

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE FITOESTABILIZACIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES DE
LA MINERA LOS MAITENES EN LA COMUNA DE PUCHUNCAVI

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Técnico Universitario en
MINERÍA Y METALURGIA

Alumno:

William Eduardo Acevedo Vega

Profesor Guía:

Ing. Marcelo Rojas Vidal

2018

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, William y María, agradecerles por los largos 24 años de enseñanzas, amor y responsabilidad, en donde decidieron someterse a la prueba más difícil de sus vidas, la cual es, criar y formar hombres de bien.

El camino ha sido sinuoso, estresante y agotador, donde cada muestra de apoyo y preocupación me hacían sentir que no estaba solo, si no que tenía a la familia junto a mí, padres, abuelos, tíos, hermanos, que a pesar de todo, estaban ahí, entregando palabras de aliento, para no quedar en el camino.

Por último, quiero agradecer a la vida, a las coincidencias, a las situaciones, y a ese poder superior, por poner frente a mí, a una compañera de vida sin igual, una mujer que estuvo, está y estará apoyándome de forma incondicional, donde día a día, me entregaba una inyección de ánimo, y sin su apoyo, llegar hasta acá hubiese sido mucho más difícil, hablo de Yessenia, quien nunca puso en duda mi capacidad, y siempre confió en mí.

RESUMEN EJECUTIVO

KEYWORDS: RELAVE – PUCHUNCAVÍ– FITOESTABILIZACIÓN

Existen en Chile más de 600 depósitos de relaves, de los cuales 100 se encuentran en estado de abandono. Debido a la gran cantidad de relaves abandonados es que se sugiere una fitoestabilización para uno de ellos.

El depósito de relaves que se propone intervenir se encuentra en la comuna de Puchuncaví, y pertenece a la Minera los Maitenes, el estado actual de este depósito de relaves es de abandono, por lo que tiene un gran potencial de generar un perjuicio a la flora y fauna aledaña.

La propuesta de estabilización a este depósito de relaves se le conoce como fitoestabilización, técnica de bajo costo que emplea especies vegetales como principal agente estabilizante, debido a que, algunas de ellas tienen la capacidad de absorber y retener metales pesados en su sistema radicular, hojas y tallo, a estas plantas se les conoce con el nombre de metalófitas.

Existe gran variedad de plantas metalófitas, pero al hacer un estudio comparativo previo entre decenas de plantas, se seleccionaron aquellas que son nativas a la zona en donde se ubica el depósito de relaves, es decir se seleccionaron especies vegetales nativas de la quinta región, con el propósito de que al emplear esta técnica no se incorpore flora invasora al ecosistema de la región y por consiguiente pueda causar algún desequilibrio ecológico.

Además se hará una cuantificación de gastos en adquisición de las plantas a emplear, para ello, se puso en contacto con un proveedor de plantas nativas de la región, específicamente con el vivero Pocochay, ubicado en Quillota, en donde tenían los medios para proporcionar las especies seleccionadas en la propuesta de fitoestabilización de la Minera los Maitenes.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

CAPÍTULO 1: MINERA LOS MAITENES

1. <u>MINERA LOS MAITENES</u>	4
1.1. PROCESO PRODUCTIVO DE LA MINERA LOS MAITENES	5
1.1.1. Conminución	5
1.1.2. Flotación	6
1.1.3. Secado	8
1.1.4. Flowsheet de la Minera los Maitenes	8
1.2. FORMACIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES	9
1.3. RIESGOS ASOCIADOS AL TRANQUE DE RELAVES	10
1.4. IMPACTO AMBIENTALE DE LOS TRANQUES DE RELAVES	12
1.4.1. Contaminación atmosférica	12
1.4.2. Contaminación hídrica	13
1.4.3. Contaminación química.....	13
1.4.3.1. Erosión y sedimentación	14
1.4.3.2. Contaminación de suelo	14
1.4.4. Impacto paisajístico	15
1.4.5. Impactos Sociales y culturales	16
1.5. POLÍTICAS MEDIOAMBIENTALES APLICABLES AL TRANQUE DE RELAVES DE LA MINERA LOS MAITENES	16
1.5.1. Ley 19300.....	16
1.5.2. Ley 20551	16
1.5.3. Ley N° 20.819	17
1.6. PASIVOS AMBIENTALES MINEROS	17

CAPÍTULO 2: DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE

2. <u>DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE</u>	20
2.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS TRANQUES DE RELAVES EN CHILE.....	20
2.2. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES	22
2.2.1. Fito-remediación	22
2.2.1.1. Fito-estabilización	23

2.2.1.2. Fito-filtración.....	24
2.2.1.3. Fito-volatilización	25
2.2.1.4. Fito-extracción.....	25
2.2.2. Control del drenaje ácido	26
2.2.2.1. Prevención	27
2.2.2.2. Remediación	27
2.3. EXPERIENCIA CHILENA EN LA FITOREMEDIACIÓN DE TRANQUES DE RELAVES.....	28
2.3.1. Minera Lo Aguirre.....	28
2.3.2. Faena el Indio	30
2.3.3. Planta Matta.....	31
2.4. VENTAJAS COMPARATIVAS DE LA FITOESTABILIZACIÓN.....	32

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE FITO-ESTABILIZACIÓN PARA LA MINERA LOS MAITENES

<u>3. PROPUESTA DE FITO ESTABILIZACIÓN PARA LA MINERA LOS MAITENES</u>	35
3.1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE PUCHUNCAVÍ.....	35
3.2. TOPOGRAFÍA DE PUCHUNCAVÍ	35
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL DEPÓSITO DE RELAVES DE LA MINERA LOS MAITENES	36
3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA FLORA ENDÉMICA DE LA REGIÓN.....	37
3.5. ELECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES PARA FITOESTABILIZAR	38
3.5.1. Baccharis linearis	39
3.5.2. Schinus polygamus.....	39
3.5.3. Oenothera coquimbensis	40
3.6. CUANTIFICACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES EN LA SUPERFICIE A INTERVENIR	41
3.6.1. Cuantificación de plantas	42
3.6.2. Disposición de O. coquimbensis	43
3.6.3. Cuantificación de Baccharis linearis y Schinus polygamus	44
3.7. PROVEEDOR DE PLANTAS ENDÉMICAS Y COSTOS ASOCIADOS	45
3.8. SÍNTESIS GENERAL DEL PLAN DE FITOESTABILIZACIÓN.....	46
<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	48
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	50
<u>ANEXO A: GLOSARIO</u>	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Imagen satelital minera Los Maitenes

Figura 1-2: Molino de bolas

Figura 1-3: Celda de flotación, sulfuro de cobre

Figura 1-4: Esquema filtro de prensa horizontal

Figura 1-5: Flowsheet Minera los Maitenes.

Figura 1-6: Imagen satelital del tranque de relaves Minera Los Maitenes

Figura 1-7: Embalse de relaves, Anglo American División el Soldado

Figura 1-8: Imagen referencial contaminación de aguas por relave

Figura 1-9: Impactos paisajístico de tranque de relaves

Figura 2-1: Drenaje de tranque de relave

Figura 2-2: Especies de plantas Fito-estabilizadoras

Figura 2-3: Especies de plantas Fito-Filtradoras de metales

Figura 2-4: Especie de planta para la Fito-volatilización

Figura 2-5: Especies de plantas híper acumuladoras de metales

Figura 2-6: Mina Lo Aguirre pre-cierre

Figura 2-7: Mina Lo Aguirre post-cierre

Figura 2-8: Ubicación Faena el Indio

Figura 2-9: Mapa Planta Manuel Antonio Matta

Figura 2-10: Fitoestabilización exitosa de El vertedero Vall d' en Joan de Barcelona, España

Figura 3-1: Altitud en donde se ubica el depósito de relaves

Figura 3-2: Imagen satelital del tranque de relaves Minera Los Maitenes

Figura 3-3: Especies de plantas endémicas de la V región

Figura 3-4: Romerillo

Figura 3-5: Árbol Schinus polygamus

Figura 3-6: O. coquimbensis

Figura 3-7: Ejemplo de disposición de plantas

Figura 3-8: Área a intervenir con Oenothera coquimbensis

Figura 3-9: Área a intervenir con B. linearis y S. polygamus

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Datos Compañía Minera Los Maitenes

Tabla 1-2: Procedencia y efectos toxicológicos de los metales pesados

Tabla 2-1: Depósitos de relaves en Chile

Tabla 3-1: Número de plantas para fitoestabilización

Tabla 3-2: Valor asociado a las especies seleccionadas en la fitoestabilización

Tabla 3-3: Costo asociado a las especies vegetales en CLP

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

DAM	: Drenaje Ácido de la Minería
DS	: Decreto Supremo
ENAMI	: Empresa Nacional de Minería
HDPE	: High Density Polyethylene
M.S.N.M.	: Metros Sobre el Nivel del Mar
PAM	: Pasivo Ambiental Minero
PIB	: Producto Interno Bruto
SEIA	: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SERNAGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería

SIMBOLOGÍA

°C	: Grados Celsius
cm	: Centímetro
g	: Gramo
Kg	: Kilogramo
m	: Metro
m ²	: Metro cuadrado
mm	: Milímetro
pulg	: Pulgada
µm	: Micra

INTRODUCCIÓN

Desde la época precolombina, Chile, ha estado ligado a la minería, los primeros en explotar los minerales de nuestro país fueron los Atacameños. Esta etnia indígena vivía en los valles de la cordillera de las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Extraían cobre en la zona donde hoy se ubica Chuquicamata y obtenían oro desde el volcán Inca Huasi ubicado en el límite argentino-chileno.

El rumor de que Chile poseía una gran riqueza mineral, animó a los españoles a explorar y asentarse en el territorio. Si bien la riqueza no se comparaba con la hallada en los yacimientos de Perú y México, sirvió para financiar las primeras etapas de colonización acompañados de la esclavitud indígena

En la primera década del siglo XXI, la industria minera fijó los ojos en Chile, como consecuencia de la estabilidad política que llevaba el país, y como antecedente adicional el capital humano tiene una amplia tradición minera además de estar calificado para desempeñar labores en dicha industria.

Lamentablemente el atractivo comercial que genera Chile a los capitales extranjeros, ha impactado de forma negativa al medio ambiente, debido a que recién ahora, después de décadas de una creciente industria minera, se está tomando mayor rigurosidad con el manejo y disposición de los residuos mineros.

Los residuos mineros son altamente contaminantes, debido a la emisión de material particulado fino, y la concentración de metales pesados (aluminio, arsénico, asbesto, cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, mercurio, zinc y otros), estos desechos industriales son llevados a un tranque artificial, y son depositados ahí hasta que el volumen del tranque llegue a su máxima capacidad, determinado mediante estudios técnicos.

Mediante este trabajo se propondrá fitoestabilizar un relave en particular, con el objetivo de evitar que los elementos químicos que posee esta piscina de desechos mineros, sean esparcidos a causa de las condiciones climáticas, evitando así, que grandes concentraciones de relave se incorporen al medio ambiente de forma agresiva, dañando flora y fauna local, además de los acuíferos circundantes.

Las concentraciones de estos metales pesados son bajas, pero sobrepasan a la norma internacional de suelos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer un plan de fito-estabilización al tranque de relaves de La Minera Los Maitenes, utilizando plantas metalófitas proporcionando una alternativa sustentable a la contaminación por metales pesados al medio ambiente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer el proceso productivo de la Minera los Maitenes, como antecedente a la conformación de su depósito de relaves, y la normativa chilena aplicable a estos.
- Revisar las experiencias chilenas e internacionales en la estabilización de depósitos de relaves definiendo alternativas de estabilización.
- Establecer una propuesta técnica de un plan de fitoestabilización para la Minera los Maitenes, cuantificando gastos asociados a la implementación.

