0.09	0.04	0.08	0.07	0.24	0.18	0.27	0.23
Plomo (Pb)	0.02	mg/Kg	211.4	200.8	200.3	204.17	235.1	236.3	234.8	235.40
Potasio (K)	10	mg/Kg	575	617	599	597.00	785	791	788	788.00
Selenio (Se)	0.03	mg/Kg	0.29	0.33	0.34	0.32	0.07	0.14	0.12	0.11
Silicio (Si)	1	mg/Kg	0.5	0.1	0.5	0.37	0.5	0.4	0.1	0.33
Sodio (Na)	2	mg/Kg	1539	1532	1549	1540.00	820	805	814	813.00
Talio (Ta)	0.02	mg/Kg	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02
Telurio (Te)	0.05	mg/Kg	0.08	0.05	0.02	0.05	0.04	0.08	0.03	0.05
Titanio (Ti)	0.05	mg/Kg	6.5	7.6	7.2	7.10	3.8	3.2	2.9	3.30
Uranio (U)	0.005	mg/Kg	1.54	1.68	1.64	1.62	0.10	0.10	0.10	0.10
Vanadio (V)	0.02	mg/Kg	28.3	27.9	28.7	28.30	0.71	0.78	0.76	0.75
Wolframio (W)	0.05	mg/Kg	0.46	0.49	0.52	0.49	0.07	0.05	0.03	0.05
Zinc (Zn)	0.02	mg/Kg	29.4	28.7	30.1	29.40	27.4	27.8	27.9	27.70

Nota: La unidad empleada es miligramos por kilogramo.

Tabla 61*Análisis por metales pesados en el suelo fitorremediado*

Parámetros			Resultados			
Metales Totales ICP-Masa	Límites de Detección	Unidad	Suelo remediado			
			N1	N2	N3	Media
Aluminio (Al)	2	mg/Kg	3554	3648	3830	3677.33
Antimonio (Sb)	0.04	mg/Kg	25.60	24.50	28.20	26.10
Arsénico (As)	0.02	mg/Kg	102.0	101.8	101.0	101.60
Bario (Ba)	0.04	mg/Kg	59.30	58.90	57.28	58.49
Berilio (Be)	0.01	mg/Kg	0.40	0.38	0.39	0.39
Bismuto (Bi)	0.05	mg/Kg	26.70	24.80	25.04	25.51
Boro (B)	1	mg/Kg	2.73	2.78	2.99	2.83
Cadmio (Cd)	0.02	mg/Kg	1.62	1.55	1.37	1.51
Calcio (Ca)	10	mg/Kg	1488.00	1407.00	1507.00	1467.33
Cobalto (Co)	0.02	mg/Kg	6.89	7.11	7.33	7.11
Cobre (Cu)	0.02	mg/Kg	69.34	75.44	71.92	72.23
Cromo (Cr)	0.2	mg/Kg	39.56	43.44	41.80	41.60
Estaño (Sn)	0.025	mg/Kg	3.26	3.16	3.66	3.36
Estroncio (Sr)	0.045	mg/Kg	35.45	41.55	41.11	39.37
Fósforo (P)	1	mg/Kg	712	699	691	700.67
Hierro (Fe)	0.5	mg/Kg	40134	40844	40380	40452.67
Litio (Li)	0.025	mg/Kg	1.77	1.94	1.90	1.87
Magnesio (Mg)	1	mg/Kg	125.6	132.6	132.87	130.40
Manganeso (Mn)	0.03	mg/Kg	1880	1990	1935	1935.00
Mercurio (Hg)	0.03	mg/Kg	3.11	3.45	3.26	3.27
Molibdeno (Mo)	0.02	mg/Kg	17.50	19.92	17.95	18.46
Níquel (Ni)	0.1	mg/Kg	85	88	86	86.33
Plata (Ag)	0.02	mg/Kg	29.66	33.48	31.69	31.61
Plomo (Pb)	0.02	mg/Kg	651.10	622.70	637.50	637.10
Potasio (K)	10	mg/Kg	1329.00	1401.00	1425.00	1385.00
Selenio (Se)	0.03	mg/Kg	2.33	2.27	2.31	2.30
Silicio (Si)	1	mg/Kg	menor a 1	menor a 1	menor a 1	menor a 1
Sodio (Na)	2	mg/Kg	2034.00	2086.00	2039.00	2053.00
Talio (Ta)	0.02	mg/Kg	0.22	0.28	0.25	0.25
Telurio (Te)	0.05	mg/Kg	22.48	20.19	23.18	21.95
Titanio (Ti)	0.05	mg/Kg	38.56	41.20	40.54	40.10
Uranio (U)	0.005	mg/Kg	2.45	2.66	2.48	2.53
Vanadio (V)	0.02	mg/Kg	90.50	88.46	88.94	89.30
Wolframio (W)	0.05	mg/Kg	19.44	22.33	19.22	20.33
Zinc (Zn)	0.02	mg/Kg	302.00	310.00	322.00	311.33

Nota: La unidad empleada es miligramos por kilogramo.**4.1.8. Concentración de los Metales Pesados en el Suelo (Relave)**

En este estudio se utilizaron como referencia los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) del Perú con el objetivo de evaluar la eficacia del proceso de remediación del relave mediante la aplicación de *Caesalpinia spinosa*. La Tabla 62 presenta los valores límite establecidos por la normativa peruana para metales pesados en suelos, mientras que la Figura 56 muestra la evolución de las concentraciones de estos metales durante las tres etapas del proceso: la etapa inicial, la de reprocesamiento

y la de fitorremediación. Este enfoque permitió determinar el grado de reducción de los contaminantes y la efectividad del uso de *Caesalpinia spinosa* como agente fitorremediador.

Tabla 62

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Peruano para suelos industriales

Elemento	ECA Peruano - Suelo Industrial (mg/Kg)
Arsénico (As)	140
Bario (Ba)	2000
Cadmio (Cd)	22
Cromo Total (Cr)	1000
Cromo VI	1.4
Plomo (Pb)	800
Mercurio (Hg)	24

Nota: La unidad empleada es miligramos por kilogramo.

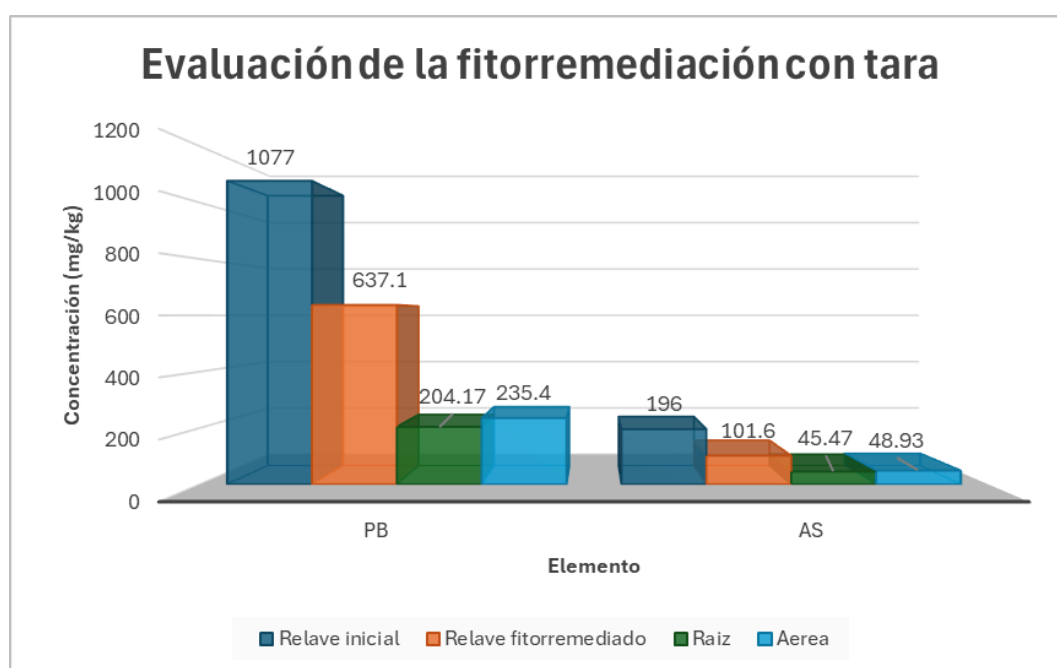


Figura 56

Comparación de las concentraciones de metales pesados

Nota: Gráfica de barras de las concentraciones, gráfica obtenida en Microsoft Excel.

4.1.8.1. Factores de Bioconcentración y Traslocación.

Con base en las concentraciones obtenidas mediante ICP-MS, se calcularon el Factor de Bioconcentración (BCF) y el Factor de Translocación (TF) para arsénico y plomo en *Caesalpinia spinosa*.

Para arsénico:

- Raíz = 45.47 mg/kg
- Parte aérea = 48.93 mg/kg
- Suelo final = 101.6 mg/kg

$$BCF_{As} = 45.47/101.6 = 0.45$$

$$TF_{As} = 48.93/45.47 = 1.07$$

Para plomo:

- Raíz = 204.17 mg/kg
- Parte aérea = 235.40 mg/kg
- Suelo final = 637.1 mg/kg

$$BCF_{Pb} = 204.17/637.1 = 0.32$$

$$TF_{Pb} = 235.40/204.17 = 1.15$$

El análisis de los factores de bioconcentración (BCF) y translocación (TF) demostró que *Caesalpinia spinosa* presenta valores de BCF inferiores a la unidad para arsénico (0.45) y plomo (0.32), indicando que no actúa como hiperacumuladora; sin embargo, los valores de TF superiores a 1 (1.07 para As y 1.15 para Pb) evidencian una eficiente movilización de metales hacia la parte aérea, confirmando su potencial como especie fitoextractora en relaves reprocesados.

4.2. Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados

La caracterización mineralógica de una muestra representativa de relave mediante microscopía de luz reflejada evidenció la presencia de metales preciosos,

principalmente oro y plata, bajo la forma mineral electrum. Esta especie presentó una distribución volumétrica del 0.26 %, de la cual el 38.46 % se encontró libre, mientras que la mayor parte permanece entrelazada principalmente con goethita. Entre los minerales que contribuyen significativamente a la presencia de metales pesados por encima de los límites permisibles destacan la calcopirita y la arsenopirita. La concentración de plomo solo pudo determinarse mediante ensayos químicos, ya que la caracterización mineralógica no permitió identificar la especie portadora, sugiriendo que se encuentra como solución sólida dentro de otro mineral.

La identificación de minerales cianicidas, principalmente arsenopirita y calcopirita, indicó que se requeriría un elevado consumo de reactivos durante la lixiviación. Además, la disolución de especies arsenicales y de cobre resultaría favorable, ya que contribuiría a reducir la presencia de metales pesados en el relave reprocesado. Para determinar las especies presentes en las gangas se aplicó difracción de rayos X, revelando feldespatos, sericita, cuarzo, biotita, calcita y hornblenda, utilizando una metodología similar a la descrita por Cairncross y Tadie (2022), quienes destacan la importancia de la caracterización mineralógica para comprender el comportamiento metalúrgico de los relaves.

Con base en esta caracterización se realizaron pruebas de flotación, gravimetría y lixiviación. La flotación permitió recuperar un 39.66 % de oro y un 21.51 % de plata, utilizando colectores específicos como AR-1208 y AR-404, además de xantato y MIBC, con un ratio de concentración de 36.66. Sin embargo, debido a las bajas leyes obtenidas en los concentrados, se consideró necesario aplicar un proceso adicional de lixiviación para incrementar la recuperación de metales preciosos.

En la concentración centrífuga gravimétrica con equipo Falcon C se lograron recuperaciones de 47.03 % de oro y 30.19 % de plata, con un ratio de 49.07. Estos resultados muestran una mejora respecto a la flotación; sin embargo, las leyes obtenidas aún no alcanzan niveles comerciales, por lo que sería necesario un tratamiento complementario. Este comportamiento coincide con lo señalado en diversos estudios de reprocesamiento de relaves auríferos, donde los procesos físicos

presentan limitaciones cuando los metales se encuentran parcialmente encapsulados o asociados a minerales de ganga.

Posteriormente se evaluó la lixiviación hidrometalúrgica empleando Sandioss, un reactivo alternativo al cianuro que además aporta macronutrientes como N, P y K. Este método alcanzó recuperaciones de 52.08 % de oro y 82.29 % de plata, posicionándose como la opción más eficiente para el retratamiento del relave. Este enfoque coincide con la tendencia actual hacia el uso de reactivos menos tóxicos en la recuperación de metales preciosos, lo cual responde a la necesidad de reducir los impactos ambientales asociados al uso de cianuro en procesos metalúrgicos.

En relación con la remediación ambiental, se evaluó la fitorremediación mediante la selección de especies vegetales adaptadas al entorno. Para ello se recolectaron especies endémicas locales como sábila, tuna, casuarina, geranio, tara y planta hormiga. El terreno de siembra se acondicionó con diferentes proporciones de guano, yeso, tierra agrícola y relave. La tara fue la única especie que logró desarrollarse adecuadamente después de seis meses, creciendo en un sustrato compuesto por 1.94 % de guano, 0.97 % de yeso y 97.09 % de relave.

Este resultado coincide con lo reportado por Munyai (2025), quien identificó especies vegetales con capacidad de adaptarse a relaves auríferos y acumular metales en sus tejidos, demostrando el potencial de las plantas nativas en procesos de fitorremediación. De manera similar, Innes (2019) señala que ciertas especies vegetales toleran altas concentraciones de metales pesados y pueden contribuir a la estabilización o extracción de contaminantes dependiendo de las condiciones geoquímicas del relave.

Respecto a la adsorción de arsénico, la tara logró absorber el 30.30 % de este metal, acumulando el 15.66 % en raíces y el 14.64 % en las hojas. Estos valores resultan menores a los reportados por Verde (2025), quien obtuvo eficiencias de remoción mayores utilizando mostaza (*Brassica juncea*). Sin embargo, la diferencia puede explicarse por factores como el tipo de sustrato, las condiciones geoquímicas del relave y el tiempo de crecimiento de las especies vegetales evaluadas.

Además de la adsorción de arsénico, durante el crecimiento de la tara también se evidenció la adsorción de plomo, lo cual se reflejó en los análisis realizados en suelo, raíces y hojas. La adsorción de plomo alcanzó un 30.62 %, lo cual resulta comparable con diversos estudios de fitorremediación reportados en la literatura. En investigaciones nacionales, Chávez (2014) demostró que especies nativas pueden presentar buena capacidad de extracción y translocación de plomo, mientras que Huamani (2017) evidenció que plantas adaptadas al entorno local pueden reducir significativamente la contaminación de suelos afectados por relaves mineros.

Los resultados obtenidos demuestran que *Caesalpinia spinosa* (tara) presenta una adecuada adaptación a suelos con alto contenido de metales pesados y capacidad para absorber arsénico y plomo. Asimismo, los valores obtenidos de $BCF < 1$ y $TF > 1$ indican que la especie moviliza los metales hacia la parte aérea, lo cual coincide con lo señalado por estudios de fitorremediación que destacan el potencial de ciertas especies vegetales para procesos de fitoextracción.

En conjunto, los resultados del presente estudio evidencian que la combinación del retratamiento metalúrgico mediante lixiviación con Sandioss y el posterior proceso de fitorremediación con *Caesalpinia spinosa* constituye una alternativa viable para la recuperación de metales preciosos y la reducción del impacto ambiental asociado a los relaves mineros.

4.3. Comprobación de Hipótesis

4.3.1. Hipótesis Específica 1

El retratamiento del relave permite recuperar valores económicamente rentables de Au y Ag de la relavera.

Técnica: Prueba T-Student

Grado de confianza: 95%

Grado de significancia: 0.05%

Para la prueba de hipótesis específica 1 se analizaron los datos más representativos de recuperación de Au y Ag mediante el proceso de lixiviación con SandioSS, los cuales se detallan en la tabla 63. Así también, se asumen los valores de 40% de recuperación de Au y 65% de Ag como valores medios con los cuáles se puede generar rentabilidad en el proceso.

