



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA FITOESTABILIZACIÓN
COMO MEDIDA DE MANEJO DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM)
CON EL FIN DE PROPONER EL USO DE TECNOSOLES PARA LA
REHABILITACIÓN AMBIENTAL

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

GABRIEL IGNACIO CONTRERAS ADRIAZOLA

Profesor Guía: Eduardo Martínez H. Ingeniero Forestal. Doctor en Ciencias
Silvoagropecuarias y Veterinarias.

Santiago, Chile
2020

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y
DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA**

**DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA FITOESTABILIZACIÓN
COMO MEDIDA DE MANEJO DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM)
CON EL FIN DE PROPONER EL USO DE TECNOSOLES PARA LA
REHABILITACIÓN AMBIENTAL**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

GABRIEL IGNACIO CONTRERAS ADRIAZOLA

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Dr. Eduardo Martínez Herrera	...6,6...
Prof. Consejero Dr. Juan Pablo Fuentes Espoz	...6,0...
Prof. Consejero Dr. Gerardo Soto Mundaca	...6,0...

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. MATERIAL Y MÉTODOS	8
4.1. Material	8
4.2. Método	10
4.2.1. Actualización del estado del arte de la fitoestabilización para el manejo de PAM en zonas áridas	10
4.2.2. Uso de tecnosoles para rehabilitación ambiental sobre relaves mineros.....	11
4.2.3. Propuesta para el uso de un tecnosol como medida de rehabilitación ambiental en un relave minero en la Región de Coquimbo, Chile	12
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
5.1. Análisis bibliométrico de las referencias utilizadas	13
5.2. Medidas de manejo de PAMs en Chile.....	16
5.2.1. Impactos ambientales de la minería en Chile	17
5.2.2. Minería del Cobre	18
5.3. Fitoestabilización como técnica de rehabilitación ambiental	18
5.3.1. Factores que determinan los resultados de la fitoestabilización	20
5.3.2. Fitoestabilización, medidas complementarias y sinergias	20
5.3.3. Ventajas de la Fitoestabilización como técnica de rehabilitación ambiental	21
5.3.4. Desventajas de la Fitoestabilización	22
5.3.5. Consideraciones importantes para los programas de fitoestabilización.....	23
5.4. Propuesta de uso de Tecnosoles como técnica de rehabilitación de PAMs en zonas áridas.....	24
5.4.1 Fundamentos para la proposición de la técnica	24
5.4.2. Elaboración de tecnosoles	25
5.4.3. Componentes de los tecnosoles y el Concepto de Economía Circular	26
5.4.4. Componentes Orgánicos.....	27
5.4.5. Componentes inorgánicos	30
5.4.6. Leyes y normas relacionadas en Chile	33

5.4.7. Consideraciones importantes para el uso y elaboración de tecnosoles	34
5.4.8. Proyectos de desarrollo, uso y establecimiento de tecnosoles.....	34
5.5. Propuesta de tecnosoles para la Región de Coquimbo, Chile	36
5.5.1. Minería en la Región de Coquimbo, Chile	36
5.5.2. Caso de estudio, Proyecto Delta	37
5.5.3. Enmiendas y componentes disponibles	39
5.5.4. Selección de especies	43
5.5.5. Propuesta de elaboración del tecnosol	44
5.5.6. Consideraciones finales	45
6. CONCLUSIONES	47
7. BIBLIOGRAFÍA	49
8. APÉNDICES	61
8.1. Diseño de tecnosoles	61

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Palabras clave incluidas en la búsqueda.....	10.
Cuadro 2. Palabras clave en búsqueda de material bibliográfico precedente.....	11.
Cuadro 3. Técnicas de fitorremediación y mecanismos por los cuales actúan.....	19.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relave al interior del casco urbano de la ciudad de Andacollo.....	4.
Figura 2. Área de estudio, Planta Delta, ENAMI. Ovalle, Región de Coquimbo.....	9.
Figura 3. Porcentaje de publicaciones científicas encontradas por idioma inglés/español.....	13.
Figura 4. Número de estudios por terminología encontrada en inglés/español.....	14.
Figura 5. Número de estudios encontrados por terminología.....	15.
Figura 6. Porcentaje de estudios encontrados por país de origen.....	16.
Figura 7. Imagen de RCD urbanos domiciliarios.....	31.

Figura 8. Imagen del relave del Proyecto Delta.....	38.
Figura 9. Sedimentos del embalse Recoleta.....	41.

1. RESUMEN

La minería es una actividad económica muy importante para Chile y el mundo, practicándose ampliamente en el país. Dada la magnitud de sus operaciones, la minería genera grandes volúmenes de desechos, entre ellos los relaves. Los relaves generan fuertes impactos sobre el medio ambiente dada su gran extensión y composición, en algunos casos tóxica.

Mediante la búsqueda y sistematización de información existente en la literatura científica se procedió a describir y analizar el estado del arte de la fitoestabilización como medida de manejo de relaves mineros. Igualmente, se estudió el uso de tecnosoles con propósito de la rehabilitación ambiental en zonas áridas y con ello, analizar la posibilidad de su uso y aplicación sobre relaves en Chile, particularmente en la Región de Coquimbo, caracterizada por poseer la mayor concentración de relaves del país y tener un clima semiárido.