CAPÍTULO 1: MINERA LOS MAITENES

1. MINERA LOS MAITENES

La minera Los Maitenes se ubica en la V región, en la comuna de Puchuncaví, en el ex fundo El Carrizo. Está emplazada en una zona industrial, frente a la bahía de Quintero. Su topografía es plana y se encuentra a nivel del mar. Ver figura 1-1



Fuente: Google earth

Figura 1-1: Imagen satelital minera Los Maitenes

Esta mina, es una filial de la Compañía Minera Tocopilla, creada en el año 1996 para procesar escorias de reverbero de la Fundición Ventanas de Enami. La planta entra en operaciones en febrero de 1998 con una capacidad de procesamiento de 90.000 toneladas de escorias al mes, produciendo anualmente alrededor de 30.000 toneladas de concentrados de cobre.

Minera Los Maitenes, tenía un contrato a 5 años con Enami Ventanas, Contrato el cual estipulaba que, Enami abastecería a la planta con escorias del horno reverbero con una ley promedio de 1,35% de cobre.

En la actualidad, Minera Los Maitenes está en plan de cierre forzada por SERNAGEOMIN, ya que existe un problema contractual, en donde presuntamente ENAMI no habría cumplido el contrato ofrecido, por lo cual, los nuevos dueños de Minera Los Maitenes no han querido cerrar la planta, dado que, aún creen en la posibilidad de que Enami cumpla su parte del contrato. Ver tabla 1-1

Tabla 1-1: Datos Compañía Minera Los Maitenes

NOMBRE EMPRESA	NOMBRE FAENA	TIPO INSTALACIÓN	PASTA
Roberto Enrique Estay Valencia	Mina La Vermuda	Mina Rajo Abierto	Óxidos de Cobre
Cristián Vera Vega	La Vermuda	Mina Rajo Abierto	Óxidos de Cobre
Juan José Rojas Frez	Mina Blanca	Mina Rajo Abierto	Óxidos de Cobre
Juan José Rojas Frez	Mina La Turca de Cobre	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Edith Pienovi López	Mina El Álamo	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Zulema Vargas	Mina El Álamo	Mina Rajo Abierto	Sulfuros de Cobre
Mario Saavedra Tapia	Las Hualtatas	Refinación Electrolítica	Óxidos de Cobre
Edith Pienovi López	Mina Las Hualtatas 1 al 20	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Minera Los Cascajos S.A.	Mina Las Hualtatas 1 al 20	Mina Subterránea	Óxidos de Cobre
Lupericio del Carmen Perez Bernal	Mina Las Hualtatas	Mina Rajo Abierto	Óxidos de Cobre
Mra. Julio Cesar Contreras Elgueta E.I.R.L.	Las Hualtatas 1/20	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Edith Pienovi López	Socavón S/N	Mina Subterránea	Sulfuro Aurífero
Ernesto Marchant B. Ecom.	Mina La Patagua	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Ernesto Marchant B. Ecom.	Azulina 1/4 Pucalán	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Cía. Mra. La Patagua	Mina Cacao	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Javier Segundo Castillo Vega	Mina La Ponderosa	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Minera BCS Ltda.	Mina Ponderosa de Puchuncaví	Mina Subterránea	Sulfuros y Óxidos de Cobre
Inversiones Y Minerías Erfurt S.A.	Mina La Ponderosa	Mina Subterránea	Sulfuros de Cobre
Minera Montecarmelo S.A.	Planta Don Manuel	.ix. y Extrac. por Solventes	Sulfuros de Cobre
Cía. Mra. Los Maitenes S.A.	Planta Los Maitenes	Planta Concentración	Sulfuros de Cobre
Corporación Nacional del Cobre (CODELCO)	CODELCO Chile División Ventanas	Fundición	Cobre - Molibdeno - Oro - Plata
Corporación Nacional del Cobre (CODELCO)	CODELCO Chile División Ventanas	Fundición	Cobre - Molibdeno - Oro - Plata
Corporación Nacional del Cobre (CODELCO)	CODELCO Chile División Ventanas	Fundición	Cobre - Molibdeno - Oro - Plata

Fuente: Atlas de faenas mineras de Chile, Servicio nacional de geología y minería

1.1. PROCESO PRODUCTIVO DE LA MINERA LOS MAITENES

Minera Los Maitenes es una planta de procesamiento capaz de tratar escorias del horno de reverbero de Enami, Ventanas. En sus instalaciones cuenta con molinos de bolas, celdas de flotación, y un equipo de secado. Estos equipos permiten a la Minera extraer concentrado de cobre con una ley promedio de 30% de este mineral.

1.1.1. Conminución

La conminución, es el conjunto de técnicas empleadas para reducir el tamaño de la roca en cualquier procesamiento de mineral. Minera Los Maitenes, para reducir el tamaño de la mena, utilizó molinos de bola, estos equipos trituran la roca hasta obtener granulometrías en un rango de 10 a 300 μm . El tamaño óptimo de partícula para ser flotada es de 75 μm .

Durante el proceso de molienda del mineral, se agregan reactivos de flotación, para poder captar en el siguiente proceso los sulfuros de cobre y así concentrar el mineral útil, y desechar el estéril o ganga. Ver figura 1-2



Fuente: <https://www.metso.com/es/productos/molienda/molinos-de-bolas-y-pebbles/>

Figura 1-2: Molino de bolas

1.1.2. Flotación

La flotación es un proceso heterogéneo, es decir, involucra más de una fase, éstas son sólido (mineral), líquido (agua) y gaseosa (aire).

Consiste en la separación selectiva de especies minerales de acuerdo a sus propiedades superficiales de adhesión a burbujas de aire. La adhesión del mineral está relacionada con la polaridad de las partículas, donde los minerales apolares son hidrofóbicos, y los polares son hidrofílicos.

La pulpa que proviene de la molienda, tiene incorporados los reactivos necesarios para la flotación, estos son, espumantes, colectores, depresantes y modificadores de pH, este material se introduce en una especie de contenedores, similares a piscinas, llamados celdas de flotación. Desde el fondo de la celda se inyecta aire a presión, y se hace burbujear la mezcla en constante agitación.

Las burbujas arrastran consigo los minerales apolares hacia la superficie, en este caso sulfuro de cobre, donde rebasan por el borde de la celda hacia canaletas que la conducen a tanques especiales para un posterior tratamiento. Ver figura 1-3.

En todo el proceso productivo de extracción de cobre, se pudo evidenciar la alta cantidad de químicos utilizados en la concentración y refinación de minerales, lo cual, genera una gran cantidad de desechos.

La minería es una industria que genera muchos residuos, tanto líquidos como sólidos, los residuos líquidos son depositados en tranques o piscinas de relaves, los sólidos en los botaderos de estériles y botaderos de ripios de lixiviación, según el sólido a desechar, además, las propia infraestructura minera, una vez que ha finalizado la faena, también pasa a formar parte de los desechos industriales mineros.

Antes de la nueva legislación de Cierre de Faenas e instalaciones Mineras, que entró en vigencia en noviembre del año 2012, no existía una obligación por parte de la empresa, en aplicar un plan de cierre una vez que la extracción de mineral ya ha concluido, o sea que no estaba normado, por lo cual, los desechos industriales mineros se dejaban en el área de operación, y quedaba a criterio de la empresa el cierre de faena.

Debido a lo anterior, surgen los PAM, pasivos ambientales mineros, debido a décadas de extracción mineral inconsciente, estos son elementos de origen antropogénico que tienen un alto potencial de generar daño al medio ambiente y al hombre.



Fuente: <http://procesosbio.wikispaces.com/Flotaci%C3%B3n>

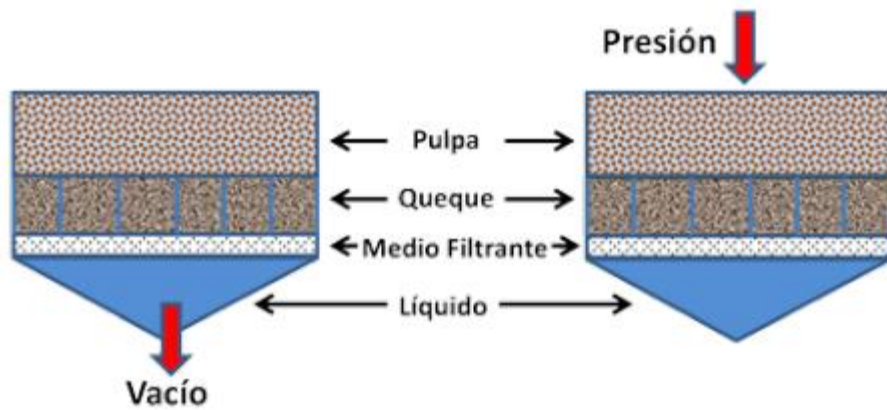
Figura 1-3: Celda de flotación, sulfuro de cobre

1.1.3. Secado

Este proceso es utilizado para retirar la mayor cantidad de humedad al concentrado de cobre.

Minera Los maitenes, utilizaba filtros de prensa de placas horizontales. Estos filtros tienen múltiples placas horizontales por donde pasa una tela filtrante continua. En su parte inferior posee un drenaje y en la parte superior cada cámara tiene un diafragma.

Estos filtros se alimentan a presión con la pulpa proveniente de la flotación, llenando la parte inferior de cada cámara. Luego se inyecta agua en la parte superior sobre el diafragma, presionando la pulpa para ayudar a la filtración y formación del queque. Ver figura 1-4.



Fuente: http://www.fundaciontecnologica.cl/sonami/wpcontent/uploads/2017/05/Art%C3%ADculo-FT-Bolet%C3%ADn-Minero-1300_2016_06.pdf

Figura 1-4: Esquema filtro de prensa horizontal

1.1.4. Flowsheet de la Minera los Maitenes

Para simplificar el proceso productivo de la Minera los Maitenes es que se ha hecho un flowsheet, en donde, indica cada uno de los equipos necesarios para tratar la escoria de cobre, y producir un concentrado. Ver figura 1-5

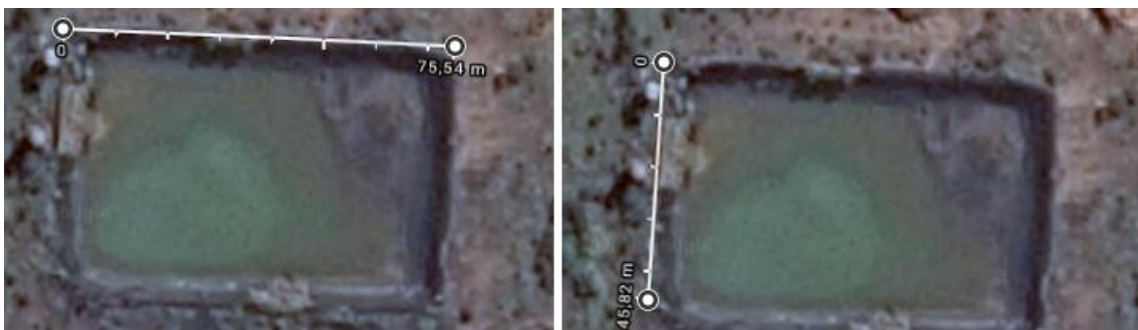


Fuente: Elaboración propia con datos entregados por SERNAGEOMIN

Figura 1-5: Flowsheet Minera los Maitenes.

1.2. FORMACIÓN DEL TRANQUE DE RELAVES

Los residuos que se generan en la flotación y secado se envían al tranque de relaves, estos residuos contienen una mezcla de silicatos, metales pesados, agua, entre otras cosas. Las dimensiones del tranque de relaves aproximadamente 70 m de largo por 45 m de ancho. El principal componente de estos residuos son minerales sulfurados, sílice y cal, estos últimos se utilizan en el horno de reverbero para que reaccione con el azufre y el óxido de hierro, formando parte de la escoria de reverbero. Ver figura 1-6



Fuente: Google earth

Figura 1-6: Imagen satelital del tranque de relaves Minera Los Maitenes

Los metales pesados que contiene este relave son numerosos, estos son, Arsénico, Cromo, Cobre, Mercurio, Plomo y Niquel, pero existen dos elementos que están sobre la norma chilena para los suelos agrícolas, este es el caso del cobre y plomo, esta norma es utilizada ya que Chile no posee una normativa de suelos que regule las concentraciones de metales pesados.