Tabla 63

Valores representativos de recuperación de Au y Ag

% Rec. Au	% Rec. Ag
41.35	65.11
46.47	78.73
50.00	82.19
52.08	83.01
43.40	63.96
47.17	79.13
49.82	83.16
53.19	84.68

Nota: Los valores se presentan en porcentajes.

a) Análisis estadístico de la recuperación de oro

Hipótesis nula (H_0): $\mu = 40$

Hipótesis alterna (H_1): $\mu > 40$

Tabla 64

Resumen de estadísticos para la recuperación de oro

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
47.93	4.13	1.46	45.17	5.44	0.000

Nota: μ es la media de recuperación de Au.

b) Análisis estadístico de la recuperación de plata

Hipótesis nula (H_0): $\mu = 65$

Hipótesis alterna (H_1): $\mu > 65$

Tabla 65*Resumen de estadísticos para la recuperación de plata*

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
77.50	8.25	2.92	71.97	4.28	0.002

Nota: μ es la media de recuperación de Ag.

Como los valores del estadístico p son menores que 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, tal como se presentan en la tabla 67 y 68.

4.3.2. Hipótesis Específica 2

La aplicación de la técnica de fitoextracción permite remediar el relave del postratamiento de la relavera.

Técnica: Prueba T-Student

Grado de confianza: 95%

Grado de significancia: 0.05%

Para la hipótesis específica 2 se analizaron por triplicado las concentraciones de As y Pb en raíz y parte aérea (tabla 66), evaluando su acumulación tras 6 meses.

Tabla 66*Resumen de los datos reportados de absorción de la planta*

Metal	Raiz (mg/Kg)			Aerea (mg/Kg)		
	N1	N2	N3	N'1	N'2	N'3
Arsénico	45.6	45.5	45.3	48.5	49.2	49.1
Plomo	211.4	200.8	200.3	235.1	236.3	234.8

Nota: Los datos se presentan en miligramos por kilogramo.

a) Análisis estadístico de la fitoextracción de arsénico de la planta

Hipótesis nula (H_0): $\mu = 0$

Hipótesis alterna (H_1): $\mu > 0$

Tabla 67*Resumen de estadísticos para la fitoextracción de arsénico en la raíz de la planta*

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
45.47	0.15	0.09	45.21	515.54	0.000

*Nota: μ es la media de contenido de As.***Tabla 68***Resumen de estadísticos para la fitoextracción de arsénico en la parte aérea de la planta*

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
48.93	0.38	0.22	48.30	223.87	0.000

*Nota: μ es la media de contenido de As.***b) Análisis estadístico de la fitoextracción de plomo de la planta**Hipótesis nula (H_0): $\mu = 0$ Hipótesis alterna (H_1): $\mu > 0$ **Tabla 69***Resumen de estadísticos para la fitoextracción de plomo en la raíz de la planta*

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
204.17	6.27	3.62	193.60	56.41	0.000

*Nota: μ es la media de contenido de Pb.***Tabla 70***Resumen de estadísticos para la fitoextracción de plomo en la parte aérea de la planta*

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
235.40	0.79	0.46	234.06	513.68	0.000

Nota: μ es la media de contenido de Pb.

Los valores de p para todos los casos son menores que 0.05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, tal como lo demuestran las tablas 67, 68, 69 y 70.

4.3.3. Hipótesis Específica 3

El postratamiento del relave produce cambios significativos en sus características fisicoquímicas .

Técnica: Prueba T-Student

Grado de confianza: 95%

Grado de significancia: 0.05%

Para la hipótesis específica 3 se consideran los valores de As y Pb de la tabla 71, correspondientes al relave fitorremediado. Se espera evidenciar una reducción respecto a las concentraciones iniciales (As = 196 mg/kg y Pb = 1077 mg/kg).

Tabla 71

Resumen del ensayo químico del relave fitorremediado

Metal	Ensayo químico (mg/Kg)		
	N1	N2	N3
Arsénico	102.0	101.8	101.0
Plomo	651.1	622.7	637.5

Nota: Los datos se presentan en miligramos por kilogramo.

a) Análisis estadístico de la concentración de As en el relave fitorremediado

Hipótesis nula (H_0): $\mu = 196$

Hipótesis alterna (H_1): $\mu < 196$

Tabla 72

Resumen de estadísticos de la concentración de arsénico en el relave fitorremediado

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor Z	Valor p
101.6	0.53	0.31	102.49	-309.00	0.000

Nota: μ es la media de la concentración de As.

b) Análisis estadístico de la concentración de Pb en el relave fitorremediado

Hipótesis nula (H_0): $\mu = 1077$

Hipótesis alterna (H_1): $\mu < 1077$

Tabla 73

Resumen de estadísticos para la concentración de plomo en el relave fitorremediado

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor Z	Valor p
637.1	14.20	8.20	661.05	-53.64	0.000

Nota: μ es la media de la concentración de Pb.

En todos los casos, el valor de p es inferior a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, como se evidencia en las tablas 72 y 73.

CAPÍTULO V

IMPACTOS

5.1. Propuesta para la Solución del Problema

El tratamiento de lixiviación con Sandioss y la fitorremediación de los relaves con *Caesalpinia spinosa* es una alternativa técnica y económicamente viable para el reaprovechamiento de los valores metálicos de oro y plata y su posterior remediación de los relaves, alcanzando este último, concentraciones de metales pesados por debajo del límite permisible. Esta alternativa ha sido objeto de estudio, para formar parte de solución al tratamiento ambiental de los relaves. El proceso propuesto para la recuperación de oro y plata a partir de los relaves es la lixiviación con reactivo ecoamigable Sandioss. Se propone procesar 500 t/día de relaves por lixiviación con carbón en pulpa. El material será removido con maquinaria y alimentado a una tolva de finos, el cual alimentará a un molino de 7x9. La pulpa de la descarga del molino será bombeada a tres tanques acondicionadores de 18x18. El diagrama de flujo propuesto se muestra en la figura 57.

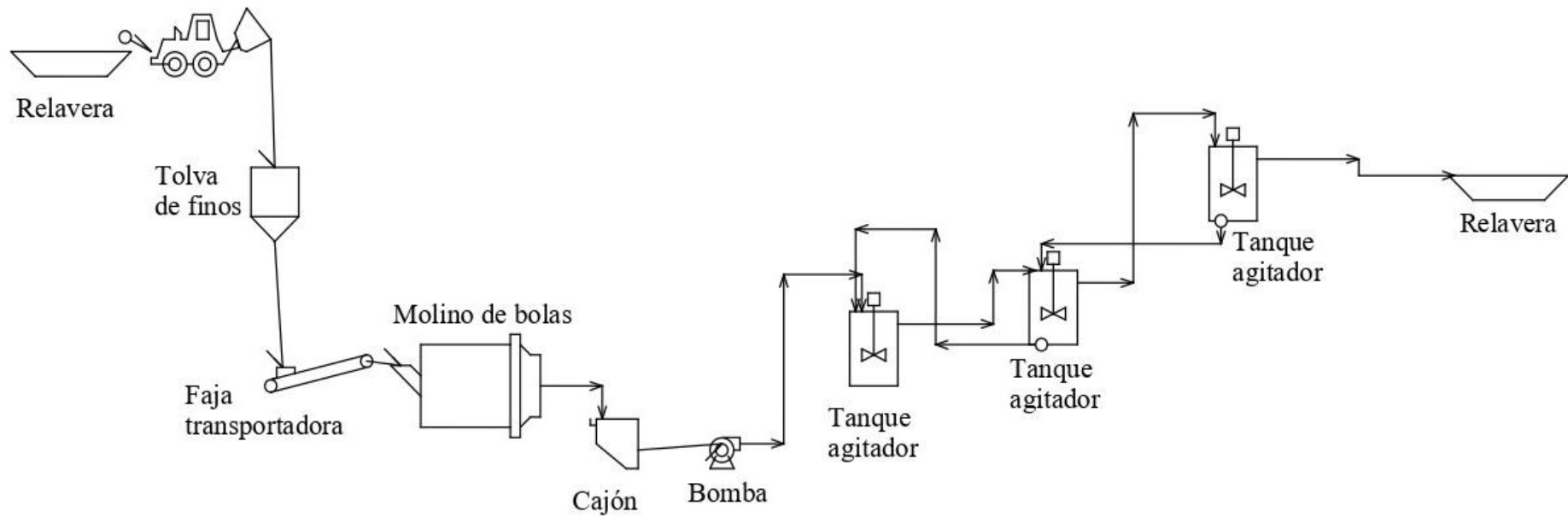


Figura 57

Diagrama del proceso propuesto

Nota: Flowsheet realizado en METSIM.

5.2. Costos de Implementación de la Propuesta

Teniendo en cuenta a los elementos valorizables de Au y Ag, y los precios de la bolsa de metales de Londres correspondientes al 05 de setiembre del 2025, se ha calculado su valorización tomando en cuenta las recuperaciones obtenidas en el proceso de lixiviación con reactivo Sandioss (52.08% de oro, y 82.29% de plata). El cálculo de valorización se realizó tomando como base 100 t de relave, con leyes de 1.72 g/t de Au, y 31.76 g/t de plata, cuyos resultados se escalaron para determinar la valorización correspondiente a las 433 993.69 t de relave. Los valores considerados en el contrato de comercialización y el total a pagar de oro y plata, se representan en la tabla 74.

Tabla 74

Valorización de oro y plata en la relavera

Descripción	Valor
Lote (t)	433,993.69
Merma	1%
Ley Au (g/t) en la relavera	1.72
% Recuperación Au en lixiviación	52.08%
% Recuperación Au en carbón	99%
% Recuperación Au en desorción	99%
Total de oro en la relavera a recuperar (g)	377,214.54
Total de oro en la relavera a recuperar (Oz)	12,129.08
Ingreso por valores de oro (\$)	43,745,970.15
t de carbón (10 g/Kg)	37,721.45
Costo por desorción(\$/t)	200
Deducción por tratamiento desorción	7,544,290.75
Valor en oro de la relavera	36,201,679.4
Ley Ag (g/t) en la relavera	31.76
% Recuperación Ag en Lixiviación	82.29%
% Recuperación Ag en Carbón	99%
% Recuperación Ag en desorción	99%
Total de plata en la relavera a recuperar (g)	11,005,671.74
Total de plata en la relavera a recuperar (oz)	353,880.12
Ingreso por valores de plata (\$)	14,686,024.99
Valorización bruta total	50,887,704.39
Deducciones de contrato a pagar (%)	97%
Valorización neta (\$)	49,361,073.26

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

5.2.1. Costos de Tratamiento

Para el cálculo de los costos de procesamiento se asume la construcción de una planta de lixiviación con carbón en pulpa de 500 t/día, la cual operará 30 días/mes, con 8 operarios y un jefe de guardia, por turno. Los costos asociados al procesamiento de relaves para recuperar oro y plata se describen teniendo en cuenta, costos directos e indirectos de procesamiento.

5.2.2. Costos Directos de Producción

Para el cálculo de este valor, se tomaron en cuenta la energía de los equipos que operan en planta, los costos de los insumos necesarios para procesar, así como los costos del personal técnico y calificado encargados de procesar los relaves, y otros costos asociados al mantenimiento preventivo de equipos, tal y como se representan en las tablas 75, 76, 77 y 78.

Tabla 75

Costos por equipo

Equipo	Unidades	Potencia Ins. (HP)	Potencia Ins. (Kw)	Total Kw	Fac. Uso (70 %)
Faja transportadora	1	10	7.46	7.46	5.22
Molino de bolas	1	180	134.33	134.33	94.03
Tanques de agitación 18x18	3	50	37.31	111.94	78.36
Bomba de pulpa	2	10	7.46	14.93	10.45
Bomba de agua (recup. relave)	1	8	5.97	5.97	4.18
Iluminarias			2.00	2.00	1.40
Total		258	194.54	276.63	193.64
Energía (US\$/mes)				9759.40	

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

Tabla 76

Costos por insumos

Insumos	Consumo (Kg/t)	Costo Uni. (US\$)	Costo (US\$/t)
Cal	1	0.63	0.63
Sandioss	5	3.5	17.5
Total (US\$/t)			18.13
Total (US\$/mes)			27,1950

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

Tabla 77*Costos por trabajador*

Operación planta	Nº	Sueldo (S/.)	Ben. Soc.	Total(S/.)	Total (US\$/mes)
Administrador	1	3500	630	4130	1116.22
Almacenero	2	1500	270	1770	956.76
Jefe planta	1	5000	900	5900	1594.59
Jefe de guardia	3	2500	450	2950	2391.89
Operadores	12	1400	252	1652	5357.84
Mecánico	2	1800	324	2124	1148.11
Personal (US\$/mes)				12565.41	

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

Tabla 78*Costos por mantenimiento*

Mantenimiento y repuestos (US\$/t)	Total (US\$/mes)
3	45,000

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

5.2.3. Costos Indirectos de Producción

Para el cálculo de este valor, se tomaron en cuenta los costos asociados a la administración y logística del proyecto en planta y en oficinas de Lima, cuyos valores se denotan a continuación en la tabla 79, 80 y 81.

Tabla 79*Costos por servicios básicos*

Servicios	Nº	Sueldo (S/.)	Ben. Soc.	Total (S/.)	Total (US\$/mes)
Seguridad de planta	4	1500	270	1770	1913.51
Camioneta + chofer	2	400	72	472	255.14
Total (US\$/mes)				2168.65	

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

Tabla 80*Costos por servicios de trabajadores*

Planta	Total (US\$)
Manipuleo	1351.35
Telefonía + internet	250
Insumos de control en planta	150
Combustible	6486.5
Alimentación	1800
Agua	50
Total (US\$/mes)	10087.85

Nota: La moneda considera es el dólar americano.**Tabla 81***Estimación de Ingresos y egresos del proyecto*

Descripción	Valor
Costo bruto (\$)	10,652,682.60
Imprevisto (\$)	1,065,268.26
Costo neto (\$)	11,717,950.86
Ingreso total (\$)	49,361,073.26
Utilidad bruta (\$)	37,643,122.40
I.G.V (\$)	6,775,762.03
Utilidad neta (\$)	30,867,360.37

Nota: La moneda considera es el dólar americano.

CONCLUSIONES

- El retratamiento del relave permitió recuperar Au y Ag mediante diferentes técnicas, destacando la lixiviación con Sandioss con recuperaciones de 52.08 % de Au y 82.29 % de Ag en 24 horas, constituyéndose en una alternativa eficiente frente a la flotación y concentración gravimétrica, y con menor impacto ambiental comparado con la cianuración.
- La fitorremediación con *Caesalpinia spinosa* (tara) demostró capacidad de absorción de arsénico (30.30 %) y plomo (30.62 %) en 6 meses. Los valores de $BCF < 1$ y $TF > 1$ indican que la especie presenta comportamiento fitoextractor, movilizandolos metales hacia la parte aérea, lo que la convierte en una alternativa viable para el postratamiento del relave.
- El postratamiento mediante lixiviación con Sandioss y posterior fitorremediación generó una reducción significativa en las concentraciones de arsénico y plomo, alcanzando valores finales de 101.6 mg/kg y 637.1 mg/kg respectivamente, evidenciando cambios fisicoquímicos favorables y mejora en la calidad ambiental del relave.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el análisis costo–beneficio del uso de Sandioss frente a la cianuración, considerando no solo el rendimiento metalúrgico sino también los beneficios ambientales y sociales derivados de la reducción del riesgo tóxico.
- Ampliar el tiempo de evaluación de la fitorremediación y estudiar especies complementarias a *Caesalpinia spinosa*, considerando que el período de 6 meses constituye una limitación temporal para determinar su máxima capacidad de extracción.
- Profundizar en el análisis mineralógico mediante técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM) para identificar asociaciones minerales remanentes que puedan optimizar futuras etapas de recuperación.
- Promover la aplicación del reprocesamiento de relaves como estrategia de aprovechamiento de recursos secundarios, utilizando los resultados de esta investigación como base técnica para proyectos de minería responsable y gestión de pasivos ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriano, D. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals* (2 ed.). New York: Springer.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Agricultureros - Red de especialistas en agricultura. (5 de Agosto de 2015). La fitorremediación: plantas para tratar la contaminación ambiental:
<https://agricultureros.com/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/>
- Alarcón, N., & Peláez, F. (2019). Transferencia de metales suelo – planta en el cerro “El Toro”, Huamachuco, Perú. *Manglar*, 16(2).
<https://doi.org/10.17268/manglar.2019.020>
- Alvarez, A. (2006). *Tecnología de la concentración centrífuga*. Tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Andres, La Paz.
- Arthur, G., Aremu, A., Kulkarni, M., Stirk, W., Davies, T., Penaye, J., & Van, J. (2022). Phytoremediation potential of Beta vulgaris L. (Swiss chard) using soil from the vicinity of Kette-Batouri Goldmine (Eastern Cameroon). *South African Journal of Botany*, 151, 713-719.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.10.034>
- ATSDR. (2013). *Toxicological Profile Information Sheet*. Atlanta: U.S. Agency Toxic Substances and.
- Baker, A. (1981). Accumulators and Excluders - Strategies in the Response of Plants to Heavy-Metals. *Journal of Plant Nutrition*, 643-654.
- Baker, A., & Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 81 - 126.
- Baker, A., McGrath, S., Reeves, R., & Smith, J. (1999). Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. En *Phytoremediation of contaminated soils* (págs. 85 - 107). Florida: Terry, N., Vangronsveld, J. and Banuelos, G.

- Banerjee, R., Goswami, P., Lavania, S., Mukherjee, A., & Lavania, U. (2019). Vetiver grass is a potential candidate for phytoremediation of iron ore mine spoil dumps. *Ecological Engineering*, 132, 120-136.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.012>
- Bartisz, G. (1997). Oxidative stress in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 47 - 64.
- Blaylock, M., Salt, D., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnik, Y., Ensley, B., & Raskin, I. (1997). Enhanced Accumulation of Pb in Indian Mustard by Soil-Applied Chelating Agents. *Environmental Science & Technology*, 860 - 865.
- Bolan, N., Adriano, D., & Naidu, R. (2003). Role of phosphorus in (Im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 177, 1-44.
https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-387-21725-8_1
- Bolt, G., Boodt, M., Hayes, M., McBride, M., & Strooper, E. (1991). *Interactions at the soil colloid: Soil solution interface* (1 ed.). Boston: Kluwer.
- Brooks, R. (1994). *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. Wallingford: CAB International. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9783527615919.ch4>
- Brown, S., Chaney, R., Angle, J., & Baker, A. (1995). Zinc and calcium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Journal of the American Soil Science Society*, 59(1), 125-133.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900010020x>
- Bustamente, M., & Tobón, C. (2012). Estudio de hidrofobicidad del oro nativo. *Dyna*, 79(175), 48-80.
- Cai, B., Chen, Y., Du, L., Liu, Z., & He, L. (2021). Spent mushroom compost and calcium carbonate modification enhances phytoremediation potential of *Macleaya cordata* to lead-zinc mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 294.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113029>
- Cairncross, K., & Tadie, M. (2022). Life cycle assessment as a design consideration for process development for value recovery from gold mine tailings. *Minerals Engineering*, 183.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107588>

- Caren, K., Cuthbert, N., George, S., & Eliakira, N. (2021). Assessing phytoremediation potentials of selected plant species in restoration of environments contaminated by heavy metals in gold mining areas of Tanzania. *Heliyon*, 7(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07979>
- Carpena, R., & Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16(2), 1-3. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/16683/1/eco.pdf>
- Castillo, J. (2014). *Programa Integral Concentración de Minerales*. Tecsup, Lima.
- Cataldo, D., Garland, T., & Wildung, R. (1983). Cadmium Uptake Kinetics in Intact Soybean Plants. *Plant Physiology*, 844 - 848.
- Ccari, E. (2022). *Optimización de la recuperación en concentración gravimétrica de oro de los Frentes Pomarani - Cruz de Oro Cori Pubno S.A.C*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- CCME, C. C. (1993). *Guidance Manual on Sampling, Analysis, and Data Management for Contaminated Sites* (Vol. Volumen I: Main Report). The National Contaminated Sites Remediation Program.
- Clemens, S. (2006). Toxic Metal Accumulation, Responses to Exposure and Mechanisms of Tolerance in Plants. *Biochimie*, 1707 - 1719.
- Collintzky, Y., & Stotzky, G. (1989). *Factors affecting the toxicity of heavy metals to microbes*. Toronto: Metal Ions and Bacteria.
- Concha, H. (2007). *Estudio de la concentración gravimétrica de minerales auríferos en un jig de laboratorio*. Tesis de licenciatura, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Copius Peereboom, J. (1976). *Chemie, Mens en Milieu, (in Dutch)*. Assen, the Netherlands: Van Gorcum.
- Crowley, D., & Wang, Y. R. (1991). Mechanisms of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants. *Plant and Soil*, 179 - 198.
- Cunningham, S., & Berti, W. (1993). Remediation of contaminated soils with green plants: An overview. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 207 - 212.
- Cunningham, S., Berti, W., & Huang, J. (1995). Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnology*, 13, 393 - 397.

- Cunningham, S., Shann, J., Crowley, D., & Anderson, T. (1997). Phytoremediation of contaminated water and soil. *ACS Symposium series 664* (págs. 2 - 19). E. L. Kruger, T. A. Anderson, and J. R. Coats.
- De la Torre, E., & Guevara, A. (2006). *Tratamiento de minerales refractarios de oro*. Quito.
- Denaeyer-De Smet, S. (1966). Note sur un accumulateur de manganèse, *Vaccinium myrtillus*. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*, 331 - 343.
- Diéz, J. (2009). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados : evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. *Tesis Doctoral*, Universidad de Santiago de Compostela.
- Díez, J. (2009). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados : evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. *Tesis de doctorado*, Universidad de Santiago de Compostela.
- Dobbins, D., Marcelo, J., & Siebert, S. (2021). Screening the phytoextractability of trace metals by *Aloe cryptopoda* Baker and *Aloe vera* (L.) Burm.f. cultivated on mine tailings. *South African Journal of Botany*, 140, 110-113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.03.042>
- Dushenkov, V., Kumar, P., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology*, 29(5), 1239-1245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es00005a015>
- EPA. (2013). *Chemicals in the Environment: OPPT Chemical Fact Sheets*. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency: Office of Pollution Prevention & Toxics.
- Farago, M. (2008). *Plants and the Chemical Elements: Biochemistry, Uptake, Tolerance and Toxicity*. New York: Wiley-Blackwell.
- Flathman, P., & Lanza, G. (1998). Phytoremediation: Current views on an emerging green technology. *Journal of Soil Contamination*, 7(4), 415-432. <https://doi.org/https://doi-org.unmsm.lookproxy.com/10.1080/10588339891334438>
- Fundación Chile. (2019). *Manual de Tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Chile: CORFO.

- Gagnon, V., Rodrigue, M., Migneault, M., Tardif, A., Garneau, L., Lalonde, S., Shipley, B., Greer, C., Bellenger, J., & Roy, S. (2020). Survival, growth and element translocation by 4 plant species growing on acidogenic gold mine tailings in Québec. *Ecological Engineering*, 151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105855>
- Garbisu, C., & Alkorta, I. (2001). Phytoextraction: A cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, 77(3), 229 - 236. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00108-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00108-5)
- Gardea, J., De la Rosa, G., & Peralta, J. (2004). Use of phytofiltration technologies in the removal of heavy metals: A review. *Pure and Applied Chemistry*, 76(4), 801-813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac200476040801>
- Ghosh, M., & Singh, S. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3, 1-18. https://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018
- Hartmann, T., Fricker, M., Rennenberg, H., & Meyer, A. (2003). Cell-specific measurement of cytosolic GSH in poplar leaves. *Plant Cell and Environment*, 26(6), 965 - 975. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01031.x>
- Hem, J. (1989). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Washington D.C.: USGS – Supply Paper 2254.
- Hinojosa, O. (2016). Concentración gravimétrica de menas auríferas. *Rev. Met UTO*(38), 38-50. http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932016000100006&lng=es&nrm=iso
- Hoyos, D., Aguinaga, V., Carranza, V., Ramirez, D., Valvidio, F., & Abanito, C. (2019). *Anuario Minero*. Ministerio de Energia y Minas, Lima.
- Huang, J., Chen, J., Berti, W., & Cunningham, S. (1997). Phytoremediation of lead contaminated soil: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environmental Science and Technology*, 31(3), 800 - 805. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es9604828>
- ITR, I. T. (1999). *Sampling Vegetation Attributes*. Colorado: Bureau of Land Management.

- Japa, J., & Harman, S. (2022). *Recuperación de minerales mediante la utilización de un concentrador gravimétrico tipo Z*. Tesis de Licenciatura, Universidad del Azuay, Cuenca.
- Jiao, X., Teng, Y., Zhan, Y., Wu, J., & Lin, X. (2015). Soil Heavy Metal Pollution and Risk Assessment in Shenyang Industrial District, Northeast China. *Plos One*.
- Khan, A. (2005). Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18, 355 - 364.
- Kinnersley, A. (1993). The role of phytochelates in plant growth and productivity. *Plant Growth Regulation*, 207 - 2018.
- Kumar, P., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology*, 29(5), 1232 - 1238.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es00005a014>
- Lakatos, G., Kiss, M., & Mezzaros, I. (1999). Heavy metal content of common reed (*Phragmites australis*/Cav./Trin. ex Steudel) and its periphyton in Hungarian shallow standing waters. *Biology, Ecology and Management of Aquatic Plants*, 147, 47-53. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-017-0922-4_8
- Le Faucheur, S., Schildknecht, F., Behra, R., & Sigg, L. (2006). Thiols in *Scenedesmus vacuolatus* upon exposure to metals and metalloids. *Aquatic Toxicology*, 355 - 361.
- Ledin, M. (2000). Accumulation of metals by microorganisms - processes and importance for soil systems. *Earth Science Reviews*, 51(1-4), 1 - 31.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00008-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00008-8)
- Leff, E. (2006). *Aventuras de la Epistemología Ambiental: de la articulación de ciencias al diálogo de saberes*. Ciudad de México: Siglo XXI Editores.
- Li, X., Wang, X., Chen, Y., & Yang, X. C. (2019). Optimization of combined phytoremediation for heavy metal contaminated mine tailings by a field-scale orthogonal experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.012>
- Li, X., Zhang, X., Wang, X., & Cui, Z. (2019). Phytoremediation of multi-metal contaminated mine tailings with *Solanum nigrum* L. and biochar/attapulgitite

- amendments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 517-525.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.033>
- Lindberg, S., Meyers, T., Taylor, J., Turner, R., & WH, S. (1992). Atmosphere-surface exchange of mercury in a forest: Results of modeling and gradient approaches. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2519 - 2528.
- Liphadzi, M., & Kirkham, M. (2006). Chelate-assisted heavy metal removal by sunflower to improve soil with sludge. *Journal of Crop Improvement*, 153 - 172.
- Liu, B., Wang, S., Wang, J., Zhang, X., Shen, Z., Shi, L., & Chen, Y. (2020). The great potential for phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris*. *Science of The Total Environment*, 719.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137475>
- Liu, C., Lin, H., Li, B., Dong, Y., & Yadiberet, E. (2021). Endophyte *Pseudomonas putida* enhanced *Trifolium repens* L. growth and heavy metal uptake: A promising in-situ non-soil cover phytoremediation method of nonferrous metallic tailing. *Chemosphere*, 272.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129816>
- Logan, T., & Chaney, R. (1983). Utilization of municipal wastewater and sludge on land. En *Metals* (págs. 235 - 326). University of California: Page, A.L.; Gleason, T.L.; Smith, J.E.; Iskandar, I.; Sommers, L.
- Lovley, D. (1993). Dissimilatory metal reduction. *Annual Review of Microbiology*, 47, 263 - 290.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.mi.47.100193.001403>
- Madejón, P., Domínguez, M., Girón, I., Burgos, P., López, M., García, Ó., & Madejón, E. (2022). Assessment of the phytoremediation effectiveness in the restoration of uranium mine tailings. *Ecological Engineering*, 180.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106669>
- Mains, D., Craw, D., Rufaut, C., & Smith, C. (2006). Phytostabilization of gold mine tailings from New Zealand. Part 2: Experimental evaluation of arsenic mobilization during revegetation. *International Journal of Phytoremediation*, 8(2), 163-183.
<https://doi.org/https://doi-org.unmsm.lookproxy.com/10.1080/15226510600742559>

- Maksymiec, W., & Baszyński, T. (1996). Chlorophyll fluorescence in primary leaves of excess Cu-treated runner bean plants depends on their growth stages and the duration of Cu-action. *Journal of Plant Physiology*, 149(1-2), 196-200. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80194-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80194-5)
- Markert, B. (1993). *Plants as Biomonitors-Indicators of Heavy Metals in the Terrestrial Environment*. Hoboken: VCH Publishers Ltd.
- Marrugo, J., Marrugo, S., Pinedo, J., Durango, J., & Díez, S. (2016). Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. *Science of The Total Environment*, 542, 809-816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.117>
- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants*. Cambridge: Academic Press.
- Marsden, J., & House, L. (2006). *Chemistry of Gold Extraction* (2 ed.). Colorado: Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Martin, H., & Kaplan, D. (1998). Temporal Changes in Cadmium, Thallium, and Vanadium Mobility in Soil and Phytoavailability under Field Conditions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 399 - 410.
- Martinez, L. (2018). Evaluación del estado de conservación de suelos contaminados por la relavera el Madrigal - Arequipa y propuesta de Fitorremediación. *Tesis de doctorado*, Universidad Nacional de San Agustín.
- Mathys, W. (1975). Enzymes of heavy-metal-resistant and non-resistant populations of *Silene cucubalus* and their interaction with some heavy metals in vitro and in vivo. *Physiologia plantarum*, 161 - 165.
- McBride, M. (1995). Toxic Metal Accumulation from Agricultural Use of Sludge: Are USEPA Regulations Protective? *Journal of Environmental Quality*, 24(1), 5 - 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400010002x>
- McGrath, S. (1995). Heavy metals and soils. En S. McGrath, *Chromium and nickel* (págs. 153 - 178). London: Alloway, B. J.
- Mendez, M., Glenn, E., & Maier, R. (2007). Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: growth, metal accumulation, and microbial community. *Journal Environmental Quality*, 36(1), 245-253. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq2006.0197>
- Mendo, D. (2016). *Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado, en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación*.