La norma permite 100 mg/kg de Cobre y 50 mg/kg de Plomo en suelos agrícolas en la macro zona norte del país.

La concentración de Cu que presenta el tranque es de 362 mg/kg y la de plomo es de 84 mg/kg, datos entregados por un trabajador de la planta, el cual estaba encargado de medir las concentraciones de relave.

A continuación, se adjunta una tabla para conocer los metales pesados que se pueden presentar en el tranque de relaves y su efecto toxicológico, según el tipo de mineral de interés extraído desde la mina. Ver tabla 1-2

Tabla 1-2: Procedencia y efectos toxicológicos de los metales pesados

Elemento	Procedencia	Efecto toxicológico
Arsénico	Minería del cobre y plata. Presente en fuentes naturales entre las regiones de Tarapacá y Coquimbo ubicadas en la Cordillera de los Andes	Veneno y elemento cancerígeno. Serio riesgo para la salud humana, en particular cuando la población está expuesta a dos o más fuentes contaminadas.
Cadmio	Minería del cobre en el norte y centro de Chile	Afecta el sistema renal.
Cromo	Yacimientos de nitratos en el norte de Chile	En su forma hexavalente (Cr+6) es un elemento cancerígeno.
Plomo	Puede estar presente en depósitos cupríferos.	Afecta el sistema renal y nervioso. Los niños son afectados en forma especial.

Fuente: Oyarzún, J. Minería y contaminación del agua: ¿cuando es necesario preocuparse?

1.3. **RIESGOS ASOCIADOS AL TRANQUE DE RELAVES**

Como subproducto de la concentración de minerales sulfurados, se obtiene el relave de flotación, el cual se caracteriza por contener una fracción insignificante de cobre en relación a la Ley original, concentraciones de metales pesados como el cadmio, mercurio y plomo, y metaloides como el arsénico, que aún en concentraciones bajas, es dañino para el ser humano y el ecosistema.

Chile no posee una norma de suelos la cual regularice los parámetros de metales pesados permitidos, sin embargo, existe una norma de lodos que se utiliza para determinar los límites máximos de metales pesados contenidos en el suelo.

Uno de los temas relevantes asociados a las faenas mineras es la construcción de depósitos de relaves y su disposición, ya que estas instalaciones son las más representativas al momento de revisar o evaluar los impactos ambientales de la industria.

La Norma Chilena que trata como se debe construir y diseñar un Depósito de Relaves, es el DS 248, “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de Relaves”, publicada el 11 de Abril del 2007. Además todo proyecto de construcción de un Depósito de Relaves, debe cumplir con su aprobación en el SEIA, es decir, haber presentado un Estudio de Impacto Ambiental correspondiente, junto con su aprobación.

Sumado a lo anterior, actualmente se debe cumplir con la Ley acerca del Cierre de Faenas Mineras, que incluye a los depósitos de relaves, botaderos y rípios de lixiviación, es decir, con la Ley 20551, 2012, que “Regula el cierre de faenas e instalaciones Mineras”. Los residuos que contienen estos depósitos, provienen de plantas de concentración de minerales por flotación.

La relevancia que han adquirido estos depósitos en la Industria Minera Chilena, se debe a que las leyes de los minerales de los yacimientos en explotación, han disminuido y ha obligado a las empresas mineras a extraer grandes volúmenes de mineral, para lograr mantener sus niveles de producción, donde se genera una relación inversamente proporcional entre la ley mineral y los residuos, ya que si existe una mayor ley mineral, los desechos son menores, por el contrario, si la ley mineral es baja, se necesitará procesar mayor cantidad de mineral, aumentando con ello los residuos.

Los relaves contienen concentraciones de agentes químicos y elementos que alteran el medio ambiente, tales como, restos de: espumantes, colectores, y depresores y también metales pesados, estos contaminantes se van depositando en el fondo del tranque de relave, el agua de la pulpa es generalmente recuperada para procesos o evaporada por las condiciones ambientales. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos.

Tener un adecuado manejo de relaves es una operación clave, ya que esto permitirá recuperar agua, evitar filtraciones hacia el suelo y napas subterráneas, porque el almacenamiento es la única opción para retener estos residuos.

Para obtener una tonelada de concentrado se generan casi 30 toneladas de relave. Dado que el costo de manejar este material es alto, las compañías mineras intentan localizar los "tranques o embalses de relave" lo más cerca posible a la planta de procesamiento de minerales, minimizando los costos de transporte y de reutilización del agua contenida. Ver figura 1-7

Por lo tanto, se hace necesario tener muy presente los riesgos asociados a los pequeños, medianos y grandes depósitos de relaves, en cuanto a los aspectos técnicos, tanto constructivos como ambientales.



Fuente: <http://www.semillasdeagua.cl/angloamerican-podria-dejar-sin-agua-a-el-melon/>

Figura 1-7: Embalse de relaves, Anglo American Divisón el Soldado

1.4. IMPACTO AMBIENTALE DE LOS TRANQUES DE RELAVES

Una vez que los depósitos de relaves cumplen su ciclo de vida útil, es decir, ya no ingresa más relaves a él, comienza la etapa post-operativa o de cierre, donde se encuentran fuertemente expuestos a condiciones climáticas que evaporan las aguas claras presentes en la cubeta, exponiendo el material particulado fino a procesos erosivos, lo que implica contaminación atmosférica.

Entre los principales riesgos a los que se exponen las personas y el medio ambiente se encuentran: las fallas en el muro del tranque, el arrastre de tranques por efecto de las lluvias, la filtración de aguas de relave al entorno e infiltración en las napas subterráneas, y el levantamiento y arrastre de material fino por acción del viento.

Los tranques de relaves son susceptibles a provocar diversos impactos al medio ambiente los cuales se enumeran a continuación.

1.4.1. Contaminación atmosférica

Se define como la presencia de sustancias extrañas a la composición habitual del aire, en un lugar y durante un cierto período de tiempo determinados; estas sustancias pueden ser perjudiciales para el desarrollo normal de la vida vegetal, animal y humana.

En el caso de los tranques de relaves, esta contaminación se presenta cuando el viento levanta el material particulado que está depositado en el tranque, incorporándolo a la atmósfera.

1.4.2. Contaminación hídrica

Es el acto de verter algún material, ya sea sólido o líquido, al agua modificando con esto su composición química y su calidad.

Drenaje ácido de la minería (DAM): Presencia de material de relave con minerales sulfatados, que pueden reaccionar con el aire y/o agua provocando ácido sulfúrico.

Cuando el agua alcanza un cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria común llamada "Tiobacilus Ferroxidante", puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aún más los residuos de metales de desecho.

El ácido lixiviará la roca mientras esté expuesta al aire y agua, hasta que los sulfuros sean extraídos completamente. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositados en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inservible.

Contaminación por metales pesados y lixiviación: La contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, la plata y el zinc, contenidos en las rocas extraídas desde la mina, entran en contacto con el agua. Los metales son extraídos y llevados río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa.

Los metales pesados pueden ser removidos de la superficie de la roca en condiciones de pH neutro, aunque la remoción de estos metales pesados se ve favorecida en condiciones de pH bajo, como los fluidos ácidos de la minería.

1.4.3. Contaminación química

Este tipo de contaminación ocurre cuando algunos agentes químicos, como el cianuro y el ácido sulfúrico, utilizados por compañías mineras para la separación del material de interés de la ganga, se derraman, gotean, o se trasladan de la mina hacia un cuerpo de agua cercano. Estos químicos son altamente tóxicos para los humanos y la fauna. Ver figura 1-8



Fuente: <https://www.laizquierdadiario.cl/El-otro-producto-de-la-mineria-los-relaves-y-la-contaminacion-de-las-aguas>

Figura 1-8: Imagen referencial contaminación de aguas por relave

1.4.3.1. Erosión y sedimentación

Ocurre por la perturbación del suelo y rocas en el transcurso de la construcción como en las labores productivas de la mina, el facilitador para esta contaminación es el agua lluvia, donde al tocar la superficie terrestre, acarrea consigo material que se deposita o alcanza un efluente de agua, incorporándolos a su caudal diseminando así los elementos contaminantes que se originaron en la explotación minera.

1.4.3.2. Contaminación de suelo

Esta contaminación nace por la generación y acumulación de grandes cantidades de residuos, provenientes de la lixiviación y/o flotación, estos residuos vienen con altas concentraciones de metales, en comparación al entorno natural en donde son dispuestos.

Debido a las dimensiones de los tranques, corresponden a uno de los impactos más notorios, ya que para construirlos se debe utilizar una gran superficie de suelo, la cual es cubierta por arenas, y material particulado fino, producto de la pulpa que proviene de la flotación sin ningún valor comercial. Además la pulpa que proviene de flotación, contiene una fracción acuosa, la cual es muy contaminante, al tener reactivos de flotación e iones metálicos en suspensión.

Los residuos, al contener sulfuros provenientes de la flotación, y estos al estar expuestos a la humedad del aire o precipitaciones, generan aguas ácidas las cuales realizaran una especie de lixiviación de suelos, provocando un cese en la disponibilidad

de los metales biodisponibles en los suelos (N, P, K), afectando de forma negativa en la fertilidad natural de los mismos y en consecuencia la disminución de materia orgánica.

1.4.4. Impacto paisajístico

Corresponde a la modificación que sufre el ecosistema natural, donde se ubicará el tranque de relaves y se caracteriza principalmente por la gran extensión de la cubeta del tranque y sus muros.

Si este tranque queda dispuesta cerca de alguna comunidad humana o ciudad, la visualización de esta infraestructura una vez instalado no es grata, generando automáticamente una oposición de parte de la ciudadanía. Ver figura 1-9



Fuente:<http://www.induambiente.com/especial/mineria/que-hacer-con-los-relaves>

Figura 1-9: Impactos paisajístico de tranque de relaves

Este impacto es causado por la alteración o eliminación de los hábitats naturales de los seres vivos que yacen en el sector donde se emplazará el tranque, ya que se debe destruir e inundar una gran extensión de terreno poniendo término a la existencia de especies vegetales y animales.

1.4.5. Impactos Sociales y culturales

Producto de la contaminación de recursos vitales, como el agua, y a la cercanía que puede tener el depósito con comunidades susceptibles a sufrir perturbaciones que causa el tranque, es que se genera el impacto sociocultural caracterizado por la incertidumbre de la población, ante la posibilidad de derrumbes o rompimientos de los tranques de relaves, que liberarían gran cantidad de material, pudiendo generar un aluvión con consecuencias fatales. Además, genera fenómenos especulatorios que, provocan una desvalorización de los terrenos circundantes al muro del tranque.

1.5. **POLÍTICAS MEDIOAMBIENTALES APLICABLES AL TRANQUE DE RELAVES DE LA MINERA LOS MAITENES**

Chile, con el fin de resguardar la salud de las personas y junto a ello asegurar su calidad de vida, ha creado una serie de leyes y normativas aplicables a la industria minera en donde regulan y norman sus procesos productivos.

A continuación se hará un análisis de la legislación chilena poniendo énfasis netamente en lo que hace alusión a los depósitos de relaves

1.5.1. Ley 19300

La ley 19300 llamada “Bases Generales del Medio Ambiente”, se creó el 01 de marzo del año 1994, y tuvo su última reforma en el año 2016

Esta ley crea el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el cual es un importante instrumento de gestión donde deben someterse los proyectos de inversión y actividades productivas, con el fin de determinar los efectos reales que tendrán sobre el medio ambiente. De este modo, se intenta evitar daños ecológicos y establecer los responsables cuando se produzca un perjuicio al ambiente.