- Cachachi – Cajamarca 2016*. Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- Mendoza, J., Vásquez, O., Castillo, M., Varela, J., Santamaría, J., Olivares, O., Arriola, J., & Pérez, G. (2019). Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria. *Microbiological*, 228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126308>
- Meza, L. (1981). *Aspectos fundamentales de los procesos hidrometalúrgicos de los metales preciosos*. Colombia, Pasto.
- MINAM. (2014). Guía para el Muestreo de Suelos Contaminados. *Dirección General de Calidad Ambiental*.
- Minería Chilena*. (5 de Diciembre de 2012). ¿El fin de los relaves?: <https://www.mch.cl/reportajes/el-fin-de-los-relaves/>
- Mueller, B., Rock, S., Gowswami, Dib, & Ensley, D. (1999). Phytoremediation Decision Tree. *Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group*. <https://clu-in.org/download/partner/phytotree.pdf>
- Munive, R., Loli, O., Azabache, A., & Gamarra, G. (2018). Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria*, 9(4). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172018000400011&script=sci_arttext&tlng=pt
- Narayanan, M., Natarajan, D., Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Shanmuganathan, R. P. (2021). Phytoremediation competence of short-term crops on magnesite mine tailing. *Chemosphere*, 270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128641>
- Nordberg, G. (2003). Cadmium and human health: a perspective based on recent studies in China. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, 16(4), 307-319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jtra.10039>
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004, Julio - Setiembre). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia*, 55(3), 69-83. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones: https://www.ciaorganico.net/documypublic/390_Fitorremediacion.pdf

- Olivares, E., & Peña, E. (2009). Bioconcentración de elementos minerales en *Amaranthus dubius* (bledo, pira), creciendo silvestre en cultivos del estado Miranda, Venezuela, y utilizado en alimentación. *Interciencia*, 604-611.
- OSINFOR. (2013). *Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre*. Protocolo para la herborización: colección y preservado de ejemplares botánicos en procesos de supervisión forestal: https://www.osinfor.gob.pe/portal/data/destacado/adjunto/protocolo_herborizacion_julio2013.pdf
- Padmavathiamma, P., & Li, L. (2007). Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 105 - 126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>
- Pandey, V., Dixit, V., & Shyam, R. (2005). Antioxidative responses in relation to growth of mustard (*Brassica juncea* cv. Pusa Jaikisan) plants exposed to hexavalent chromium. *Chemosphere*, 40 - 47.
- Peralta, J., Torresdey, J., Tiemann, K., Gomez, E., Arteaga, S., & Rascon, E. (2001). Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa*) L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 727 - 734.
- Peters, R. (1999). Chelant extraction of heavy metals from contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 66(1-2), 151 - 210. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00010-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00010-2)
- Raskin, I., Smith, R., & Salt, D. (1997). Phytoremediation of metals: Using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 221 - 226.
- Rebaza, D., & Valverde, K. (2019). Evaluación del potencial fitorremediador de la especie *Brassica juncea* (Mostaza) en suelos contaminados con zinc y arsénico provenientes de relaves mineros. *Tesis de licenciatura*, Universidad Nacional de Trujillo.
- Reeves, R., & Brooks, R. (1983). Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from a mining area of Central Europe. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, 31(4), 277 - 287. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0143-1471\(83\)90064-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0143-1471(83)90064-8)

- Reinoso, J. (2019). *Determinación de los parámetros operacionales para la concentración de oro en un espiral*. Tesis de licenciatura, Universidad del Azuay, Cuenca.
- ReporteMinero. (3 de Junio de 2019). Programa de recuperación de valor desde relaves busca fomentar explotación de Tierras Raras: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2019/06/programa-de-recuperacion-de-valor-desde-relaves-busca-fomentar-explotacion-de-tierras-raras>
- Romero, A. (2015). Tratamiento de relaves mineros contaminado con plantación de gramíneas (kikuyo) para convertirlos en áreas verdes en las Minas de la Región Central del Perú. *Tesis de maestría*, Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Diseño y Tecnología*, 75-82.
- Rout, G., Sanghamitra, S., & Das, P. (2000). Effects of chromium and nickel on germination and growth in tolerant and non-tolerant populations of *Echinochloa colona* (L). *Chemosphere*, 855 - 859.
- Salt, D., Blaylock, M., Kumar, N., Dushenkov, V., Ensley, B., & Raskin, I. (1995). Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, 468 - 474.
- Salt, D., Blaylock, M., Kumar, N., Dushenkov, V., Ensley, B., & Raskin, I. (1995). Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, 13(5), 468 - 474. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nbt0595-468>
- Samsuri, A., Tariq, F., Karam, D., Aris, A., & Jamilu, G. (2019). The effects of rice husk ashes and inorganic fertilizers application rates on the phytoremediation of gold mine tailings by vetiver grass. *Applied Geochemistry*, 108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104366>
- Sánchez, M. (2006). Importancia del desarrollo de tecnologías limpias para la industria del cobre. *Tecnologías Limpias en las Industrias Extractivas Minero-Metalúrgica y Petrolera*, 352.
- Sceresini, B. (2005). Gold-copper ores. *Developments in Mineral Processing*, 15, 789-824. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15032-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15032-7)

- Sekara, A., Poniedzialek, M., Ciura, J., & Jedrszczyk, E. (2005). Cadmium and Lead Accumulation and Distribution in the Organs of Nine Crops: Implications for Phytoremediation. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(4), 509-516. <http://www.pjoes.com/Cadmium-and-Lead-Accumulation-and-Distribution-in-the-Organs-of-Nine-Crops-Implications,87786,0,2.html>
- Sekhar, K., Kamala, C., Chary, N., Sastry, A., Rao, T., & Vairamani, M. (2004). Removal of lead from aqueous solutions using an immobilized biomaterial derived from a plant biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 108(1-2), 111-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.01.013>
- Sepro Mineral Systems Corporation. (2011). Concentradores Falcon Continuos (C). *British Columbia*, 2.
- Sepro Mineral Systems Corporation. (2011). Concentradores Falcon para Ultra Finos (UF). *British Columbia*.
- Seregin, I., & Ivanov, V. (2001). Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 523 - 544.
- Shukla, O., & Rai, U. (2005). Accumulation of Chromium and its phytotoxic effects on *Bacopa monnieri* L. *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, 165 - 169.
- Smith, K. (2005). *Manual del Falcon Concentrators*. Australia.
- Smith, R., & Bradshaw, A. (1992). Stabilization of toxic mine wastes by the use of tolerant plant populations. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 81, 230-237.
- Soliman, N., Nasr, S., & Okbah, M. (2015). Potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Mediterranean coast, Egypt. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*.
- Suresh, B., & Ravishankar, G. (2004). Phytoremediation – A novel and promising approach for environmental clean-up. *Critical Reviews in Biotechnology*, 24(2-3), 97-124. <https://doi.org/https://doi-org.unmsm.lookproxy.com/10.1080/07388550490493627>
- Taggart, A. (1966). *Elementos de preparación de minerales*. Madrid, España: Ediciones Interciencia.
- Tester, M., & Leigh, R. (2001). Partitioning of nutrient transport processes in roots. *Journal of Experimental Botany*, 445 - 457.

- Theivanayagam, M., Gayathri, C., Ajeesh, K., Antony, S., & Kyusik, Y. (2023). The role of metal transporters in phytoremediation: A closer look at Arabidopsis. *Chemosphere*, 310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136881>
- Tordoff, G., Baker, A., & Willis, A. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 41(1-2), 219 - 228. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00414-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00414-2)
- Troncoso, J., & Trujillo, D. (2021). *Diseño, Construcción y operación de una mesa vibratoria IDRAKO NGU para tratar pre concentrado de oro del yacimiento Tres Estrellas del Sur de la zona Boca Colorado - Madre de Dios*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco.
- Turner, A., & Dickinson, N. (1993). Survival of *Acer pseudoplatanus* L. (sycamore) seedlings on metalliferous soils. *New Phytologist*.
- Valverde, N. (2019). *Evaluación de Pelargonium zonale para fitoextraer plomo de suelos agrícolas en El Mantato - Jauja*. Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Van der Perk, M. (2013). *Soil and Water Contamination*. London: Taylor & Francis Group.
- Vilcapoma, J., & Chávez, Z. (2012). *Pruebas experimentales a nivael de laboratorio de concentración gravimétrica y flotación de mnerales de oro en la planta concentradora "Caselita" en Condoroma - Cuzco*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Wanitsawatwichai, K., & Sampanpanish, P. (2021). The combination of phytoremediation and electrokinetics remediation technology on arsenic contaminated remediation in tailing storage facilities from gold mine. *Heliyon*, 7(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07736>
- Williams, D., Vlamis, J., Pukite, A., & Corey, J. (1980). Trace Element Accumulation, Movement, and Distribution in the Soil Profile from Massive Applications of Sewage Sludge. *Soil Science*, 119 - 132.
- Williamson, A., & Johnson, M. (1981). Reclamation of metalliferous mine wastes. *Effect of heavy metal pollution on plants*, vol 2, 185-212. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-009-8099-0_6

- Wu, B., Luo, S., Luo, H., Huang, H., Xu, F., Feng, S., & Xu, H. (2022). Improved phytoremediation of heavy metal contaminated soils by *Miscanthus floridulus* under a varied rhizosphere ecological characteristic. *Science of The Total Environment*, 808. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151995>
- Wu, F., & Zhang, G. (2002). Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors. *J. Plant Nutrition*, 25(6), 1163-1173. <https://doi.org/https://doi-org.unmsm.lookproxy.com/10.1081/PLN-120004380>
- Xue, C., Sun, L., Qu, B., Gao, Y., Liu, Z., Guo, C., Liu, W., Chang, W., & Tai, P. (2022). Grafting with an invasive *Xanthium strumarium* improves tolerance and phytoremediation of native congener *X. sibiricum* to cadmium/copper/nickel tailings. *Chemosphere*, 308(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136>
- Yannopoulos, J. (1991). Physical and Chemical Properties of Gold. *The Extractive Metallurgy of Gold*, 11-23. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0_2
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*, 368(2-3), 456-464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016>
- Yu, X., Kang, X., Li, Y., Cui, Y., Tu, W., Shen, T., Yan, M., Gu, Y., Zou, L., Ma, M., Xiang, Q., Zhao, K., Liang, Y. Z., & Chen, Q. (2019). Rhizobia population was favoured during in situ phytoremediation of vanadium-titanium magnetite mine tailings dam using *Pongamia pinnata*. *Environmental Pollution*, 255(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113167>
- Zeid, I. (2001). Responses of *Phaseolus vulgaris* to chromium and cobalt treatments. *Biologia Plantarum*, 111 - 115.
- Zhang, W., Cai, Y., Tu, C., & Q Ma, L. (2002). Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *Science of The Total Environment*, 300(1-3), 167-177. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00165-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00165-1)
- Zhang, Y., Liu, G., Gao, S., Zhang, Z., & Huang, L. (2023). Effect of humic acid on phytoremediation of heavy metal contaminated sediment. *Journal of*

Hazardous Materials Advances, 9.

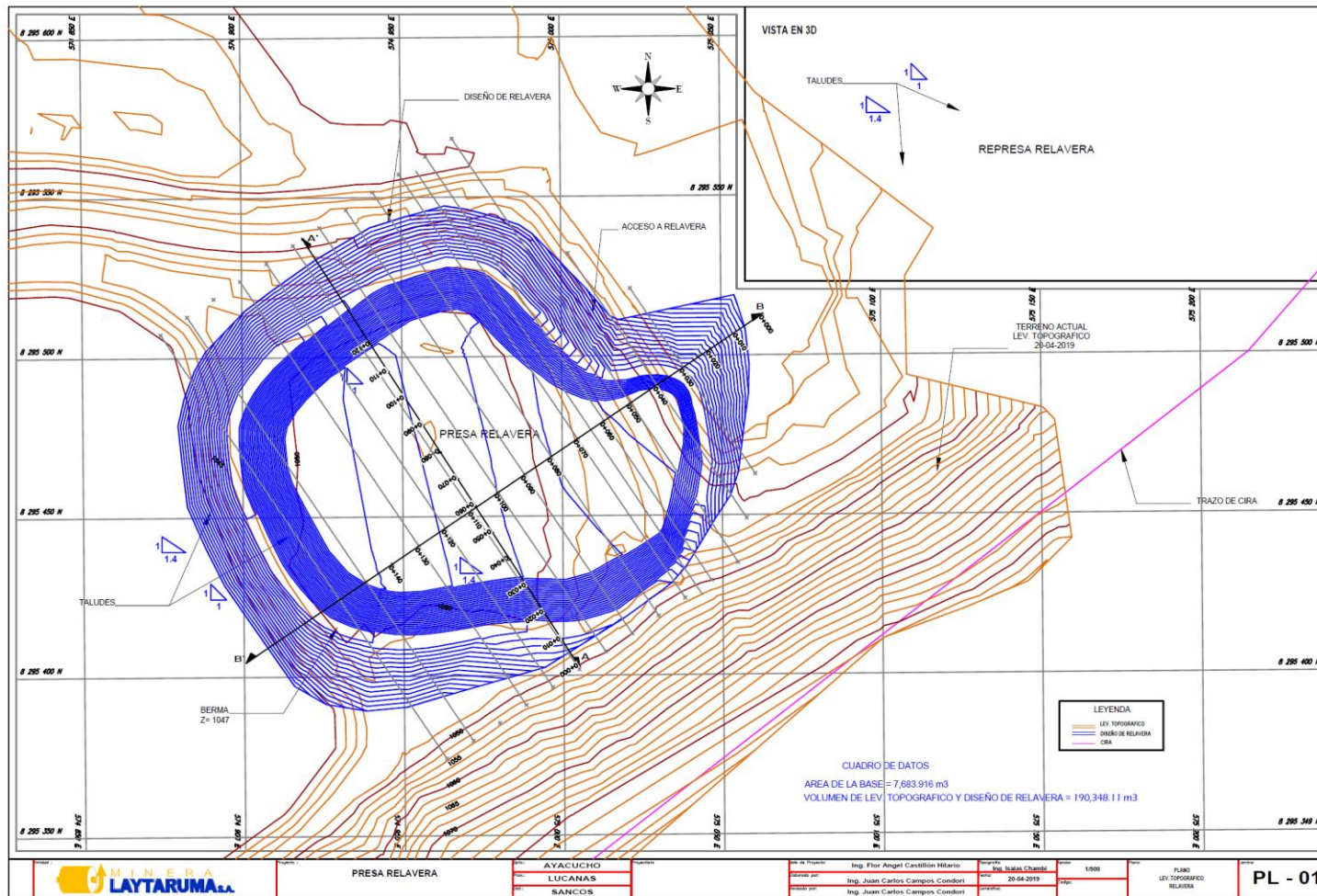
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100235>

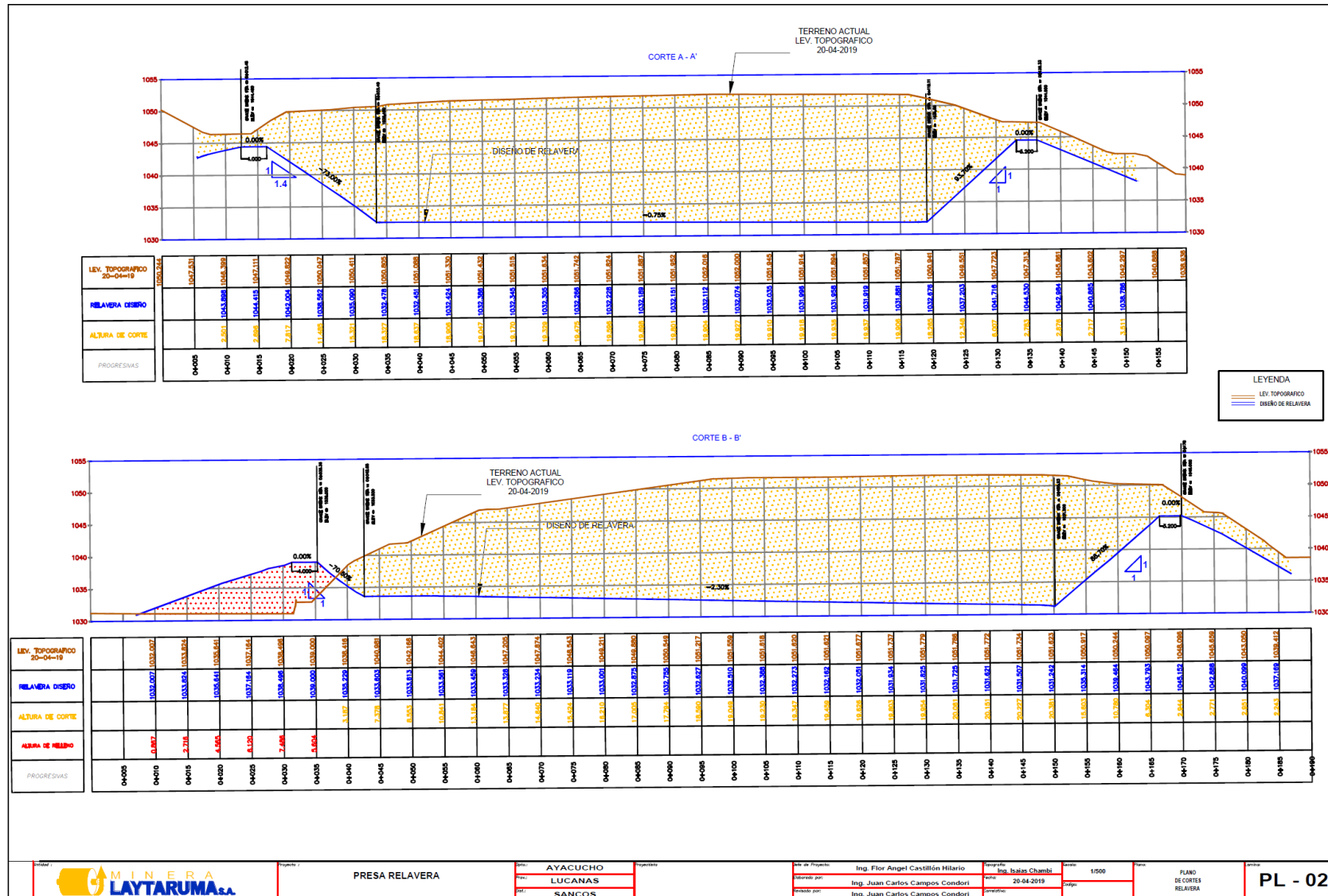
Zhu, Y., Zayed, A., Quian, J., De Souza, M., & Terry, N. (2009). Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: II. Water hyacinth. *Journal of Environmental Quality*, 28(1), 339-344.

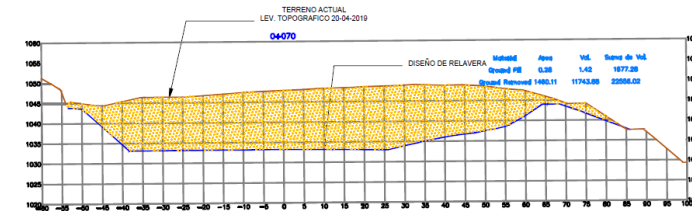
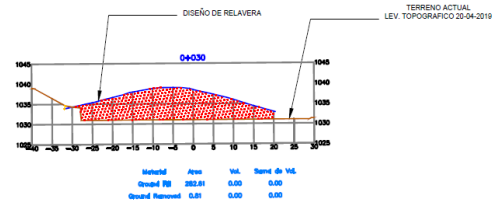
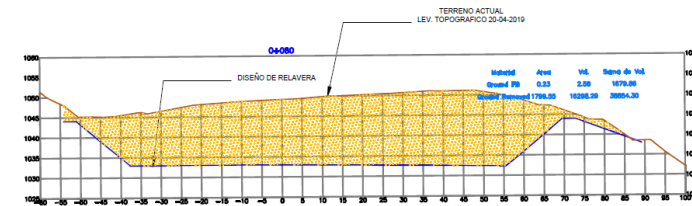
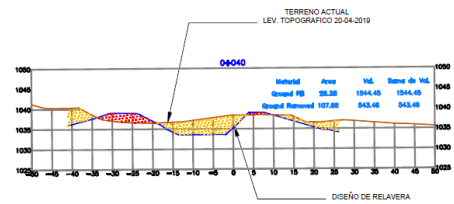
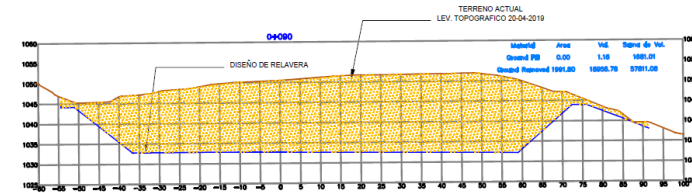
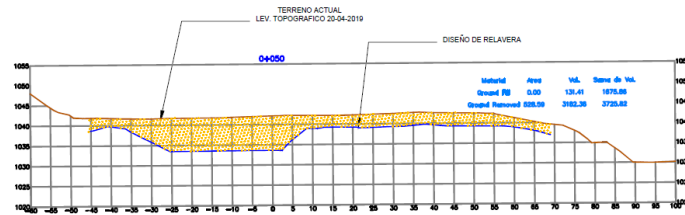
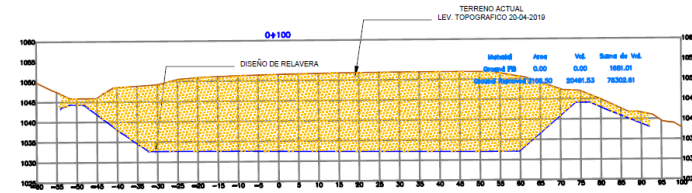
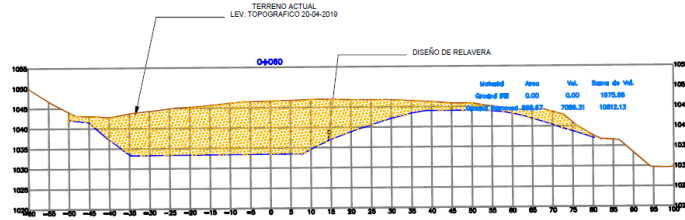
<https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800010042x>

ANEXOS

ANEXO 1







LEYENDA

— LEV. TOPOGRAFICO

— DISEÑO DE RELAVERA



PRESA RELAVERA

pro: AYACUCHO
pro: LUCANAS
pro: SANCOS

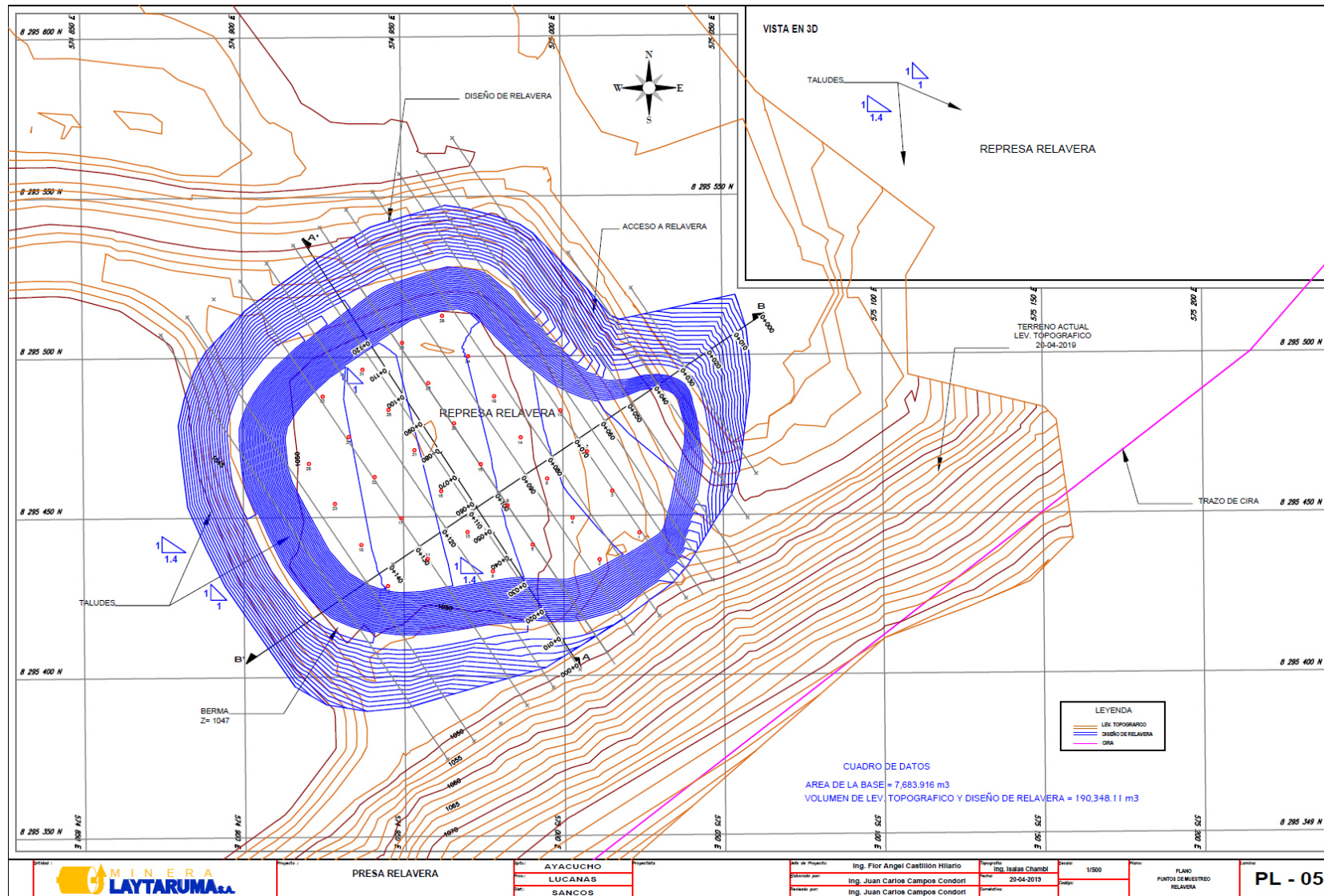
pro de Proyecto: Ing. Flor Angel Castillon Hilario
Elaborado por: Ing. Juan Carlos Campos Condori
Revisado por: Ing. Juan Carlos Campos Condori

proyecto: Ing. Isaias Chamblé
fecha: 20-04-2019
proyecto:

proyecto: 1/500
proyecto:

PLANO DE SECCIONES

SEC - 01



ANEXO 2

Leyes de Au y Ag por niveles

Puntos			Nivel 1 - 3 metros		Nivel 2 - 6 metros		Nivel 3 - 9 metros		Nivel 4 - 12 metros		Nivel 5 - 15 metros	
Número	Norte	Este	Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Au (g/TM)	Ag (g/TM)	Au (g/TM)	Ag (g/TM)
1	8295444	575023	1.36	27.13	1.43	32.49	1.50	36.01	1.72	38.08	0.00	0.00
2	8295437	575011	1.24	26.27	1.53	31.82	1.52	33.51	1.92	37.46	2.31	39.17
3	8295457	575014	1.28	29.60	1.49	32.75	1.60	33.91	2.07	36.17	0.00	0.00
4	8295449	575003	1.42	26.96	1.40	34.75	1.66	31.85	2.07	34.47	2.60	40.97
5	8295441	574989	1.38	28.25	1.53	34.65	1.60	36.09	1.66	35.42	2.77	40.36
6	8295433	574977	1.27	26.56	1.53	32.04	1.52	34.41	1.76	39.04	2.48	42.69
7	8295470	575007	1.44	29.11	1.41	32.80	1.69	35.84	2.09	35.04	0.00	0.00
8	8295462	574994	1.31	27.34	1.42	32.46	1.52	36.34	1.97	34.88	2.59	42.16
9	8295453	574982	1.30	26.46	1.54	31.57	1.64	34.02	1.81	37.21	2.79	41.66
10	8295445	574969	1.36	26.64	1.51	32.48	1.56	33.35	2.09	36.13	2.25	38.80
11	8295437	574957	1.43	28.84	1.43	33.09	1.55	34.98	2.06	39.88	2.50	42.74
12	8295428	574944	1.32	27.82	1.52	31.19	1.60	32.31	1.82	34.66	2.44	42.52
13	8295483	574998	1.21	29.88	1.42	31.91	1.63	36.56	2.00	39.35	0.00	0.00
14	8295474	574986	1.23	27.30	1.42	31.96	1.59	34.82	1.86	34.80	2.19	38.68
15	8295467	574973	1.29	26.83	1.54	33.08	1.69	34.56	1.76	35.42	2.12	43.39
16	8295457	574966	1.21	28.83	1.40	33.31	1.53	33.03	1.62	38.74	2.78	40.57
17	8295449	574948	1.22	29.76	1.54	31.56	1.70	34.82	1.84	38.65	2.52	42.84
18	8295441	574936	1.39	29.89	1.43	31.75	1.66	31.53	1.72	34.85	2.78	41.25
19	8295487	574978	1.35	27.56	1.55	32.58	1.63	32.61	1.71	39.10	2.49	41.82
20	8295479	574965	1.22	27.02	1.40	31.23	1.60	35.35	1.84	34.53	2.79	41.73
21	8295471	574953	1.37	27.30	1.48	34.21	1.56	31.92	1.87	39.87	2.45	39.08
22	8295462	574940	1.20	27.79	1.55	34.30	1.58	35.65	1.75	38.96	2.20	40.58
23	8295454	574928	1.29	27.36	1.48	33.42	1.66	34.46	1.67	34.01	2.58	42.90
24	8295500	574969	1.31	27.20	1.46	34.65	1.66	31.79	1.72	37.63	2.47	41.57
25	8295492	574957	1.24	28.93	1.46	34.98	1.70	33.93	1.69	39.86	2.35	38.42
26	8295484	574944	1.26	29.68	1.46	34.61	1.64	35.06	2.01	36.46	2.29	40.99
27	8295475	547933	1.28	27.70	1.49	31.47	1.66	34.06	1.99	39.58	2.33	38.72
28	8295467	574933	1.39	29.35	1.53	33.82	1.66	35.19	1.96	36.43	2.38	38.26
29	8295513	574962	1.23	26.55	1.43	34.00	1.65	35.96	1.95	37.79	2.53	38.82
30	8295504	574948	1.44	29.14	1.51	32.00	1.61	35.05	1.61	39.46	2.24	41.49
31	8295496	574937	1.40	29.46	1.43	32.83	1.58	34.15	1.99	36.28	2.15	41.28
32	8295487	574924	1.31	27.54	1.54	32.27	1.57	31.46	1.65	37.52	2.42	40.17

ANEXO 3

Análisis Granulométrico - Nivel 1

Malla	Micrones	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	Ley Au (gr/TM)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido Metálico Au (mg)	Contenido Metálico Ag (mg)
65	212	52.8	3.53	3.53	96.47	1.66	46.7	87.65	2465.76
100	150	82.4	5.50	9.03	90.97	1.68	43.7	138.43	3600.88
150	106	91.4	6.10	15.13	84.87	1.42	35.5	129.79	3244.70
200	75	154.2	10.30	25.43	74.57	1.40	36.3	215.88	5597.46
270	53	368.1	24.58	50.00	50.00	1.39	30.1	511.66	11079.81
325	44	315.7	21.08	71.08	28.92	1.29	23.6	407.25	7450.52
400	38	238.4	15.92	87.00	13.00	1.21	22.1	288.46	5268.64
-400	0	194.7	13.00	100.00	0.00	1.21	21.9	235.59	4263.93
Total		1497.7	Cabeza calculada			1.345	28.692		

Análisis Granulométrico - Nivel 2

Malla	Micrones	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	Ley Au (gr/TM)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido Metálico Au (mg)	Contenido Metálico Ag (mg)
65	212	69.9	4.67	4.67	95.33	1.87	53.4	130.71	3732.66
100	150	87.2	5.82	10.49	89.51	2.09	50.2	182.25	4377.44
150	106	109.4	7.30	17.79	82.21	2.21	43.3	241.77	4737.02
200	75	147.6	9.85	27.64	72.36	1.76	37.1	259.78	5475.96
270	53	366.8	24.48	52.12	47.88	1.59	34.4	583.21	12617.92
325	44	286.7	19.14	71.26	28.74	1.21	30.2	346.91	8658.34
400	38	242.3	16.17	87.43	12.57	1.04	21.1	251.99	5112.53
-400	0	188.3	12.57	100.00	0.00	1	16.8	188.30	3163.44
Total		1498.2	Cabeza calculada			1.458	31.955		

Análisis Granulométrico - Nivel 3

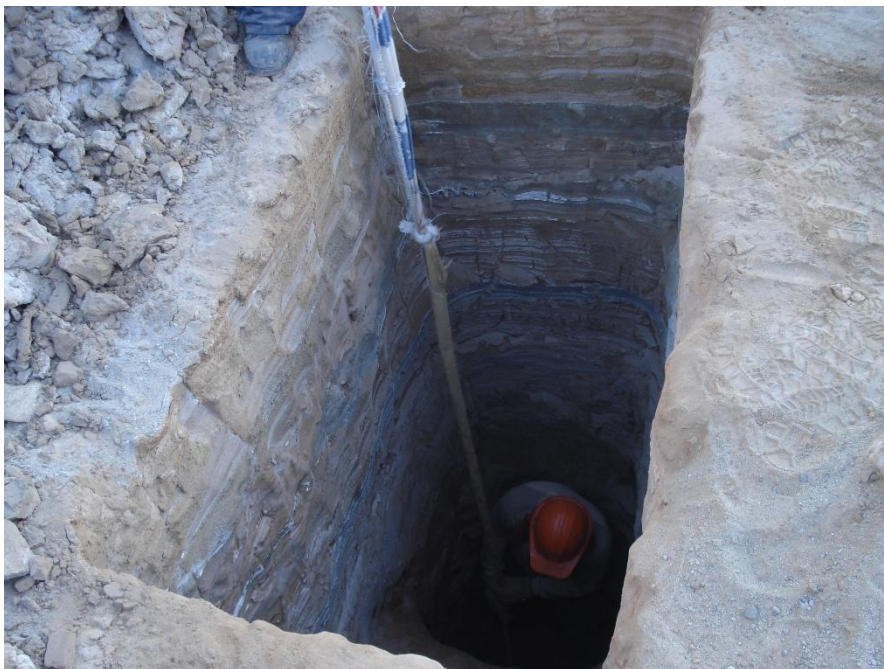
Malla	Micrones	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	Ley Au (gr/TM)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido Metálico Au (mg)	Contenido Metálico Ag (mg)
65	212	88.7	5.92	5.92	94.08	1.78	40.6	157.89	3601.22
100	150	81.4	5.44	11.36	88.64	1.73	42.4	140.82	3451.36
150	106	115.7	7.73	19.09	80.91	1.63	38.8	188.59	4489.16
200	75	155.4	10.38	29.47	70.53	1.84	37.2	285.94	5780.88
270	53	319.7	21.35	50.82	49.18	1.81	35.8	578.66	11445.26
325	44	291.2	19.45	70.28	29.72	1.71	34.8	497.95	10133.76
400	38	275.8	18.42	88.70	11.30	1.55	26.6	427.49	7336.28
-400	0	169.2	11.30	100.00	0.00	1.19	24.5	201.35	4145.40
Total		1497.1	Cabeza calculada			1.656	33.654		