1.5.2. Ley 20551

Esta Ley fue promulgada en el año 2012, la cual regula el cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. Contiene el estatuto que regirá el cierre de las faenas de la industria extractiva minera, además reconoce que la etapa de cierre es parte del ciclo de

la vida útil de todo proyecto minero, donde el cierre de faenas mineras se debe planificar e implementar de forma progresiva durante las diversas etapas de operación de la faena minera, por toda la vida útil.

El objetivo de planificar el cierre es mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la industria extractiva minera en los lugares en que esta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de los mismos, en conforme a la normativa ambiental aplicable.

Otro objetivo que tiene la implementación de esta ley, es obligar a las empresas que creen acciones destinadas a resguardar la vida, salud, seguridad de las personas y medio ambiente.

El cierre debe cumplir con ciertos estándares, debe presentar una estabilidad física y química, donde por un lado se va a asegurar que no colapse la estructura que realizará la minera para cumplir la ley, y por otro lado, evitar, prevenir o eliminar los residuos que puedan perturbar el agua, aire y suelo.

1.5.3. Ley N° 20.819

Esta ley creada en el año 2015 modifica la Ley 20551, la cual regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales a fin de perfeccionar la forma de cálculo de la vida útil de los proyectos mineros, determinar la oportunidad para comenzar a constituir la garantía financiera respecto de proyectos de hidrocarburos, e introducir ajustes al procedimiento de evaluación de los proyectos de cierre.

1.6. PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

En el año 2005, SERNAGEOMIN junto a el Instituto Federal de Geociencias (BGR) de Alemania, realizaron un proyecto colaborativo denominado “Bases para la Remediación de Pasivos Ambientales Mineros”, dónde además se centro en el estudio de las faenas abandonadas y paralizadas, como consecuencia, surgió un anteproyecto de “Ley de Remediación de Pasivos Ambientales Mineros”, el cual fue enviado al ministerio de Minería en Diciembre del mismo año.

A raíz del proyecto se creó una definición, acorde a la realidad nacional a los pasivos ambientales mineros, donde un PAM se defino como:

Faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente.

Sin embargo, este anteproyecto aún no ingresa a trámite legislativo y en el Ministerio de Minería se encuentra en espera, sin prioridad alguna.

CAPÍTULO 2: DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE

2. DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE

En Chile, los depósitos de relaves están regulados por el Decreto Supremo N° 248, el cual es un reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, y la institución que está a cargo de fiscalizarlos es el SERNAGEOMIN, a través del departamento de Depósitos de Relaves, el Departamento de Gestión Ambiental y cierre de faenas, y el Departamento de Seguridad Minera y Fiscalización.

2.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS TRANQUES DE RELAVES EN CHILE

Los tranques de relaves son materia constante de debate entre quienes defienden su utilidad y aquellos que critican sus instalaciones en las cercanías de algunos poblados. La discusión en torno a los tranques de relaves ha ido en alza en el tiempo, debido a que existen una gran cantidad de depósitos abandonados de los cuales nadie se hace cargo, y por otra, a la creciente falta de terrenos donde dejar estos residuos.

A raíz de las inclemencias climáticas que ocurrieron en el año 2015 en el norte de nuestro país, los depósitos de relave se pusieron a prueba, debiendo soportar lluvias, terremotos y aluviones.

Los depósitos de relave actuales están diseñados para soportar el sismo máximo probable, para lograr esto, la construcción sigue una serie de controles constructivos, siendo los principales la granulometría de la arena de relave con la que se construye el muro, la geometría de edificación de éste y la compactación del muro.

Para soportar lluvias y aluviones, como las ocurridas en el año 2015 en la zona norte de nuestro país, el tranque cuenta con una serie de infraestructuras que permiten la mitigación de los daños, tales como canales de contorno, los cuales evitan el ingreso de agua a la zona del tranque, una revancha hidráulica mayor a cinco metros y un sistema de evacuación de crecidas de emergencia. Ver figura 2-1



Fuente: Seminario: Depositos de relaves en Chile, Sernageomin 2015

Figura 2-1: Drenaje de tranque de relave

La correcta construcción y operación de tranques de relave está normada desde el año 2003, al ser una normativa relativamente reciente, existen decenas de tranques que no cumplen las normas de construcción actuales por lo que al pasar de los años, se han originado fallas en los tranques más antiguos principalmente por una construcción defectuosa, al no considerar los factores climáticos y sísmicos que presenta el territorio nacional.

Según estadísticas del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), hasta julio de 2015 existían 603 depósitos de relaves en Chile, de los cuales 216 se encuentran activos.

La región que tiene más depósitos de relaves es la Región de Coquimbo, que cuenta con 355 depósitos, 2 de ellos pertenecen a la Gran Minería, en cambio, la región de Valparaíso cuenta con 82 depósitos de relaves, de los cuales 1 pertenece a la Gran Minería . Ver Tabla 2-1

Tabla 2-1: Depósitos de relaves en Chile

REGIÓN	ESTADO DEPÓSITOS DE RELAVES		
	ACTIVOS	NO ACTIVOS	ABANDONADOS
II	21	13	2
III	55	18	91
IV	86	179	28
RM	10	6	7
V	28	22	14
VI	9	4	1
VII	1	1	0
XI	4	1	0
XV	2	0	0
N° POR ESTADO	216	244	143
TOTAL REGISTRADO			603

Fuente: Seminario: Depositos de relaves en Chile, Sernageomin 2015

2.2. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES

Existen diferentes técnicas para estabilizar química y físicamente un depósito de relaves, sin embargo, el costo asociado y la técnica empleada van a diferenciar a cada una de ellas.

2.2.1. Fito-remediación

Esta técnica se refiere al conjunto de procesos bioquímicos realizados por plantas y microorganismos asociados a ellas, para degradar, asimilar, metabolizar, remover o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos y otro tipo de contaminantes de ambientes contaminados de suelo, sedimentos y agua.

Una de las ventajas de esta técnica es que se requiere una inversión mucho menor en comparación con otras técnicas, además contribuye a la estabilización del suelo, evita la emisión de polvos, además de la emisión de polvos y la erosión. Otros de los beneficios de esta técnica es mejorar el paisaje, disminuye la formación de lixiviados y el transporte de contaminantes, aumenta la masa vegetal, es una posible generación de

hábitat y refugio para fauna, entre otros beneficios que entrega esta técnica. La principal desventaja de la fito-remediación es el tiempo que se demora a realizar el proceso de remediación, ya que es mucho más largo que otros procesos convencionales.

Existen cuatro formas de fito-remediación, estas son fito-estabilización, fito-filtración, fito-volatización y la fito-extracción.

2.2.1.1. Fito-estabilización

La fito-estabilización utiliza ciertas especies vegetales con capacidades de inmovilizar los contaminantes en el suelo o adsorberlos a sus raíces. Esta técnica previene que los contaminantes migren a las aguas subterráneas o al aire. Esta técnica no remueve los metales sólo los estabiliza, y es más efectivo en suelos con alto contenido orgánico, ya que favorecen el desarrollo de plantas.

Esta técnica es una de las técnicas más económicas, comparada con otras técnicas de estabilización, además es fácil de implementar y es preferible estéticamente, por el efecto paisajístico que genera en la zona perturbada.

Para la selección de las plantas que se emplearan en la estabilización del tranque de relaves, se debe hacer un estudio exhaustivo de las características que tiene el sustrato (tranque) en cuanto a su composición química principalmente, además de ver las características geográficas del tranque, y las condiciones climáticas en donde está emplazado este depósito de residuos. Ver Figura 2-2



Fuente: Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras, Comisión chilena del cobre

Figura 2-2: Especies de plantas Fito-estabilizadoras

2.2.1.2. Fito-filtración

La fito-filtración utiliza las raíces de las plantas para captar los contaminantes presentes en el suelo. Una vez que las raíces están saturadas de contaminantes se extraen las plantas, se separa la raíz y se le realiza un tratamiento, tal como la incineración.

Esta técnica se emplea para extraer contaminantes en medios acuáticos, con plantas hidropónicas, el problema de esta técnica es el costo, ya que las raíces absorben mucha humedad.

Algunas de las plantas utilizadas en esta técnica son la Maravilla (Caléndula), para remover plomo y ciertos elementos radioactivos, y la Mostaza India (Brassica Juncea) en Chile se conoce como yuyo, para remover cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc.

La Maravilla necesita mucho sol, soporta temperaturas de hasta 30°C sin embargo la temperatura mínima que es capaz de resistir son 15°C, para su germinación y crecimiento necesita mucha agua.

La Mostaza India se puede encontrar desde los 0 a 2000 metros de altura, debido a su gran variedad de especie, se pueden encontrar plantas que prefieren climas secos y mucho sol, mientras que otras necesitan de mucha agua y no demasiado sol. Ver figura 2-3



Fuente: Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras, Comisión chilena del cobre

Figura 2-3: Especies de plantas Fito-Filtradoras de metales

2.2.1.3. Fito-volatilización

En este tipo de estabilización, las especies vegetales, captan ciertos metales del suelo, los transforman en especies gaseosas mediante procesos biológicos, y los liberan a la atmosfera.

La ventaja de esta técnica es que los metales se extraen del suelo sin necesidad de cortar la planta, pero a su vez presenta una desventaja, la cual el contaminante solo se traspa a otro medio donde eventualmente decantará, volviendo a contaminar el suelo.

Existen una mínima cantidad de metales que pueden pasar por este proceso, un ejemplo es el selenio, el cual puede ser volatilizado por la alfalfa (*Medicago sativa*). La alfalfa se da en Chile, desde la región de Coquimbo hacia el sur, vive hasta los 2000 metros de altura, necesita alrededor de 400 y 800 mm de agua al año y mucha luz. Ver figura 2-4



Fuente: Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras, Comisión chilena del cobre

Figura 2-4: Especie de planta para la Fito-volatilización

2.2.1.4. Fito-extracción

La planta en esta técnica adsorbe los contaminantes del suelo por las raíces y se depositan en los demás componentes de la planta, como tallos, hojas y flor.

Existen dos grupos de plantas para esta técnica, las hiper acumuladoras y las acumuladoras, las primeras son capaces de absorber cantidades inusuales de metales en comparación con otras plantas acumuladoras.

La forma de trabajar con estas plantas es, plantar las especies seleccionadas las cuales se adapten de mejor forma al clima, altura y por supuesto que tenga la capacidad

de absorber los contaminantes del sustrato. Se debe esperar varias semanas o meses hasta que estén saturadas de metal, para después cosecharlas y aplicarles un tratamiento.

Esta rutina se debe repetir varias veces hasta que el nivel de contaminación de suelo se vuelva aceptable. Se deben extraer las plantas para evitar que los animales las consuman y que incorporen metales a sus organismos y a la cadena trófica

El tiempo que dura esta remediación va a depender de la cantidad de contaminantes que tenga el suelo, pero por lo general oscila entre 1 y 20 años.

Para que esta práctica de fito-remediación resulte, las especies que se plantan deben ser adecuadas y capaces de soportar condiciones adversas de altas concentraciones de metal. Deben tener una alta tolerancia a los metales, ser capaces de acumular varios tipos de metales y en grandes cantidades, tener una alta producción de biomasa, un crecimiento rápido, ser resistentes a pestes y plagas y no ser atractivas para los animales, de manera de no contaminar a la cadena trófica. Ver figura 2-5



Fuente: Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras, Comisión chilena del cobre

Figura 2-5: Especies de plantas híper acumuladoras de metales

2.2.2. Control del drenaje ácido

Otra de las técnicas para la estabilización de los depósitos de relaves es el control de drenaje ácido, ya que es uno de los principales problemas de contaminación producto de la actividad minera.

Existen dos formas para controlar el drenaje ácido, que son evitar su generación (prevención) o tratar los flujos generados (remediación).

2.2.2.1. Prevención

Esta forma de control actúa antes que el drenaje ácido se genere, estos fluidos se originan cuando ciertos minerales entran en contacto con oxígeno y agua, dando lugar a una reacción de oxidación que genera protones y minerales oxidados.

Algunas de las medidas de prevención para el drenaje ácido son la inundación o sellado de minas subterráneas, almacenamiento de relaves bajo el agua, almacenamiento de relaves en montones sellados, mezcla de material de descarte, solidificación total de relaves y microencapsulación (revestimiento)

Uno de los principios de acción, busca impedir el contacto del oxígeno, el agua, o ambos con los estériles y relaves, así impedir que se genere una reacción en el drenaje ácido.

Otro principio de acción consiste en mezclar materiales que generan acidez con otros que consumen acidez para producir compuestos neutros para el medio ambiente.

La falencia que tiene este sistema es que la reacción de oxidación que da lugar al drenaje ácido ocurre espontáneamente en el medio ambiente, por lo que las medidas de prevención no suelen ser siempre estables a lo largo del tiempo.

2.2.2.2. Remediación

El tratamiento de los flujos puede llevarse a cabo a través de procesos abióticos o biológicos. Estos pueden ser a través de dos sistemas, de sistema activo o pasivo.

El sistema abiótico activo se basa principalmente en la adición de agentes químicos neutralizantes como la cal, los cuales aumentarán el pH y hace decantar los metales disueltos como hidróxidos o carbonatos, permitiendo ser removidos de forma posterior.

Este sistema es eficiente en el tratamiento del drenaje ácido, pero su principal ventaja es el costo asociado, además de la generación de residuos como son el barro.

Por otro lado está el sistema abiótico pasivo, este método también hace aumentar la acidez al drenaje pero en condiciones anóxicas. Esta alternativa procura mantener los metales en su forma reducida y así evitar que precipiten en la cal, y así no reduzcan su efectividad como agente neutralizador de pH.

Este tipo de tratamiento es de bajo costo, pero tiene varias complicaciones asociadas, como por ejemplo, puede fallar si entra en contacto con oxígeno o si tiene concentraciones muy altas de hierro o aluminio.

La otra alternativa es de forma biológica, y se le conoce como remediación biológica activa, se utilizan organismos vivos en el tratamiento del drenaje ácido. En

este caso se utiliza microorganismos capaces de alcalinizar el pH y de inmovilizar metales para que no se produzcan reacciones que originen drenaje ácido.

Por último, se encuentra la estrategia de remediación biológica pasiva. Esta estrategia tiene como objetivo transformar los metales disueltos en minerales para poder extraerlos. La ventaja de estos sistemas son que tienen bajo costo de mantención, controlan el polvo, la erosión, mejoran el paisaje, su problema es que se necesitan grandes superficies, y existe la incertidumbre con respecto a cómo y en qué cantidad se acumulan los metales en el sistema.

2.3. EXPERIENCIA CHILENA EN LA FITOREMEDIACIÓN DE TRANQUES DE RELAVES

En Chile son pocos los casos de cierre de faenas que apliquen en su cierre, la recuperación ambiental. Esto se debe principalmente a las leyes blandas y permisivas que estaban antes del año 2012. Aun así, en el presente no se exige a las mineras reforestar la zona dónde estuvo emplazada la operación con el fin de mitigar el impacto paisajístico creado después de su funcionamiento.

La legislación chilena, exige que las mineras una vez que han dejado de funcionar deberán dejar la zona estabilizada tanto física (como se hacía en un comienzo) como químicamente, este último requisito fue agregado en el año 2012 con la ley 20551.

2.3.1. Minera Lo Aguirre

Mina Lo Aguirre representa un caso exitoso de recuperación ambiental en Chile, donde la mina voluntariamente se sometió a este proceso, ubicada en la región Metropolitana, muy cerca de Santiago. Esta es una mina emblemática en muchos aspectos, ya que fue la primera mina a nivel mundial en aplicar a escala comercial el proceso de lixiviación en pilas para óxidos de cobre, biolixiviación en pilas para los sulfuros de cobre, y primeros en Chile en producir cátodos de cobre por electroobtención.

Tras 20 años de operación, la mina presentó ante el Sernageomin de forma voluntaria un plan de cierre el cual fue aprobado el mismo año, la mina había generado una serie de externalidades, como lo son la propia mina, que constaba de cuatro rajos y una mina subterránea, botaderos, tranques y la planta. Ver figura 2-6



Fuente: Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras, Comisión chilena del cobre

Figura 2-6: Mina Lo Aguirre pre-cierre

Los principales compromisos adquiridos en el plan fueron asegurar las condiciones de estabilidad física de bancos en los rajos, estabilidad física y química de los depósitos de estériles y pilas de lixiviación, bloqueo de acceso y señalética mina-planta, disposición final de materiales peligrosos y no peligrosos, cubrimiento superficial de las pilas de lixiviación con capa de material arcilloso con un mínimo de 10 cm, más una capa vegetal entre 5 y 7 cm, plan de reforestación y re vegetación y plan de monitoreo. Ver figura 2-7



Fuente: Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras, Comisión chilena del cobre

Figura 2-7: Mina Lo Aguirre post-cierre

El plan de cierre fue autofinanciado, principalmente mediante reciclaje de residuos. En primer lugar se captó las aguas de drenaje de las pilas estabilizadas para extraer el cobre contenido en ellas (un proceso sin ácido sulfúrico agregado). Para esto se utilizó chatarra de hierro y se llevó a cabo un proceso de cementación para la obtención de cobre. Con la venta de este cobre se financió parte del plan. También se vendió cementos, áridos, terreno y activos de la minería para financiar el plan.

En la actualidad, la zona dónde estaba emplazada la mina se volvió a poblar de flora y fauna local, además las autoridades no descartan instalar un parque o un complejo fotovoltaico en la zona.

2.3.2. Faena el Indio

La faena el Indio se encuentra en el Valle del Elqui, región de Coquimbo, esta faena es operada por la empresa Barrick desde el año 1994. Ver figura 2-8



Fuente: <http://www.semanariotiempo.cl/2015/05/01/barrick-gold-anuncia-significativodescubrimiento-de-oro-en-region-de-coquimbo/>

Figura 2-8: Ubicación Faena el Indio

La mina cesó sus operaciones en el año 2002 y comenzó su proceso voluntario de cierre de faena, transformándose en uno de los primeros casos de cierre de faena minera en Chile, junto con la mina Lo Aguirre.

Las principales operaciones que forman parte del plan de cierre es el desmantelamiento de construcciones, retiro de edificaciones, obras y equipos, descontaminación de áreas, estabilización de taludes y restauración de las principales geoformas que se encontraban en el área previa a la actividad minera.

Una de los principales impactos a las geoformas de la zona, fue que debido a las actividades mineras, el curso del río Malo se modificó, por lo que parte del plan de cierre contempló restaurar el curso original de este río.

Las actividades de cierre de faena han implicado una inversión cercana a los 80 millones de dólares. En la actualidad la faena el Indio se encuentra en proceso de post-cierre, donde son llevadas a cabo obras menores y monitoreo de parámetros tales como la calidad de agua.

2.3.3. Planta Matta

En un tranque de relaves previamente forestado, se realizó una caracterización fisicoquímica del sustrato, en sectores vegetados y no vegetados. Se estudió la acumulación de cobre en raíces y hojas de las especies presentes en el sitio de trabajo, con el objeto de evaluar su potencial fitoextractor y fitoestabilizador de las especies. El sustrato presentó un alto contenido de metales pesados, principalmente cobre ($> 2,5$ g/kg). Los sectores vegetados del tranque de relaves presentaron características similares, pero tenían concentraciones de cobre menores a las determinadas en los sectores no vegetados. Nueve especies presentes en el sitio fueron analizadas para determinar la acumulación de cobre en raíces y en hojas, y se sugirió la capacidad fitoextractora o fitoestabilizadora de cada especie.

Las especies endémicas *Schinus polygamus* y *Atriplex desertícola*, acumularon sobre 1,2 g de cobre/kg en sus hojas, presentando características de pseudometalófitas para el metal. Cinco de las nueve especies estudiadas fueron consideradas adecuadas para procedimientos de fito-extracción de cobre y cuatro especies mostraron capacidad para fitoestabilizar suelos contaminados con cobre.

Mediante la identificación de especies que crecen sobre un sitio contaminado con cobre, fue posible seleccionar plantas adaptadas a ambientes semiáridos y adecuadas para ser utilizadas en programas de remediación de tranques de relaves.

La Planta Manuel Antonio Matta, de ENAMI se encuentra ubicada en la Tercera región de Chile, en la región de Copiapó la cual tiene un clima desértico, con temperaturas promedio de 19° C en Primavera-Verano y 14° C en Otoño-Invierno. Su promedio de precipitación anual es de 20 mm,. Ver figura 2-9



<https://www.geovirtual2.cl/Museovirtual/mapato3.htm>

Figura 2-9: Mapa Planta Manuel Antonio Matta

Un plan de plantación de árboles se llevó a cabo en 1988, con el fin de estabilizar la superficie y reducir la erosión eólica. La primera etapa de plantación, fue en una superficie de 250 m², con 6 especies de árboles. *Acacia cyanophylla*, *Schinus polygamus*, *Casuarina equisetifolia*, *Acacia melanoxylon*, *Cupressus macrocarpa* y *Prosopis chilensis*. Pequeñas plantas fueron plantadas usando un bloque aleatorio, que se repitió 3 veces. Cada especie fue representada a lo menos en una oportunidad, en cada bloque. Las especies se sembraron en una malla en 3 dimensiones de 30 x 30 x 30 cm, a una distancia de 2 m entre cada planta. No se incorporaron materiales adicionales al sustrato, aparte de los materiales en los que las plantas habían germinado en el vivero.

2.4. VENTAJAS COMPARATIVAS DE LA FITOESTABILIZACIÓN

Esta técnica empleada en la remediación de depósitos de relaves, presenta ventajas significativas para quienes estén interesados es una opción sustentable.

La fitoestabilización se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, con lo que disminuye la propagación de contaminantes a través del aire y el agua, es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos, es una opción de bajo costo comparada con otras alternativas, no se necesita de personal especializado para su manejo, el consumo de energía es nulo, es poco perjudicial para el medio ambiente, ya que, se busca recuperar la zona intervenida creando un ambiente apto para que se vuelva a instaurar la flora y fauna nativa,

Esta alternativa actúa de forma positiva sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal, además tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público ya que es estéticamente agradable, al transformar terrenos inhóspitos, por último, permite el reciclado de recursos, como son el agua, biomasa y metales. Ver figura 2-10

Se busca seleccionar plantas endémicas de la zona a fitoestabilizar, para evitar introducir flora invasora las cuales pueden generar algún tipo de impacto negativo al ecosistema.



Fuente: <http://www.batlleiroig.com/>

Figura 2-10: Fitoestabilización exitosa de El vertedero Vall d' en Joan de Barcelona, España

Como todo método, también existen desventajas asociadas a la fitoestabilización. La principal desventaja es el largo periodo de tiempo que se necesita para notar cambios en la intervención, ya que se necesitaran a lo menos 10 años para que la flora se pueda estabilizar en los depósitos de relaves y comenzar a crear un nuevo ecosistema.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE FITO-ESTABILIZACIÓN PARA LA MINERA
LOS MAITENES

3. PROPUESTA DE FITO ESTABILIZACIÓN PARA LA MINERA LOS MAITENES

Para realizar una propuesta de fitoestabilización, se deben considerar una gran cantidad de factores para elegir las especies vegetales que mejor se adaptaran a la zona geográfica en dónde se encuentra el depósito de relaves. El objetivo de este estudio es para aumentar la probabilidad de éxito del proyecto.

Los factores a considerar son las características climáticas de Puchuncavi y su topografía, estos factores son relevantes, ya que es el primer filtro para lograr una elección efectiva de la flora utilizada a fitoestabilizar.