Análisis Granulométrico - Nivel 4

Malla	Micrones	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	Ley Au (gr/TM)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido Metálico Au (mg)	Contenido Metálico Ag (mg)
65	212	95.4	6.37	6.37	93.63	2.37	58.7	226.10	5599.98
100	150	100.4	6.70	13.07	86.93	2.58	52.1	259.03	5230.84
150	106	105.4	7.03	20.10	79.90	2.82	43.4	297.23	4574.36
200	75	166.9	11.14	31.24	68.76	2.56	46.5	427.26	7760.85
270	53	324.8	21.68	52.92	47.08	1.84	38.7	597.63	12569.76
325	44	286.4	19.11	72.03	27.97	1.58	33.2	452.51	9508.48
400	38	238.7	15.93	87.97	12.03	1.26	27.2	300.76	6492.64
-400	0	180.3	12.03	100.00	0.00	1.16	25.4	209.15	4579.62
Total		1498.3	Cabeza calculada			1.849	37.587		

Análisis Granulométrico - Nivel 5

Malla	Micrones	Peso (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante	Ley Au (gr/TM)	Ley Ag (gr/TM)	Contenido Metálico Au (mg)	Contenido Metálico Ag (mg)
65	212	98.4	6.58	6.58	93.42	3.11	64.8	306.024	6376.32
100	150	100.2	6.71	13.29	86.71	2.89	58.6	289.578	5871.72
150	106	120.8	8.08	21.37	78.63	2.54	52.3	306.832	6317.84
200	75	202.4	13.54	34.92	65.08	2.49	51.1	503.976	10342.64
270	53	380.6	25.47	60.39	39.61	2.34	46.7	890.604	17774.02
325	44	285.6	19.11	79.50	20.50	2.21	41.9	631.176	11966.64
400	38	164.3	10.99	90.49	9.51	2.09	33.4	343.387	5487.62
-400	0	142.1	9.51	100.00	0.00	2.01	23.4	285.621	3325.14
Total		1494.4	Cabeza calculada			2.380	45.143		

ANEXO 4*Muestreo en la relavera por niveles*





Obtencion de la muestra representativa

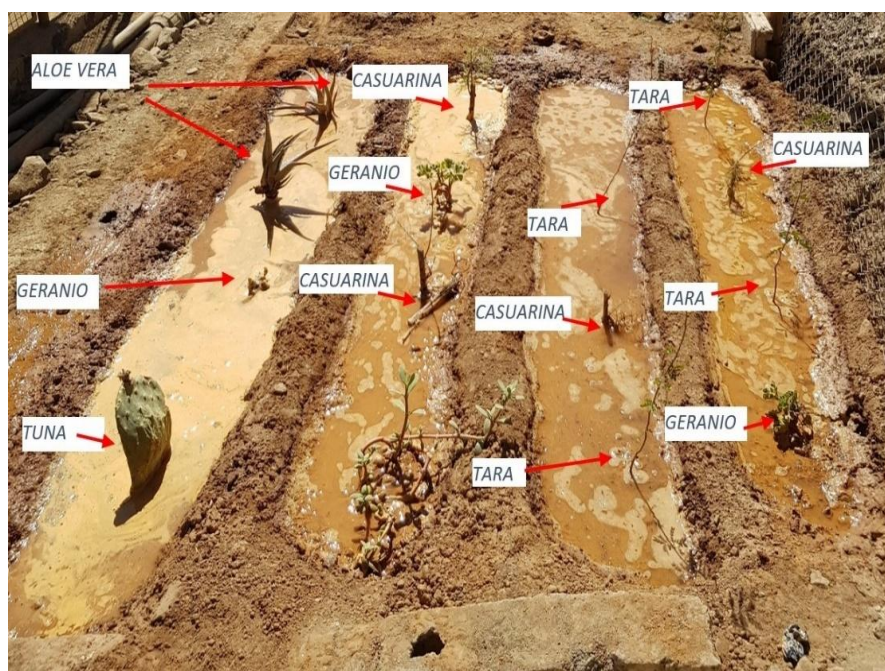




Muestra representativa



Plantas fitorremediadoras







ANEXO 5

Prueba Piloto con Sandioss para 3 TM (Antes de iniciar las pruebas postratamiento)

El relave es molido ligeramente en un molino 5x6 a la cual se le adiciona agua, dicha pulpa se le agrega a un TQ 10x10, se ajusta el pH con cal en un rango de 10 a 11. Se trabaja con una relación liquido/sólido de 2.5/1.

Se agrega el reactivo al tanque de agitación al 0.30% de Sandioss y se mantiene agitando por un lapso de 48 horas. Se toma controles cada 6 horas para mantener el control del reactivo en la pulpa.

Después de transcurrido el tiempo, se detiene la agitación para permitir una decantación breve, la fracción por sobrenadante se conduce por bombeo hacia un tanque de solución rica. La pulpa restante se envía a filtración en donde se recupera la solución de lixiviación la cual es enviada al mismo tanque de solución rica.

La pulpa mas densa es enviada al filtro para su posterior filtrado y luego el producto es depositado en la cancha de finos para un secado natural al ambiente. Posteriormente este relave es usado para las pruebas de campo con las especies fitorremediadoras.

ANEXO 6*Análisis Inicial del suelo a remediar***INFORME DE ENSAYO N° 1-01871/19**

Página 1/3

Solicitante	:	CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	:	Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
Producto declarado	:	SUELOS
Lugar de Muestreo	:	JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	:	2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	:	0.4 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	:	En bolsa de polietileno Sobre cerrado
Identificación de la muestra	:	Según se indica
Fecha de recepción	:	2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	:	2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	:	2019-09-26
Ensayo realizado en	:	Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	:	HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	:	Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	---	---	---	---

INFORME DE ENSAYO N° 1-01871/19

RESULTADOS

Página 2/3

		<i>Estación de Muestreo</i> ML-001	
		<i>Fecha y Hora de Muestreo</i> 2019-09-09 10:00	
		<i>Tipo de Muestra</i> Suelo	
<i>Parámetro</i>	<i>Límite de Detección</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 260
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	25,23
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	192
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	71,21
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,48
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	25,48
(*) Boro (B)	1	mg/kg	3,15
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,50
Calcio (Ca)	10	mg/kg	11 126
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	7,11
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	129
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	39
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	3,31
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	36,4
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	580
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	41 950
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	1,97
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	3 695
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	2 025
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	3,24
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	15,1
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	89
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	31,56
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	997
Potasio (K)	10	mg/kg	1 288
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,80
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	1,20
Sodio (Na)	2	mg/kg	1 801
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,33
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	19
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	41
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	3,25
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	91
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	21
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	368

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 1-01871/19

Página 3/3

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Edgardo Mendoza Samani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

INFORME DE ENSAYO N° 2-01871/19

Página 1/3

Solicitante	:	CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	:	Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cafete
Producto declarado	:	SUELOS
Lugar de Muestreo	:	JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	:	2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	:	0.4 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	:	En bolsa de polietileno Sobre cerrado
Identificación de la muestra	:	Según se indica
Fecha de recepción	:	2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	:	2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	:	2019-09-26
Ensayo realizado en	:	Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	:	HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	:	Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:			
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Observaciones
	ESTE	NORTE	
ML-001	-----	-----	-----

INFORME DE ENSAYO N° 2-01871/19

Página 2/3

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-001
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 11:00
		Tipo de Muestra	Suelo
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 200
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	24,88
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	199
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	70,55
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,46
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	26,80
(*) Boro (B)	1	mg/kg	3,28
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	2,10
Calcio (Ca)	10	mg/kg	11 109
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	6,90
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	126
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	45
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	3,48
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	35,7
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	591
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	42 150
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	2,05
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	3 609
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	2 018
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	3,96
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	19,8
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	84
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	30,23
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	1 102
Potasio (K)	10	mg/kg	1 297
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,90
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	1,80
Sodio (Na)	2	mg/kg	1 788
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,25
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	25
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	48
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	3,60
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	92
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	19
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	355

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 2-01871/19

Página 3/3

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A


Lic. Eddie Mendoza Mamani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

INFORME DE ENSAYO N° 3-01871/19

Página 1/3

Solicitante : CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
 Domicilio legal : Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
 Producto declarado : SUELOS
 Lugar de Muestreo : JAQUI – CARAVELI
 Fecha de Muestreo : 2019-09-09
 Cantidad de Muestras para el Ensayo : 0.4 Kilogramos
 Muestra proporcionada por el solicitante
 Forma de Presentación : En bolsa de polietileno
 Sobre cerrado
 Identificación de la muestra : Según se indica
 Fecha de recepción : 2019-09-10
 Fecha de inicio del ensayo : 2019-09-24,
 Fecha de término del ensayo : 2019-09-26
 Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental Arequipa
 Identificado con : HS (EXMA-14997-2019)
 Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	----	----	----	----

INFORME DE ENSAYO N° 3-01871/19

Página 2/3

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-001
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 12:00
		Tipo de Muestra	Suelo
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 225
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	24,51
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	197
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	69,12
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,39
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	25,13
(*) Boro (B)	1	mg/kg	3,12
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,90
Calcio (Ca)	10	mg/kg	11 138
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	8,50
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	130
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	42
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	3,59
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	35,6
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	602
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	42 550
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	2,14
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	3 595
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	2 022
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	2,98
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	17,6
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	87
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	33,49
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	1 131
Potasio (K)	10	mg/kg	1 291
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,50
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	2,40
Sodio (Na)	2	mg/kg	1 796
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,29
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	22
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	43
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	3,45
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	99
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	20
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	342

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 3-01871/19

Página 3/3

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.

Lic. Edgardo Mendoza Romani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

ANEXO 6

Analisis posterior del suelo lixiviado con Sandioss

INFORME DE ENSAYO N° 4-01871/19

Página 1/3

Solicitante	:	CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	:	Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
Producto declarado	:	SUELOS
Lugar de Muestreo	:	JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	:	2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	:	0.4 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	:	En bolsa de polietileno Sobre cerrado
Identificación de la muestra	:	Según se indica
Fecha de recepción	:	2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	:	2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	:	2019-09-26
Ensayo realizado en	:	Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	:	HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	:	Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	-----	-----	-----	-----

INFORME DE ENSAYO N° 4-01871/19

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-001
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 13:00
		Tipo de Muestra	Suelo
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 250
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	24,7
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	158
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	66,6
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,21
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	21,4
(*) Boro (B)	1	mg/kg	2,5
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,50
Calcio (Ca)	10	mg/kg	10 253
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	5,4
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	85
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	31
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	1,91
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	30,5
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	520
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	41 103
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	2,15
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	3 520
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	2 008
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	2,0
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	12
Níquel (Ni)	0,10	mg/kg	80
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	29
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	910
Potasio (K)	10	mg/kg	1 210
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,0
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	< 1
Sodio (Na)	2	mg/kg	1 650
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,15
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	10
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	35
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	2,2
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	75
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	10
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	340

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 4-01871/19

Página 3/3

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Edine Mendoza Zamani
C.O.P. N° 176
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

INFORME DE ENSAYO N° 5-01871/19

Página 1/3

Solicitante	:	CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	:	Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
Producto declarado	:	SUELOS
Lugar de Muestreo	:	JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	:	2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	:	0.4 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	:	En bolsa de polietileno Sobre cerrado
Identificación de la muestra	:	Según se indica
Fecha de recepción	:	2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	:	2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	:	2019-09-26
Ensayo realizado en	:	Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	:	HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	:	Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	----	----	----	----

INFORME DE ENSAYO N° 5-01871/19

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-001
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 14:00
		Tipo de Muestra	Suelo
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 168
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	25,77
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	160
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	67,8
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,28
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	19,5
(*) Boro (B)	1	mg/kg	3,0
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,0
Calcio (Ca)	10	mg/kg	11 054
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	4,7
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	90
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	30,2
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	1,94
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	30
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	540
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	39 520
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	2,0
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	3 500
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	2 006
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	2,06
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	12,1
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	82
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	28
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	995
Potasio (K)	10	mg/kg	1 220
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,2
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	< 1
Sodio (Na)	2	mg/kg	1 630
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,15
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	10
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	37
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	2,1
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	74
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	11
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	320

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 5-01871/19

Página 3/3

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Edmundo Mendoza Samani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

INFORME DE ENSAYO N° 6-01871/19

Página 1/3

Solicitante	:	CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	:	Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
Producto declarado	:	SUELOS
Lugar de Muestreo	:	JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	:	2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	:	0.4 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	:	En bolsa de polietileno Sobre cerrado
Identificación de la muestra	:	Según se indica
Fecha de recepción	:	2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	:	2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	:	2019-09-26
Ensayo realizado en	:	Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	:	HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	:	Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	-----	-----	-----	-----

INFORME DE ENSAYO N° 6-01871/19

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	
		ML-001	
		Fecha y Hora de Muestreo	
		2019-09-09 15:00	
		Tipo de Muestra	
		Suelo	
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	4 085
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	23,55
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	165
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	64,5
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,25
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	20,2
(*) Boro (B)	1	mg/kg	1,5
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,8
Calcio (Ca)	10	mg/kg	10 900
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	5,0
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	88
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	30
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	1,85
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	31
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	525
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	41 500
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	2,0
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	3 450
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	2 007
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	2,01
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	12,4
Níquel (Ni)	0,10	mg/kg	81
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	30
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	995
Potasio (K)	10	mg/kg	1 200
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,2
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	< 1
Sodio (Na)	2	mg/kg	1 640
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,17
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	12
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	37,5
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	2,18
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	73,9
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	14
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	345

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 6-01871/19

Página 3/3

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Edilio Mendoza Camani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

ANEXO 7*Análisis mineralógico***INFORME DE ENSAYO**

**ANALISIS MINERALÚRGICO DE UNA (01) MUESTRA DE
PRODUCTO METALÚRGICO RLV SOBRE UNA SECCION
PULIDA Y SOBRE UNA SECCION DELGADA**

Para:

LA JOYA MINING S.A.C.

Aprobado por:

Gerente General: Erika Gabriel

Informe de Ensayo No: IL-001MI-1839			
REV	EDICION	EMITIDO PARA	FECHA
0	Primera	Información	15-Jun-2020
Descargo de Responsabilidad: Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce.			

ANÁLISIS MINERALÚRGICO DE UNA (01) MUESTRA DE PRODUCTO METALÚRGICO RLV SOBRE UNA SECCION PULIDA Y SOBRE UNA SECCION DELGADA

El análisis mineralúrgico de la muestra del producto metalúrgico realizado sobre dos secciones, una sección pulida y la otra sección delgada; sobre las cuales se dan a continuación los resultados:

MUESTRA N°: RLV

CARACTERIZACION MINERALOGICA

SECCION DELGADA

En el siguiente cuadro muestra los minerales transparentes identificados en la sección delgada. El feldespato (plagioclasa) es el más abundante con un 33.41%. Otros componentes significativos son los opacos (metálicos), la sericita y el cuarzo. En menor proporción, se identificaron biotita, calcita y hornblenda.

MINERALES	FORMULAS	PORCENTAJES
Feldespato (Plagioclasa)	$(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Si}, \text{Al})_3 \text{O}_8$	33.41
Opacos (Metálicos)		20.58
Sericita (Moscovita)	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	19.22
Cuarzo	SiO_2	12.62
Biotita	$\text{K} (\text{Mg}, \text{Fe})_3 \text{AlSi}_3 \text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	8.93
Calcita	CaCO_3	5.05
Hornblenda	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{Al}, \text{Si})_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2$	0.19
TOTAL		100.00

SECCION PULIDA

Los minerales opacos que se han determinado en esta muestra son los siguientes:

MINERALES	FORMULA	ABREVIATURA
Electrum	(Au, Ag)	El
Calcopirita	CuFeS_2	Cp
Covelita	CuS	Cv
Esfalerita	$(\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}$	Ef
Pirita	FeS_2	Py
Arsenopirita	FeAsS	Apy

Pirrotita	Fe1-XS	Po
Marcasita	FeS ₂	Mc
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Mt
Hematita	Fe ₂ O ₃	Hm
Goethita	FeO.OH	Gt
Rutilo	TiO ₂	Rt
Rejalgar	As ₄ S ₄	Rjg
Gangas		GGs

DISTRIBUCION VOLUMETRICA PORCENTUAL

Los minerales que a continuación se dan son aquellos que **han intervenido en el análisis modal** y su distribución es en forma porcentual:

MINERALES	VOLUMEN PORCENTUAL
Electrum	0.26
Calcopirita	1.20
Esfalerita	0.09
Pirita	10.66
Arsenopirita	0.64
Pirrotita	Trz
Marcasita	0.28
Magnetita	1.08
Hematita	4.83
Goethita	13.41
Rutilo	0.42
Gangas	67.14
TOTAL	100.00

GRADOS DE LIBERACION

Los minerales que **han intervenido en el análisis modal**, presentan los grados de liberación expresados porcentualmente, y son como se dan en el cuadro siguiente:

MINERALES	GRADO DE LIBERACION PORCENTUAL
Electrum	38.46
Calcopirita	100.00
Esfalerita	0.00
Pirita	93.64
Arsenopirita	93.75
Pirrotita	0.00
Marcasita	0.00
Magnetita	55.56
Hematita	66.12
Goethita	89.29
Rutilo	23.81
Gangas	94.75

INTERPRETACION DE LOS GRADOS DE LIBERACION DE LOS MINERALES QUE HAN INTERVENIDO EN EL ANALISIS MODAL

De los dos cuadros anteriores, se deduce la siguiente interpretación, para los minerales que han intervenido en el análisis modal, y es como sigue

Electrum: representa el 0,26 % del volumen total de la muestra, de los cuales el 38,46 % está libre y el 61,54 % restante permanece entrelazado. La liberación incompleta se debe a los diferentes tipos de interconexiones geométricas presentes.

Calcopirita: ocupa el 1,20 % del volumen total, encontrándose totalmente libre (100 %), lo que indica que todas las partículas de este mineral analizadas están completamente liberadas.

Esfalerita: constituye el 0,09 % del volumen de la muestra, pero ninguna partícula está libre (0 %), permaneciendo el 100 % entrelazado debido a sus interconexiones geométricas.

Pirita: representa el 10,66 % del volumen total, con un 93,64 % libre y un 6,36 % entrelazado, siendo los entrelazamientos geométricos la causa de la liberación parcial.

Arsenopirita: ocupa el 0,64 %, con un 93,75 % libre y 6,25 % entrelazado, por las mismas razones geométricas de entrelazamiento.

Pirrotita: se encuentra en trazas, generalmente incluida en cristales de pirita, por lo que su grado de liberación es nulo.

Marcasita: representa el 0,28 % del volumen total, con un 0 % libre y 100 % entrelazado debido a su configuración geométrica.

Magnetita: ocupa el 1,08 %, con un 55,56 % libre y un 44,44 % entrelazado, condicionado por los tipos de interconexiones.

Argentita: constituye el 0,16 %, con un 83,33 % libre y 16,67 % entrelazado, afectado por las conexiones geométricas.

Hematita: representa el 4,83 %, con un 66,12 % libre y 33,88 % entrelazado.

Goethita: ocupa el 13,41 %, con un 89,29 % libre y 10,71 % entrelazado.

Rutilo: constituye el 0,42 %, con un 23,81 % libre y 76,19 % entrelazado; los detalles de los tipos de entrelazamiento se encuentran en la Tabla 25, mostrando las dificultades de liberación de este mineral.

Gangas: ocupa el 67,14 % del volumen total, con un 94,25 % libre y 5,75 % entrelazado, siendo las interconexiones geométricas responsables de la liberación parcial.

Tabla 1
VOLUMENES Y GRADOS DE LIBERACION DE LOS MINERALES OBSERVADOS
Muestra: Rlv

MINERALES			ELECTRUM		CALCOPIRITA		ESFALERITA		PIRITA		ARSENOPIRITA		PIRROTITA		MARCASITA		MAGNETITA		HEMATITA		GOETHITA		RUTILO		GANGAS			
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V		
Total de Partículas Libres		912	1		12		0		100		6		0		0		6		32		120		1		634			
% Volumen Partículas libres		91.02	0		1		0		10		1		0		0		1		3		12		0		63			
TOT.PARTICULAS ENTRELAZADAS	NUMERO PARTICUL.	VOLUMEN PORCENTUAL	ELECTRUM N	%V	CALCOPIRITA N	%V	ESFALERITA N	%V	PIRITA N	%V	ARSENOPIRITA N	%V	PIRROTITA N	%V	MARCASITA N	%V	MAGNETITA N	%V	HEMATITA N	%V	GOETHITA N	%V	RUTILO N	%V	GANGAS N	%V		
el-gt	3	0.3	1.60	0.16																	1.40	0.14						
ef-GGs	1	0.1					0.90	0.09																	0.10	0.01		
py-po	1	0.1							0.99	0.10			0.01	0.00														
py-mc	8	0.8							5.20	0.52					2.80	0.28												
py-GGs	8	0.8							0.60	0.06															7.40	0.74		
apy-gt	1	0.1									0.40	0.04									0.60	0.06						
mt-hm	8	0.8															4.80	0.48	3.20	0.32								
hm-gt	20	2																	11.60	1.16	8.40	0.84						
hm-GGs	8	0.8																	1.60	0.16					6.40	0.64		
gt-GGs	20	2																			4.00	0.40			16.00	1.60		
rt-GGs	12	1.2																					3.20	0.32	8.80	0.88		
TOTAL ENTREL.	90	8.98	1.60	0.16	0.00	0.00	0.90	0.09	6.79	0.68	0.40	0.04	0.01	0.00	2.80	0.28	4.80	0.48	16.40	1.64	14.40	1.44	3.20	0.32	38.70	3.86		
TOT.LIB+ENLZ	1002	100	2.60		12.00		0.90		106.79		6.40		0.01		2.80		10.80		48.40		134.40		4.20		672.70			
TOT.VOL.PORCENTUAL		100		0.26		1.20		0.09		10.66		0.64		0.00		0.28		1.08		4.83		13.41		0.42		67.14		
GRADOS DE LIB.PORCENTUAL			38.46		100.00		0.00		93.64		93.75		0.00		0.00		55.56		66.12		89.29		23.81		94.25			
Símbolos:			N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																									
			%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																									

TABLA N°2
TIPOS GEOMETRICOS DE ENTRELAZAMIENTOS DE LOS
MINERALES Y SUS POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA

Muestra No. :		Rlv			POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA
MINERALES ENTRELAZADOS	TIPO ENTR.	NUM. PART.	DIST. PORC.		
Partículas libres		912	91.02		
el-gt	2aI	3	0.30	Muy difícil a imposible	
ef-GGs	1bII	1	0.10	Moderadamente fácil	
py-po	1eI	1	0.10	Muy difícil a imposible	
py-mc	1aII	4	0.40	Fácil	
	3bI	4	0.40	Imposible	
py-GGs	1eI	4	0.40	Muy difícil a imposible	
cp-gt	1eII	4	0.40	Muy difícil a imposible	
apy-gt	2aI	1	0.10	Muy difícil a imposible	
mt-hm	2bIII	4	0.40	Muy difícil	
cv-py	3cII	4	0.40	Muy difícil a imposible	
hm-gt	1bII	4	0.40	Moderadamente fácil	
py-mc	1bIV	4	0.40	Moderadamente fácil	
py-gt	3dII	8	0.80	Muy difícil a imposible	
	4cII	4	0.40	Muy difícil a imposible	
hm-GGs	1dII	8	0.80	Imposible	
gt-GGs	1dII	4	0.40	Imposible	
	1eI	8	0.80	Muy difícil a imposible	
	1eII	4	0.40	Muy difícil a imposible	
	3dII	4	0.40	Muy difícil a imposible	
py-el-gn-GGs	1aIII	4	0.40	Fácil	
	1bIV	4	0.40	Moderadamente fácil	
	1dII	4	0.40	Imposible	
TOTAL		1002	100.00		

DISTRIBUCION ELEMENTAL EN LOS MINERALES OBSERVADOS

Los elementos que integran los minerales observados se distribuyen del modo siguiente:

Minerales auríferos:

El electrum es el mineral de oro que ha sido observado.

Minerales de Plata:

El electrum es el único mineral de plata observado.

Minerales cupríferos:

Los minerales de cobre que han sido observados son la calcopirita y la covelita.

Minerales zincíferos:

La esfalerita es el único mineral de zinc que ha sido observado.

Minerales ferríferos:

Los minerales ferríferos son la pirita, arsenopirita, marcasita, magnetita, hematita y goethita.

Minerales arseníferos:

Los minerales que contienen arsénico son la arsenopirita y el rejalgar.

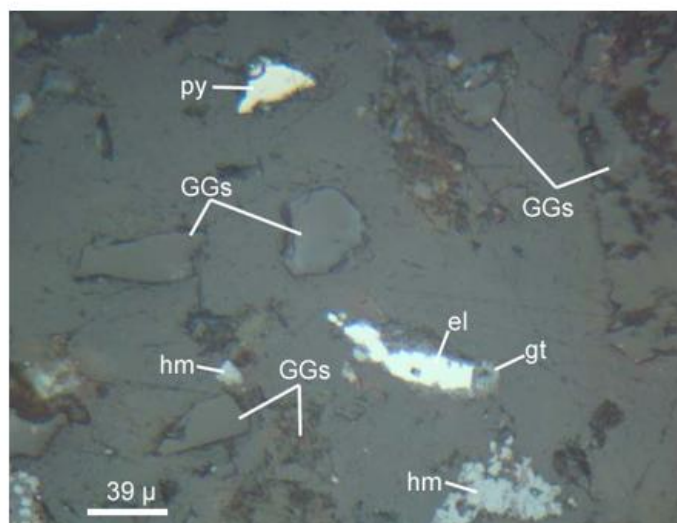
Mineral titanífero:

El rutilo es el mineral de titanio.

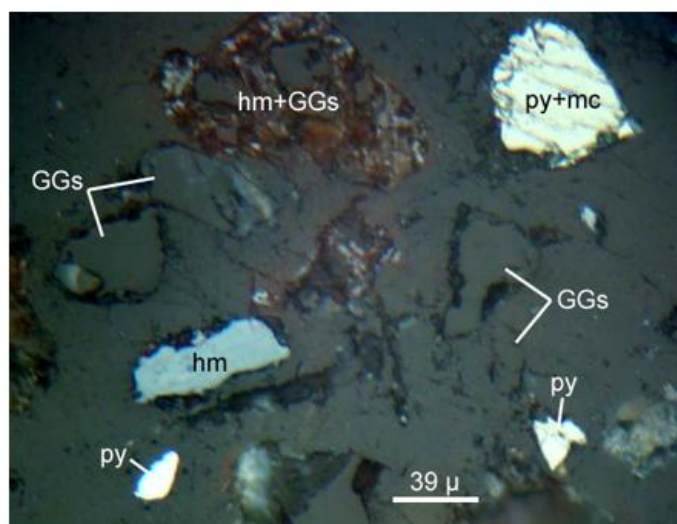
Minerales cianicidas:

Los minerales cianicidas en esta muestra son la calcopirita, esfalerita, pirita, arsenopirita, pirrotita y marcasita; además de éstos están la covelita y el rejalgar; estos dos últimos minerales se hallan en el orden de trazas.

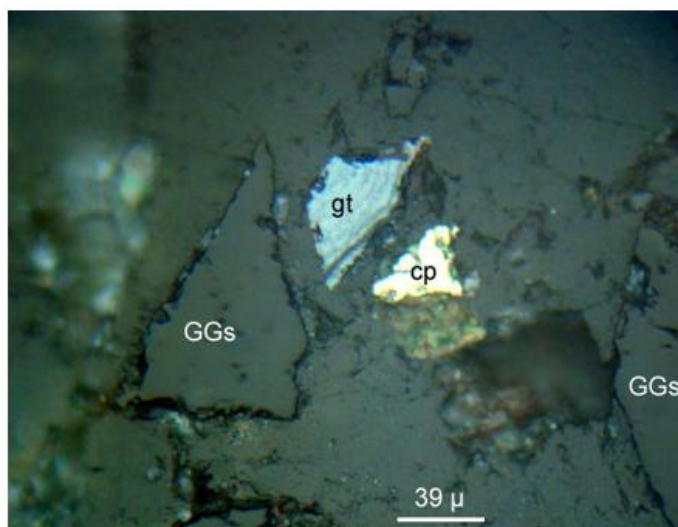
FOTOMICROGRAFIAS



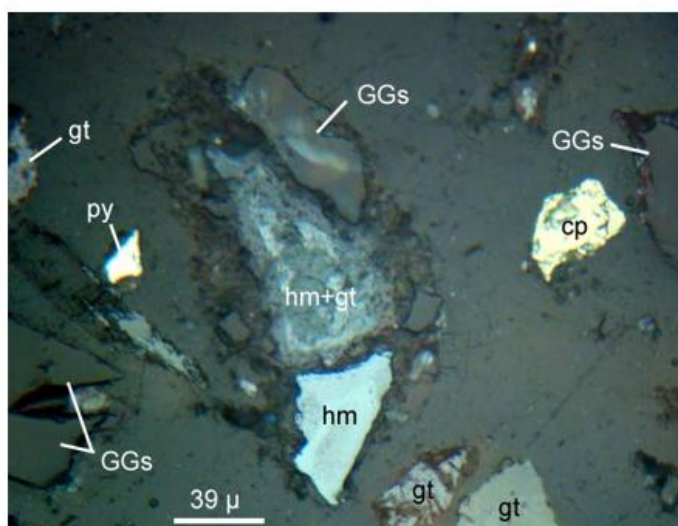
Fot. 1. Partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt); adyacente están las partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs)



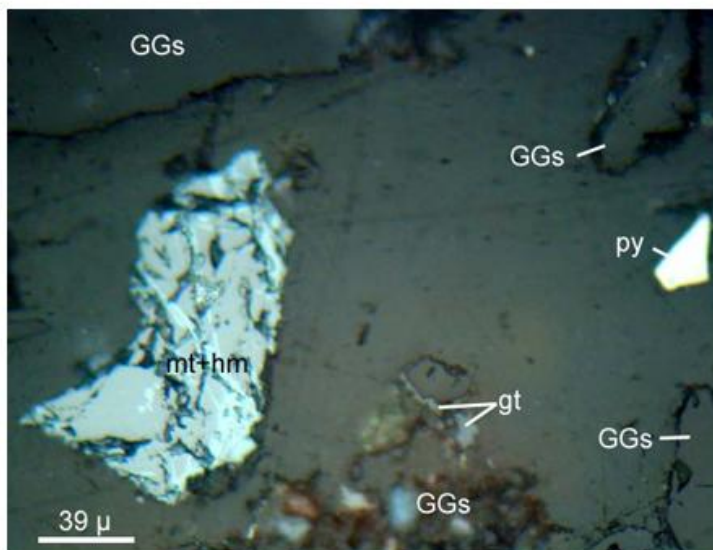
Fot. 2. Partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de pirita con la marcasita (py+mc) y de hematita con la ganga (hm+GGs).



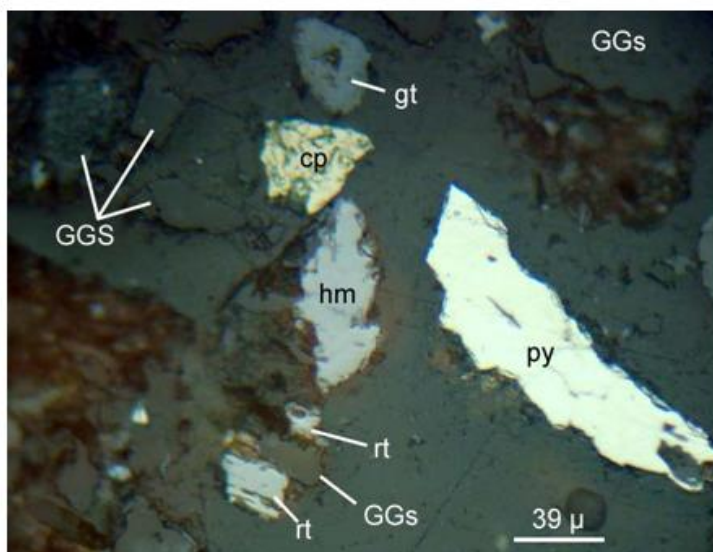
Fot. 3. Partículas libres de calcopirita 8cp, de goethita (gt) y de gangas (GGs).