El otro punto trascendental es conocer la conformación de depósito de relaves, al saber su conformación, se podrán elegir plantas metalófitas específicas a un tipo de metal pesado.

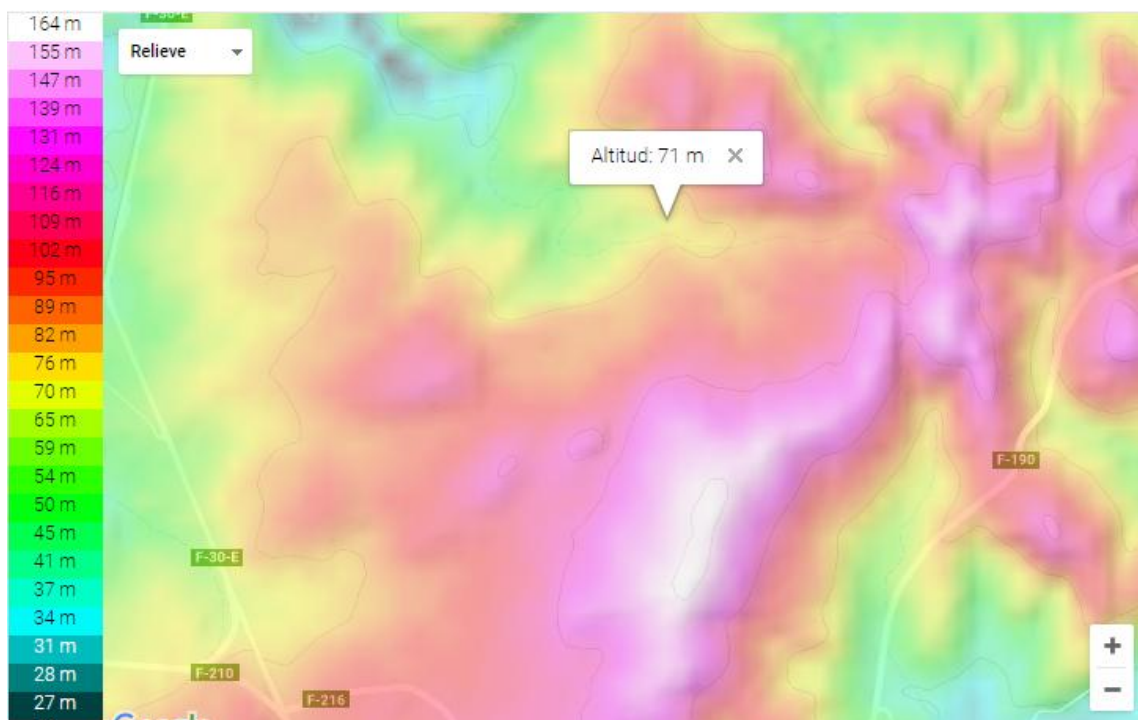
3.1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE PUCHUNCAVÍ

Puchuncaví, presenta un clima cálido y templado. Los meses de invierno son mucho más lluviosos que los meses de verano. La temperatura promedio en Puchuncaví es 14.7 °C. Las precipitaciones son de 349 mm/año.

3.2. TOPOGRAFÍA DE PUCHUNCAVÍ

El sector oriental de la comuna, en donde se ubica la Minera los Maitenes, está constituidos por suelos derivados de granitos. Son terrenos montañosos, que en su punto más bajo de encuentra a 60 m.s.n.m., llegando a alcanzar 700 m.s.n.m., sin embargo el depósito de relaves se encuentra cerca de la costa, por lo que su altitud es de 70 m.s.n.m. aproximadamente. Ver figura 3-1.

En donde se ubica la planta de la Minera los Maitenes, no existen pendientes pronunciadas, esta planta se ubica al norte de la ruta F-216 y al oeste de la ruta F30-E.



Fuente: tographic-map.com

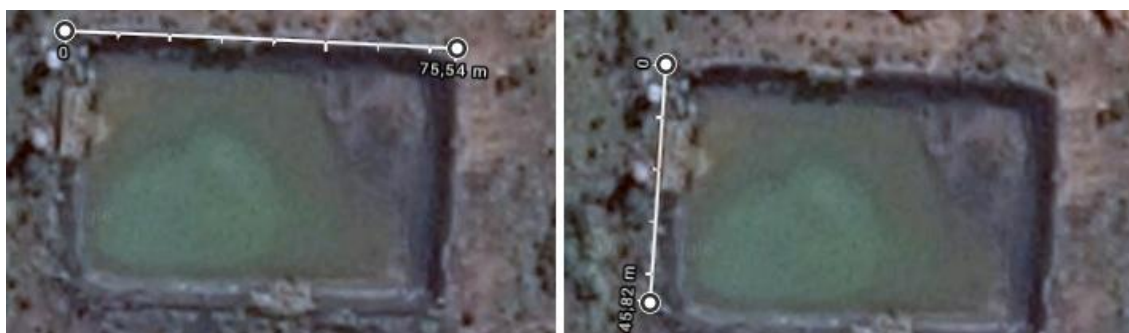
Figura 3-1: Altitud en donde se ubica el depósito de relaves

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL DEPÓSITO DE RELAVES DE LA MINERA LOS MAITENES

Minera los Maitenes, cuando estaba en funcionamiento, procesaba escoria de cobre proveniente de ENAMI, Ventanas. Esto se debe a que en ese entonces, ENAMI no contaba con instalaciones adecuadas para el procesamiento de dicho material, por lo que, a través de un contrato, abastecerían a la planta de la Minera los Maitenes durante 5 años con escoria del horno de reverbero, la cual tendría una ley promedio de 1.35% de Cu.

El depósito de relaves está compuesto principalmente por los residuos de flotación que genera la planta. Estos residuos contienen una mezcla de silicatos, metales pesados, agua, entre otras cosas.

Las dimensiones del tranque de relaves como se mencionó en el capítulo I, son de aproximadamente 70 m de largo por 45 m de ancho. El principal componente de estos residuos son minerales sulfurados, sílice y cal, estos últimos se utilizan en el horno de reverbero para que reaccione con el azufre y el óxido de hierro, formando parte de la escoria de reverbero. Ver figura 3-2



Fuente: Google earth

Figura 3-2: Imagen satelital del tranque de relaves Minera Los Maitenes

Los metales pesados que contiene este relave son numerosos, estos son, Arsénico, Cromo, Cobre, Mercurio, Plomo y Niquel, pero existen dos elementos que están sobre la norma chilena para los suelos agrícolas, este es el caso del cobre y plomo, esta norma es utilizada ya que Chile no posee una normativa de suelos que regule las concentraciones de metales pesados.

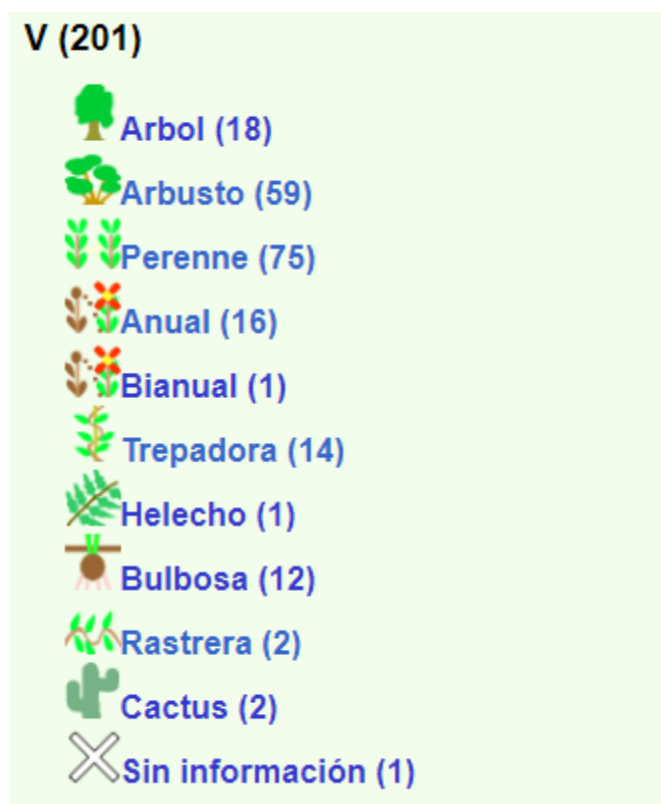
La norma permite 100 mg/kg de Cobre y 50 mg/kg de Plomo en suelos agrícolas en la macro zona norte del país.

La concentración de Cu que presenta el tranque es de 362 mg/kg y la de plomo es de 84 mg/kg, datos entregados por un trabajador de la planta, el cual estaba encargado de medir las concentraciones de relave.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA FLORA ENDÉMICA DE LA REGIÓN

La V región, posee una amplia variedad de especies vegetales, en la zona intermedia predominan los arbustos espinosos, en los sectores más soleados, se encuentran arbustos como el guayacán, algarrobo, quillay, molle y otros asociados al espino. En la zona costera se puede encontrar vegetación del tipo matorral arbustivo costero, formado por especies como el peumos, boldos, maitenes, hierbas y gramíneas. En las áreas más húmedas como fondos de quebradas se pueden encontrar litres, quilas, pataguas.

Si bien, la zona central posee aproximadamente 200 especies endémicas, un porcentaje ínfimo se caracterizan por ser metalófitas, es decir, que tienen la capacidad de desarrollarse en sustratos con metales pesados y absorberlos por su sistema radicular. Ver figura 3-3



Fuente: www.chileflora.com/Florachilena/FloraSpanish/PIC_ENDEMIC_REGION.php

Figura 3-3: Especies de plantas endémicas de la V región

3.5. ELECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES PARA FITOESTABILIZAR

Como se dijo con anterioridad, la fitoestabilización, es un tipo de fito-remediación, cuyo objetivo es contener los metales pesados en las raíces y hojas, para evitar que estos contaminen otras zonas cercanas al foco contaminante, y tiene especial implicancia en evitar que los metales pesados viajen verticalmente a las napas subterráneas y se produzca contaminación del acuífero, además evita el arrastre eólico.

Las especies vegetales idóneas para esta técnica son aquellas que tienen un sistema radicular extenso, para captar más nutrientes, además se busca fitoestabilizar con especies vegetales nativas, y en casos excepcionales, con flora introducida ya establecida en la zona geográfica en cuestión.

A continuación se caracterizarán las especies elegidas para la fito-estabilización del tranque de relaves de la Minera Los Maitenes.

3.5.1. Baccharis linearis

La *Baccharis linearis*, o popularmente conocido como Romerillo, es una especie autóctona de Chile, ubicada en la zona central. Habita en terrenos áridos y degradados, su altura no supera los 2 m, es resistente a la sequía y a la baja disponibilidad de nutrientes en suelos, es un arbusto perenne. Es una especie que coloniza espontáneamente tranques de relaves abandonados en la provincia del Elqui.

Es metalófito al cobre, esto quiere decir que almacena cobre en su sistema radicular, lo que la convierte en una especie ideal para la fitoestabilización de relaves.

El Romerillo se comportaría de buena forma en el tranque de relaves de la Minera Los Maitenes, ya que Puchuncaví posee suelos áridos, pobres en nutrientes y su contenido de cobre en el suelo está por sobre la norma. Ver figura 3-4



Fuente: www.chileflora.com

Figura 3-4: Romerillo

3.5.2. Schinus polygamus

Es un árbol pequeño, perenne de hojas verde que alcanza de 1,0 a 4,0 metros como promedio, y unos 2,5 m de diámetro, ramificado casi desde la base. El fruto es una drupa globosa de 3 a 5 mm de diámetro, de color violáceo oscuro a negra azulada. Su hábitat es endémico de Argentina, Brasil, Chile, Paraguay, Perú y Uruguay. En Chile su distribución es entre la región de Atacama y la región de Los Lagos.

En nuestro país habita desde los 0 a 2000 m, se adecúa a la falta de agua, por lo que puede pasar más de 12 meses con escasa o nulas precipitaciones. Esta planta no tiene problemas con el sol directo.

De acuerdo a las características, esta especie no tendría problemas al desarrollarse en proximidades al borde costero, con una altura cercana a 0 m.s.n.m. en donde se encuentra el tranque de relaves de la Minera Los Maitenes, y conforme a la experiencias previas, no tendría problema con la concentración de cobre en el sustrato, es decir es metalófito al cobre. Ver figura 3-5



Fuente: www.chileflora.com

Figura 3-5: Árbol *Schinus polygamus*

3.5.3. *Oenothera coquimbensis*

Es una hierba perenne de flores amarillas de 40 a 100 cm de alto, se desarrolla en Chile y en Argentina.

En una tesis de post grado orientada a la fitoestabilización en la comuna de Puchuncaví, probando en ensayos in situ y ex situ, diferentes especies para la inmovilización de los contaminantes, se demostró que esta especie es metalófito al cobre. Se demostró además que la adición de cal permitía a la especie sobrevivir al 100% en comparación al control (ausencia de cal). Ver figura 3-6



Fuente: www.chileflora.com

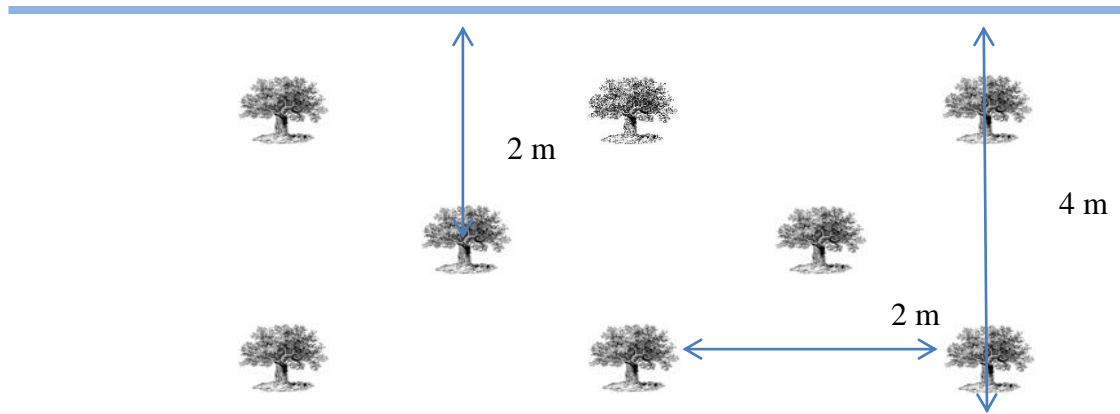
Figura 3-6: *O. coquimbensis*

3.6. CUANTIFICACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES EN LA SUPERFICIE A INTERVENIR

Debido a la recopilación de material bibliográfico y las experiencias exitosas previas de fitoestabilización, es que se tomará como referencia la forma de aplicación de la planta *Matta* en la región de Copiapo, cabe señalar que la fitoestabilización fue aplicada en un área mayor a la Minera Los Maitenes.

Se utilizó una malla en 3 dimensiones de 30 x 30 x 30 cm de suelo (con el mismo sustrato que entrega el vivero), esta será la matriz de la planta, además se dejará una distancia de 2 m entre cada planta, tanto de forma horizontal, como vertical. Es decir 8 plantas por 16 m². Ver figura 3-7

En la propuesta de fitoestabilización para la planta Minera los Maitenes, se han seleccionado tres plantas diferentes, ya que, al proponer una mayor cantidad de especies aumentará la probabilidad de que a lo menos una de ellas se adapte de forma consistente y comience a desarrollarse de manera normal, evitando que el plan se dé por perdido.



Fuente: Tesis, Propuesta de fitoestabilización del depósito de relaves San Esteban, de la comuna de Copiapó

Figura 3-7. Ejemplo de disposición de plantas

3.6.1. Cuantificación de plantas

Las plantas seleccionadas para la fitoestabilización son las siguientes:

- *Baccharis linearis*
- *Oenothera coquimbensis*
- *Schinus polygamus*

Se utilizarán una combinación de todas las especies antes mencionadas, aprovechando algunas de sus características de crecimiento, para disponerlas en ciertas zonas del tranque.

En la figura 1-5, están descritas las dimensiones del depósito de relaves, las cuales son 75,5 metros de largo por 45,8 metros de ancho, al multiplicarlas entre sí, nos da como resultado un área de 3.457,9 m². Dicha área es el área efectiva en donde se aplicará la fitoestabilización. Ver tabla 3-1.

Conociendo la disposición de las plantas en el área del tranque de relaves, se puede calcular la cantidad que se necesitan para poder comenzar la intervención. Se sabe que irán distantes a 2 metros una de otra.

Tabla 3-1: Número de plantas para fitoestabilización

Superficie del tranque	3.457,9 m ²
Plantas por cada 16 m ²	8
Cantidad de plantas	$(3.457,9/16*8) = 1729$

Fuente: Elaboración propia

Se necesitaran 1.729 plantas para poder cubrir toda la superficie del tranque de relaves de la Minera Los Maitenes.

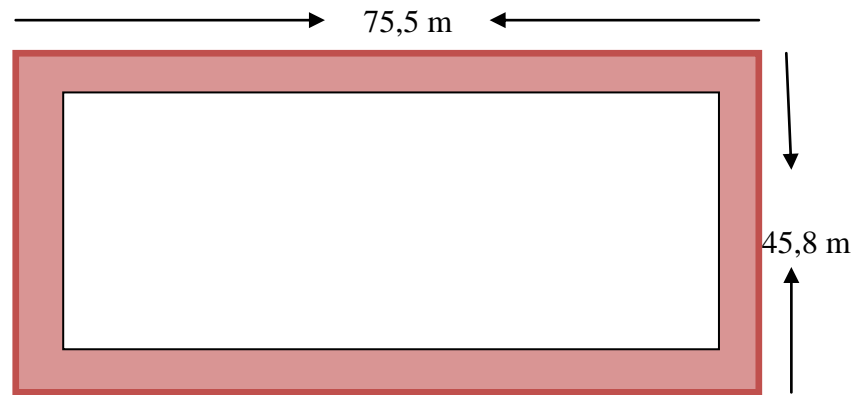
En este plan de fitoestabilización se aplicará una forma específica de plantación, debido a que la *O. coquimbensis* es más delicada en cuanto a su desarrollo, es necesario disponerla en los bordes del depósito, ya que aquí existe una mayor interacción de nutrientes, al estar el depósito de relaves a nivel de suelo.

3.6.2. Disposición de *O. coquimbensis*

Esta especie es metalófito al cobre, ha sido utilizada con anterioridad en la comuna de Puchuncaví para fitoestabilizar el suelo aledaño a las empresas contaminadoras, el problema de esta planta radica en el comienzo de su desarrollo, ya que necesita un sustrato apto para crecer, y el suelo de la comuna de Puchuncavi no lo ofrece, existiendo 0% de posibilidad que esta planta llegue a etapa adulta, por las condiciones ácidas que este presenta.

Para solucionar el problema de adaptación, el sustrato se puede acondicionar agregándole cal, de esta forma se aumenta en un 100% la probabilidad de vida de esta especie. Cabe recordar que el tranque de relaves ya tiene cal en su composición, debido a que se añadieron en el horno de reverbero como fundente, por consiguiente se puede prescindir de este estabilizador de suelos.

Se sugiere plantar en el perímetro del tranque, a lo más a 4 m de los bordes, ya que el tranque al estar a nivel de suelo, esta zona presenta menor acidez al interactuar con el suelo que está afuera del tranque. Ver figura 3-8.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-8: Área a intervenir con *Oenothera coquimbensis*

A continuación se realizan los cálculos para determinar la cantidad de individuos a utilizar.

$$75,5 \times 45,8 = 3.457,9 \text{ m}^2 \rightarrow \text{área total de relave}$$

$$(75,5 - 8) \times (45,8 - 8) = (67,5) \times (37,8) = 2551,5 \text{ m}^2 \rightarrow \text{área sin intervenir}$$

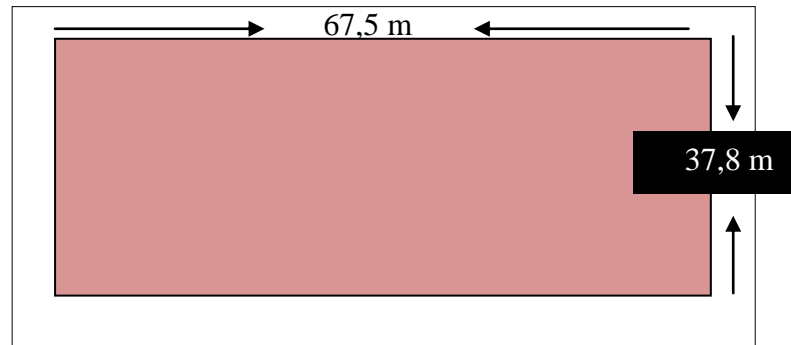
$$(3.457,9 - 2551,5) = 906,4 \text{ m}^2 \rightarrow \text{área para plantar } Oenothera \text{ coquimbensis}$$

$(906,4/16) \times 8 = 453 \rightarrow$ se necesitaran 453 plantas para cubrir el área recomendada.

3.6.3. Cuantificación de Baccharis linearis y Schinus polygamus

Estas especies a diferencia de *O. picensis* son especies arbustivas, los cuales presentan una mayor resistencia en cuanto al crecimiento y desarrollo en sustratos contaminados, por lo que no hay que tomar muchas precauciones en el momento de plantar estas especies.

Todas estas plantas son metalófitas al cobre, y a modo de ofrecer una distribución equitativa, la proporción de las dos especies será 1:1, esto quiere decir que la plantación será en partes iguales. Ver figura 3-9



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9: Área a intervenir con *B. linearis* y *S. polygamus*

A continuación se realizan cálculos para determinar la cantidad de individuos a utilizar:

$(67,5 \times 37,8) = 2.551,5 \text{ m}^2 \rightarrow$ Área de relave a intervenir con especies vegetales.

$(2.551,5/16) \times 8 = 1.275,75 \approx 1276 \rightarrow$ plantas necesarias para cubrir el área.

$(1276/2) = 638 \rightarrow$ Plantas necesarias por especie.

Se necesitaran 638 plantas de *B. linearis* y 638 de *S. polygamus* para cubrir el área central del depósitos de relaves.

3.7. PROVEEDOR DE PLANTAS ENDÉMICAS Y COSTOS ASOCIADOS

El vivero el cual proveerá de plantas al plan de fitoestabilización se llama Pochochay, está ubicado en Quillota, en Pochochay.

Al realizar una visita al vivero se cotizaron 3 especies de plantas endémicas, *B. linearis*, *S. polygamus* y *O. coquimbensis*, especies las cuales se proponen para la fitoestabilización del depósito de relaves de la Minera los Maitenes. Ver tabla 3-1

Tabla 3-2: Valor asociado a las especies seleccionadas en la fitoestabilización

Especie	Cantidad	Valor unitario	Valor con IVA
<i>Baccharis linearis</i>	1	\$800 CLP	\$ 952 CLP
<i>Schinus polygamus</i>	1	\$1200 CLP	\$ 1.428 CLP
<i>Oenothera coquimbensis</i>	1	\$800 CLP	\$ 952 CLP

Fuente: Elaboración propia a raíz de visita al vivero.

El vivero cuenta con reparto a domicilio, cuyo valor es de \$80.000 y tiene una capacidad de 2000 plantas por viaje.