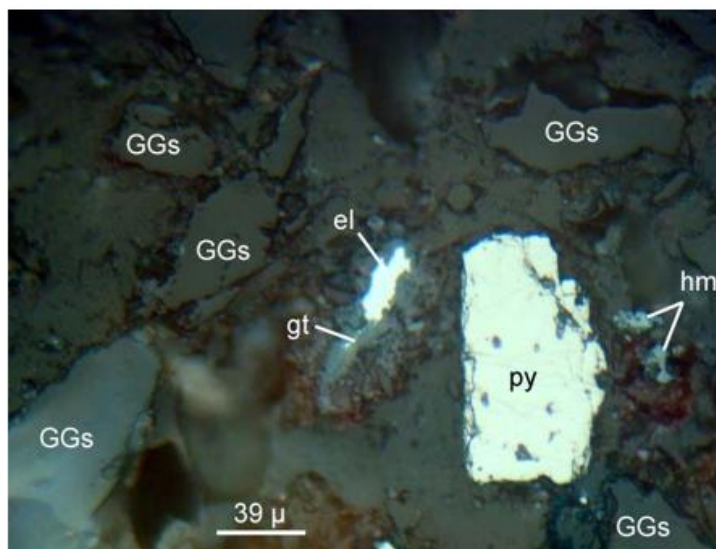
Fot. 4. Partículas libres de pirita (py), de hematita (hm) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de pirita con la marcasita (py+mc) y de hematita con la ganga (hm+GGs).



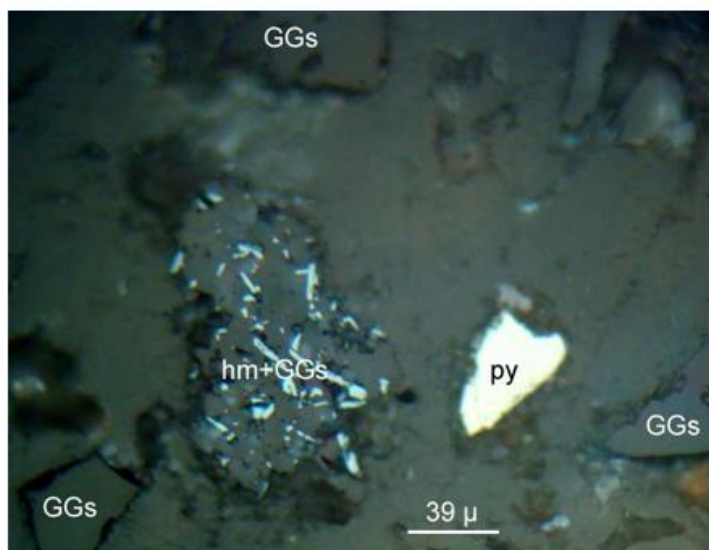
Fot. 5. Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de magnetita con la hematita (mt+hm) y de goethita (gt) con la ganga (GGs).



Fot. 6. Partículas libres de calcopirita (cp), de pirita (py), de goethita (gt) y de gangas (GGs); partículas entrelazadas de hematita (hm) con la ganga (GGs) y del rutilo (rt) con la ganga (GGs).



Fot. 7. Partículas libres de pirita (pi) y de gangas (GGs); partícula entrelazada de electrum (el) con la goethita (gt) y partícula entrelazada de hematita (hm) con la ganga (GGs).



Fot. 8. Partícula entrelazada hematita con la ganga (hm+GGs) y partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs)

TIPOS GEOMETRICOS DE INTERCRECIMIENTOS ENTRE MINERALES

POSIBILIDADES DE LIBERACION COMPLETA
MALLAS < 150

	I	II	III	IV	LIBERACION		I	II	III	IV	LIBERACION
1a SIMPLE					FACIL	2d COLOFORME					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
1b AMEBOIDE					MODERADAMENTE FACIL	3a SANDWICH					MODERADAMENTE FACIL A DIFICIL
1c GRAFICO					IMPOSIBLE	3b ESTRATIFICADO					IMPOSIBLE
1d DISEMINADO					IMPOSIBLE	3c RETICULAR					IMPOSIBLE
1e INCLUSION					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	3d VETEADO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE
2a CORONA					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4a BORDE COMPUESTO					MUY DIFICIL
2b SUB-CORONA					MUY DIFICIL	4b COMPENETRACION					MODERADAMENTE DIFICIL
2c CONCENTRICO					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE	4c INTERSTICIAL					MUY DIFICIL A IMPOSIBLE

ANEXO 7*Reporte de las leyes del suelo y la planta fitorremediadora***INFORME DE ENSAYO N° 7-01871/19**

Página 1/4

Solicitante	:	CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	:	Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
Producto declarado	:	SUELOS TEJIDO VEGETAL
Lugar de Muestreo	:	JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	:	2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	:	0.8 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	:	Pote de plástico En Bolsa de Polietileno, Cerrada Y Refrigerada
Identificación de la muestra	:	Según se indica
Fecha de recepción	:	2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	:	2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	:	2019-09-26
Ensayo realizado en	:	Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	:	HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	:	Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	----	----	----	----
ML-002	----	----	----	----
ML-003	----	----	----	----

INFORME DE ENSAYO N° 7-01871/19

Página 2/4

RESULTADOS

		<i>Estación de Muestreo</i>	ML-001
		<i>Fecha y Hora de Muestreo</i>	2019-09-09 16:00
		<i>Tipo de Muestra</i>	Suelo
<i>Parámetro</i>	<i>Límite de Detección</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultados</i>
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	3 554
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	25,60
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	102
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	59,30
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,40
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	26,70
(*) Boro (B)	1	mg/kg	2,73
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,62
Calcio (Ca)	10	mg/kg	1 488
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	6,89
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	69,34
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	39,56
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	3,26
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	35,45
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	712
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	40 134
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	1,77
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	125,6
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	1 880
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	3,11
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	17,50
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	85
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	29,66
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	651.1
Potasio (K)	10	mg/kg	1 329
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,33
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	< 1
Sodio (Na)	2	mg/kg	2 034
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,22
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	22,48
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	38,56
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	2,45
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	90,50
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	19, 44
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	302

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 7-01871/19

Página 3/4

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-002	ML-003
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 16:00	2019-09-09 16:00
		Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados
(*)Metales Totales ICP-Masa				
(*)Aluminio (Al)	2	mg/kg	509	161,7
(*)Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	0,91	0,37
(*)Arsénico (As)	0,02	mg/kg	45,6	48,5
(*)Bario (Ba)	0,04	mg/kg	12,5	4,7
(*)Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,12	0,06
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	0,06	0,23
(*) Boro (B)	1	mg/kg	0,85	0,53
(*)Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,36	0,19
(*)Calcio (Ca)	10	mg/kg	8 990	8 880
(*)Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	0,81	0,16
(*)Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	38,7	27,6
(*)Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	0,50	0,18
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	0,21	0,02
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	22	18,1
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	382	395
(*) Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	561	283
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	0,44	0,22
(*) Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 878	1 632
(*) Manganeseo (Mn)	0,03	mg/kg	48,5	31,0
(*) Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,29	0,47
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	3,82	0,33
(*) Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	0,40	0,10
(*) Plata (Ag)	0,02	mg/kg	0,09	0,24
(*) Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	211,4	235,1
(*) Potasio (K)	10	mg/kg	575	785
(*) Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,29	0,07
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	0,50	0,50
(*) Sodio (Na)	2	mg/kg	1 539	820
(*) Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,02	0,03
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	0,08	0,04
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	6,5	3,8
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	1,54	0,10
(*) Vanadio (V)	0,02	mg/kg	28,3	0,71
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	0,46	0,07
(*) Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	29,4	27,4

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 7-01871/19

Página 4/4

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Eddie Mendoza Zamani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

INFORME DE ENSAYO N° 8-01871/19

Página 1/4

Solicitante : CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL

Domicilio legal : Urb, La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete

Producto declarado : **SUELOS**
TEJIDO VEGETAL

Lugar de Muestreo : JAQUI – CARAVELI

Fecha de Muestreo : 2019-09-09

Cantidad de Muestras para el Ensayo : 0.8 Kilogramos
Muestra proporcionada por el solicitante

Forma de Presentación : Pote de plástico
En Bolsa de Polietileno, Cerrada Y Refrigerada

Identificación de la muestra : Según se indica

Fecha de recepción : 2019-09-10

Fecha de inicio del ensayo : 2019-09-24,

Fecha de término del ensayo : 2019-09-26

Ensayo realizado en : Laboratorio Ambiental Arequipa

Identificado con : **HS (EXMA-14997-2019)**

Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	-----	-----	-----	-----
ML-002	-----	-----	-----	-----
ML-003	-----	-----	-----	-----

INFORME DE ENSAYO N° 8-01871/19

RESULTADOS

Página 2/4

		Estación de Muestreo	ML-001
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 17:00
		Tipo de Muestra	Suelo
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	3 648
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	24,5
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	101,8
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	58,90
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,38
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	24,8
(*) Boro (B)	1	mg/kg	2,78
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,55
Calcio (Ca)	10	mg/kg	1 407
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	7,11
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	75,44
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	43,44
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	3,16
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	41,55
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	699
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	40 844
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	1,94
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	132,6
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	1 990
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	3,45
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	19,92
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	88
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	33,48
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	622,7
Potasio (K)	10	mg/kg	1 401
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,27
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	< 1
Sodio (Na)	2	mg/kg	2 086
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,28
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	20,19
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	41,20
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	2,66
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	88,46
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	22,33
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	310

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 8-01871/19

Página 3/4

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-002	ML-003
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 17:00	2019-09-09 17:00
		Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados
(*)Metales Totales ICP-Masa				
(*)Aluminio (Al)	2	mg/kg	503	157,6
(*)Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	0,81	0,33
(*)Arsénico (As)	0,02	mg/kg	45,5	49,2
(*)Bario (Ba)	0,04	mg/kg	13,8	4,60
(*)Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,02	0,04
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	0,09	0,18
(*) Boro (B)	1	mg/kg	0,73	0,61
(*)Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,46	0,23
(*)Calcio (Ca)	10	mg/kg	9 011	8 852
(*)Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	0,35	0,22
(*)Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	41,9	22,4
(*)Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	0,40	0,22
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	0,11	0,04
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	21,0	18,7
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	352	308
(*) Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	589	286
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	0,51	0,24
(*) Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 883	1 626
(*) Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	47,3	31,5
(*) Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,32	0,48
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	3,39	0,39
(*) Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	0,70	0,13
(*) Plata (Ag)	0,02	mg/kg	0,04	0,18
(*) Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	200,8	236,3
(*) Potasio (K)	10	mg/kg	617	791
(*) Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,33	0,14
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	0,10	0,40
(*) Sodio (Na)	2	mg/kg	1 532	805
(*) Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,01	0,01
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	0,05	0,08
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	7,6	3,2
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	1,68	0,10
(*) Vanadio (V)	0,02	mg/kg	27,9	0,78
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	0,49	0,05
(*) Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	28,7	27,8

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 8-01871/19

Página 4/4

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Edite Mendoza Zamani
C.O.P. N° 776
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA

INFORME DE ENSAYO N° 9-01871/19

Página 1/4

Solicitante	: CASTILLON HILARIO, FLOR ANGEL
Domicilio legal	: Urb. La Vivienda Santa Bárbara Mz. L lote 146 - San Luis - Cañete
Producto declarado	: SUELOS TEJIDO VEGETAL
Lugar de Muestreo	: JAQUI – CARAVELI
Fecha de Muestreo	: 2019-09-09
Cantidad de Muestras para el Ensayo	: 0.8 Kilogramos Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	: Pote de plástico En Bolsa de Polietileno, Cerrada Y Refrigerada
Identificación de la muestra	: Según se indica
Fecha de recepción	: 2019-09-10
Fecha de inicio del ensayo	: 2019-09-24,
Fecha de término del ensayo	: 2019-09-26
Ensayo realizado en	: Laboratorio Ambiental Arequipa
Identificado con	: HS (EXMA-14997-2019)
Validez del documento	: Este documento es válido solo para la muestra descrita

Proyecto:				
Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Descripción de la Estación de Monitoreo	Observaciones
	ESTE	NORTE		
ML-001	----	----	----	----
ML-002	----	----	----	----
ML-003	----	----	----	----

INFORME DE ENSAYO N° 9-01871/19

Página 2/4

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-001
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 18:00
		Tipo de Muestra	Suelo
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados
Metales Totales ICP-Masa			
Aluminio (Al)	2	mg/kg	3 830
Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	28,2
Arsénico (As)	0,02	mg/kg	101
Bario (Ba)	0,04	mg/kg	57,28
Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,39
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	25,05
(*) Boro (B)	1	mg/kg	2,99
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	1,37
Calcio (Ca)	10	mg/kg	1 507
Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	7,33
Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	71,92
Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	41,80
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	3,66
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	41,11
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	691
Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	40 380
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	1,90
Magnesio (Mg)	1	mg/kg	132,87
Manganeso (Mn)	0,03	mg/kg	1 935
Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	3,26
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	17,95
Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	86
Plata (Ag)	0,02	mg/kg	31,69
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	637,5
Potasio (K)	10	mg/kg	1 425
Selenio (Se)	0,03	mg/kg	2,31
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	< 1
Sodio (Na)	2	mg/kg	2 039
Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,25
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	23,18
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	40,54
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	2,48
Vanadio (V)	0,02	mg/kg	88.94
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	19,22
Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	322

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 9-01871/19

Página 3/4

RESULTADOS

		Estación de Muestreo	ML-002	ML-003
		Fecha y Hora de Muestreo	2019-09-09 18:00	2019-09-09 18:00
		Tipo de Muestra	Tejido Vegetal	Tejido Vegetal
Parámetro	Límite de Detección	Unidad	Resultados	Resultados
(*)Metales Totales ICP-Masa				
(*)Aluminio (Al)	2	mg/kg	521	169,7
(*)Antimonio (Sb)	0,04	mg/kg	0,89	0,35
(*)Arsénico (As)	0,02	mg/kg	45,3	49,1
(*)Bario (Ba)	0,04	mg/kg	12,1	4,80
(*)Berilio (Be)	0,01	mg/kg	0,10	0,05
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	0,09	0,22
(*) Boro (B)	1	mg/kg	0,64	0,69
(*)Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	0,41	0,21
(*)Calcio (Ca)	10	mg/kg	9 005	8 863
(*)Cobalto (Co)	0,02	mg/kg	0,40	0,13
(*)Cobre (Cu)	0,02	mg/kg	40,9	26,8
(*)Cromo (Cr)	0,2	mg/kg	0,90	0,20
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	0,13	0,03
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	20	18,3
(*) Fósforo (P)	1	mg/kg	362	303
(*) Hierro (Fe)	0,50	mg/kg	575	280
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	0,49	0,20
(*) Magnesio (Mg)	1	mg/kg	1 915	1 620
(*) Manganeseo (Mn)	0,03	mg/kg	47,9	31,4
(*) Mercurio (Hg)	0,03	mg/kg	0,17	0,46
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	3,68	0,42
(*) Niquel (Ni)	0,10	mg/kg	0,40	0,19
(*) Plata (Ag)	0,02	mg/kg	0,08	0,27
(*) Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	200,3	234,8
(*) Potasio (K)	10	mg/kg	599	788
(*) Selenio (Se)	0,03	mg/kg	0,34	0,12
(*) Silicio (Si)	1	mg/kg	0,50	0,10
(*) Sodio (Na)	2	mg/kg	1 549	814
(*) Talio (Tl)	0,02	mg/kg	0,03	0,02
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/kg	0,02	0,03
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	7,20	2,90
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	1,64	0,10
(*) Vanadio (V)	0,02	mg/kg	28,7	0,76
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	0,52	0,03
(*) Zinc (Zn)	0,02	mg/kg	30,1	27,9

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO N° 9-01871/19

Página 4/4

MÉTODOS

Metales Totales ICP-Masa: EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Arequipa, 09 de octubre de 2019

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

Lic. Edgardo Mendoza Samani
C.G.P. N° 754
JEFE DEL LABORATORIO AREQUIPA