3.8. SÍNTESIS GENERAL DEL PLAN DE FITOESTABILIZACIÓN

El depósito de relaves ubicado en la V región, en la comuna de Puchuncaví, específicamente al norte de la ruta F-216 y al oeste de la ruta F30-E, cuenta con un área de 3.457,9m², en donde se utilizarán en total 1729 plantas de 3 especies diferentes, la forma de plantación está dada por un plan de fitoestabilización exitoso realizado en la Planta Matta, ubicada en la IV región, estas plantas se distribuían a 2 metros una de otra. Ver tabla 4-4

Tabla 3-3: Costo asociado a las especies vegetales en CLP

Especie	Cantidad	Valor unitario	Valor sin IVA	Valor con IVA
<i>Baccharis linearis</i>	638	\$800	\$510.400	\$607.376
<i>Schinus polygamus</i>	638	\$1200	\$765.600	\$911.064
<i>Oenothera coquimbensis</i>	453	\$800	\$362.400	\$431.256
Total	1729		\$1.638.400	\$1.949.696

Fuente: Elaboración propia

Estas plantas no necesitan ser regadas de una forma en particular, ya que al ser endémicas, éstas se adecuan de la mejor forma a las condiciones climáticas e hídricas de la zona.

Las especies vienen con un sustrato desde el vivero en donde fueron criadas con un tamaño de 20 x 20 x20, sustrato suficiente para soportar semanas de adaptación en el depósito de relaves.

El vivero que proveerá de estas especies, se llama Pochay, ubicado en Pochay Quillota. Este vivero cuenta con entrega a domicilio, y el costo de este servicio es de \$80.000 IVA incluido por viaje.

Para el plan de fitoestabilización se necesitan en total 1.729 plantas, por lo que se necesita solo un viaje del camión que hace la entrega, ya que no excede su capacidad de carga.

El costo asociado a la adquisición de las plantas para la propuesta de fitoestabilización es de \$1.949.696, más el transporte que tiene un valor de \$80.000, nos da un costo total de \$2.029.696 CLP.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se pudo explicar y reconocer el proceso productivo de la Minera Los Maitenes, esto se logró gracias a las visitas a SERNAGEOMIN y conversaciones con ex trabajadores de la empresa, en dónde revelaron información necesaria para construir el flowsheet, permitiendo generar una visión amplia de los residuos que se contenían en el depósito de relaves.

Esta empresa tenía un plan de negocios ambiciosos, y sujeto a opinión personal, resultaba ser ecológico, esto se debe a que vio oportunidad de negocios a partir de los desecho del horno de reverbero proveniente de ENAMI, Ventanas.

Durante el desarrollo de este trabajo de título, se logró ahondar en las experiencias internacionales y chilenas referente a la estabilización de depósitos de relaves, esto se debe a que existe un movimiento global que busca terminar con estas piscinas de desechos.

Se logró caracterizar las especies vegetales metalófitas estrictas, las cuales retienen los metales pesados en su sistema radicular y hojas, impidiendo así, que se produzca contaminación en las zonas circundantes al foco, y en las napas subterráneas por percolación.

La zona en donde está ubicado el tranque de relaves de la Minera Los Maitenes, es una localidad con una alta contaminación en sus suelos, debido a que está ubicada en una zona industrial en donde estuvo por más de 35 años recibiendo contaminación de la refinería Enami Ventanas, debido a esto, existen numerosos estudios de fito-remediación, que buscan lograr, mediante una alternativa económica y natural, bajar la concentración de contaminantes y con ello mejorar la calidad de vida de las personas, flora y fauna local.

Se debe comprender que tanto la forestación como la fito-remediación son alternativas para mejorar el aspecto de un tranque de relaves, sin embargo la forestación no es recomendada, ya que no se hace ningún estudio previo que relacione la especie a plantar con el sustrato a utilizar, por lo que después de un corto periodo de tiempo, las especies vegetales empleadas para la forestación, terminan padeciendo a las concentraciones anómalas de elementos químicos en el sustrato, por envenenamiento con metales pesados. En cambio, una fitorremediación, es aquella que conlleva un estudio previo, análisis de suelo, y una amplia investigación para seleccionar especies metalófitas las cuales no perturben a futuro la flora local y no se conviertan en plantas invasoras. Por ello es que se recomienda aplicar esta técnica sólo con flora nativa.

La fito-estabilización, es uno de los métodos que más aceptación ha tenido alrededor del mundo, ya que, es una técnica relativamente económica, que ofrece una solución ecológica en las zonas perturbadas por la industria minera. El objetivo de la fito-estabilización, es restaurar la zona perturbada con especies vegetales, para que en un futuro próximo vuelva a tener características similares a la original, posibilitando la repoblación tanto especies vegetales como animales.

Se logró proponer un plan de fito-estabilización, el cual, resulta viable aplicar en el tranque de relaves de la Minera Los Maitenes, debido a que, al identificar los metales pesados presente, se pudo seleccionar un grupo de plantas capaces de crecer y desarrollarse bajo estas condiciones, además el costo asociado por la implementación de esta propuesta no es elevado y no necesita de mano de obra especializada o equipos sofisticados para ponerla en marcha

BIBLIOGRAFÍA

Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central, Valparaiso, Chile, (5), 2008

ANUARIO sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al consejo Económico Social de la Naciones Unidas, Santiago, Chile: Fundación Relaves Chile y Fundación Terran, 2016. 23p.

ASAMBLEA DE VECINOS DE ESQUEL [en línea] <<http://www.eco-sitio.com.ar/node/1000>> [consulta: diciembre 2017]

BIBLIOTECA del congreso nacional. Pasivos Ambientales Mineros En Chile [en línea]. < <http://www.terram.cl/wp-content/uploads/2016/12/APP-N61-Situaci%C3%B3n-de-los-Pasivos-Ambientales-Mineros-en-Chile.-El-Caso-de-los-Dep%C3%B3sitos-de-Relaves.pdf>> [consulta: 18 enero 2018]

BRAVO, Juan. Gestion el caso de Enami Ventanas, Santiago: Evolución S.A, 2005. 234p. ISBN 956-7604-10-x

CARRASCO, Juan. Análisis de Procesos Mineros VI versión MGM Gestión Integrada de Fundición de Concentrados de Cobre [en línea]. <http://www.enm.ucn.cl/intranet_enm_ucn/claroline1107/programas/APM_001/document/Procesos_Mineros___JC.pdf> [Consulta: enero 2018].

CODELCO, Explotación Minera Amistosa con el Medio Ambiente [en línea] <https://www.codelco.com/explotacion-minera-amistosa-con-el-medio-ambiente/prontus_codelco/2011-02-18/093713.html> [consulta: enero 2018]

CODELCO, Manejo de residuos sólidos [en línea] <https://www.codelco.com/manejo-de-residuos-solidos/prontus_codelco/2011-02-18/092630.html> [consulta: diciembre 2017]

CONSEJO MINERO, Gestión de Residuos Industriales Sólidos Mineros y Buenas Prácticas [en línea]

<http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/ProduccionLimpia/ampl_residuos_solidos.pdf> [consulta febrero 2018]

CORDERO, Sebastian, *Carduus tenuiflorus* Curtis (Asteraceae), nuevo registro para la flora alóctona de Chile, Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2011. 68 h

Decreto supremo 132, “Reglamento de seguridad minera”, Sernageomin, Chile, 2002, actualización 2014

Decreto supremo 248, “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves”. Sernageomin, Chile, 2007

GONZALEZ, Isabel. Evaluación de la tolerancia al cobre de dos poblaciones de *Oenothera picensis* Phil. subsp. *picensis* (Onagraceae) [en línea]. Valparaíso, Chile <http://www.gayanabotanica.cl/pdfs/2015/2/08_Gonzalez_&_Neaman_2015.pdf> [consulta: enero 2016]

GONZALEZ, Maria. Mejoramiento de la fitoextracción en plantas nativas en suelos contaminados por actividades mineras en Puchuncaví y Quintero. Memoria (Doctoral Gestión Ambiental). Barcelona, España: Universidad de Barcelona, 2016

KUTSCHER, Constanza. Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras. Noviembre 2016 [en línea] [Consulta: enero 2018]

LAGUNA, Alvarado, Album de fotos de plantas fitorremediadoras 2015 [en línea] <https://es.slideshare.net/raulcc1950/catalogo-de-plantas-fitorremediadoras-54414974> [consulta: enero 2018]

LEÓN-LOBOS Pedro, Rosanna Ginocchio, Baker Alan. Fitoestabilización de Depósitos de Relaves en Chile Guía N° 3: Flora y Vegetación Asociadas a Relaves Mineros Abandonados [en línea]. <<http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/apartado/NR37980.pdf>> [consulta: 06 diciembre 2017]

Ley 19300: aprueba ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente”, Diario oficial de la República de Chile, Santiago, 09 de marzo de 1994. 3-10 p.

MINISTERIO DE MINERIA, ¿Qué es la minería? Chile. Marzo 2018 [en línea] <<http://www.minmineria.gob.cl/¿que-es-la-mineria/historia-de-la-mineria-en-chile/>> [consultado: marzo 2018]

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Normativa ambiental para una minería sustentable, 2012 [en línea] <http://www.expomin.cl/marketing/pdf/2012/presentacion_m_ignacia_benitez.pdf> [consulta: enero 2018]

Muena, Victoria, Isabel Gonzalez, Alexander Neaman, EFECTOS DEL ENCALADO Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL DESARROLLO DE *Oenothera affinis* EN UN SUELO AFECTADO POR LA MINERÍA DEL COBRE. Memoria (Doctorado en gestión ambiental) Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2010. 75 h

PORTAL MINERO. Manual General de Minería y Metalurgia. Santiago, Chile: Portal Minero Ediciones, 2006 [consulta: enero 2018].

REVISTA electrónica Boletín minero [en línea]. 1160, Sociedad nacional de minería, 2002, <http://www.sonami.cl/digital/boletin/1160_2002_08/files/1160_2002_08.pdf> [consulta: enero 2018]. ISSN 0378-0961

ROJAS, Marcelo. Propuesta de fitoestabilización del depósito de relaves San Esteban, de la comuna de Copiapó. Memoria (Magister en Gestión Ambiental), Valparaíso, Chile. Universidad de Valparaíso. 2015. 82 h

Rosanna Ginocchio, Plantas que reducen la contaminación por desechos mineros [en línea]. Revista Electrónica especial recursos genéticos, 2007, 20 <<http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR34426.pdf>> [consulta: 22 de enero]

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERÍA DE CHILE, Atlas de faenas mineras regiones de Valparaíso, del Libertador General Bernardo O'higgins y Metropolitana de Santiago [en línea]. <http://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/Atlas_Faenas_Mineras_09_Region5_6_RM.pdf> [consulta: diciembre 2017]

SONAMI, Cierre de faena mineras: Aspectos Generales de la Ley 20.551, [en línea] < <http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/04/05.-Cierre-de-Faenas-Mineras.pdf>> [consulta: febrero 2018]

YURISCH, TELYE. Situación de los pasivos ambientales mineros en Chile.El caso de los depósitos de relaves. Santiago, Chile: Fundacion Terram, 2016, 33p.

ANEXO A: GLOSARIO

Fito-estabilización: Es el uso de especies vegetales o plantas para remover contaminantes inorgánicos (como metales) u orgánicos (como aceites).

Fito-extracción: Uso de plantas que absorben y concentran en sus partes recolectables (hojas, tallos) los contaminantes contenidos en el suelo

Fito-filtración: Técnica aplicada para la descontaminación de las aguas subterráneas

Fito-remediación: Uso de plantas para reducir, degradar o inmovilizar compuestos orgánicos contaminantes (naturales o sintéticos), de la tierra, del agua o del aire y que provienen de las actividades humanas.

Fito-Volatización: Las plantas absorben el agua contaminada de la litosfera, transportándola desde las raíces hasta sus partes superiores, y transformándola en elementos volátiles menos tóxicos que luego libera a la atmósfera mediante sus hojas.

Flora Nativa: Conjunto de especies vegetales que se pueden encontrar en una región geográfica o que habitan en un ecosistema determinado.

Metalófito: Tipo de planta que sobreviven en suelos contaminados con metales pesados.

Radicular: Raíces Vegetales.