A través del estudio de las referencias encontradas se determinaron los principales factores que afectan el éxito de la rehabilitación ambiental al usar estas medidas. El primer factor se refiere a los materiales que componen al tecnosol, los que deben estar constituidos por una mezcla de componentes orgánicos e inorgánicos. Es importante que los materiales que lo componen se produzcan como desechos de otra actividad, estén disponibles abundantemente y se localicen espacialmente cerca de los relaves a intervenir.

Otro factor de importancia son las especies de plantas a establecer sobre relaves y tecnosoles, las cuales deben poseer características estabilizadoras, además de ser nativas y tolerar las condiciones desfavorables de los climas semiáridos.

Se concluye a partir de este estudio que es factible el uso de tecnosoles y vegetación estabilizadora para la rehabilitación ambiental sobre relaves mineros, principalmente porque su empleo es económico y existe una gran disponibilidad de componentes que pueden ser revalorizados y con ello se producen beneficios ambientales múltiples al reducir la generación de residuos.

Por otra parte, existe una gran necesidad de proyectos que investiguen y evalúen las mejores maneras de implementar tecnosoles, de tal forma que su uso sea eficiente y exitoso en el largo plazo en cuanto al desarrollo y sucesión de la vegetación.

Palabras clave: relaves mineros, recuperación ambiental, zonas áridas y semiáridas, economía circular.

2. ABSTRACT

Mining is an economic activity of considerable importance for Chile and the rest of the world that is why it is widely practiced in the country. Given the magnitude of its operations, mining generates large volumes of waste, among them the tailings. Tailings generate strong impacts on the environment for their huge extent and their composition, in some cases toxic.

The state of the art of phytostabilization was described and analyzed by means of the search and systematization of existing information in the scientific literature, as a measure of mine tailings management. Likewise, the uses of technosols was studied for the purpose of environmental rehabilitation in arid zones and with it, analyze the possibility of its use and application on mining tailings in Chile, particularly in the Coquimbo Region, characterized by having the highest concentration of tailings of the country and owning a semi-arid climate.

The main factors determining the success of the environmental rehabilitation were analyzed through the study of the references found. These factors are the materials that make up technosol, which must be made up of a mixture of organic and inorganic components. To develop an effective technosol, it is very important that these materials comes as waste from another activity, are abundantly available and are located spatially near the tailings to intervene.

Another important factor is the plant species to be established on the tailings treated, which must have stabilizing characteristics, in addition to being native and tolerating the unfavorable conditions of semi-arid climates.

It is concluded from this study that there is a great possibility of using technosols and stabilizing vegetation for environmental rehabilitation on mining tailings, mainly because its use is economical, there is a great availability of components that can be revalued and with it multiple environmental benefits are generated by reducing the generation of waste.

On the other hand, there is a great need for projects that investigate and evaluate the best ways to implement technosols, so that their use is efficient and successful in the long term in terms of the development and succession of vegetation.

Key words: mining tailings, environmental recovery, arid and semi-arid zones, circular economy.

3. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad económica de vital importancia para toda sociedad, ya que de ella se generan enormidad de productos que requieren de las materias primas que provee. Sustenta el desarrollo de otras actividades industriales de gran importancia como la agricultura, la pesca, la industria tecnológica, entre muchas otras, que dependen de estas materias para elaborar maquinaria y los productos que emplean (Oyarzún *et al.*, 2011).

Sin embargo, más allá de su relevancia, es una actividad que genera numerosos y profundos impactos ambientales, produciendo variadas formas de contaminación. Destacan el levantamiento de material particulado y emisión de gases contaminantes, al igual que la generación de residuos sólidos y líquidos (Dudka y Adriano, 1997; Bell, 1999; Tordoff *et al.*, 2000; Méndez y Maier, 2008; Orchard *et al.*, 2009), que dado su gran volumen, su eliminación constituye un problema complejo de solucionar.

Según el Ministerio de Minería (2019), los relaves corresponden al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos que queda como resultado de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos).

Debido a la composición de los depósitos de relaves mineros es que, en su mayoría son inertes y tóxicos y sus características son muy adversas para la vegetación (Tordoff *et al.*, 2000; Méndez y Maier, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008; Bolan *et al.*, 2011). Además con frecuencia tienen el riesgo latente de contaminar cursos de agua cercanos, afluentes superficiales o napas subterráneas, por lo que es particularmente importante ubicarlos de manera estratégica de tal forma que se minimicen estos riesgos, sin embargo, siguen constituyendo una fuente de contaminantes y difícilmente puede establecerse vegetación sobre ellos.

La fitorremediación es una técnica utilizada en numerosos proyectos que buscan minimizar la concentración o presencia de contaminantes en una determinada ubicación, ya que aprovecha la capacidad que ciertas plantas poseen para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo; más aún, es una medida que se caracteriza por su bajo costo de implementación y versatilidad de aplicación (Singh y Jain, 2003; Méndez y Maier, 2008; Bolan *et al.*, 2011; Delgadillo *et al.*, 2011; Ginocchio y León-Lobos, 2011).

Pese a ello, dada la gran dificultad de establecer naturalmente cualquier tipo de vegetación sobre un sedimento inerte (Figura 1), carente de materia orgánica y con baja capacidad de retención de agua es que por sí sola esta técnica es una medida insuficiente.



Figura 1. Relave al interior del casco urbano de la ciudad de Andacollo, Región de Coquimbo, Chile. Se observa el material carente de vegetación. Fuente: Revista Técnicos Mineros, 2020.

El desarrollo de tecnosoles o suelos artificiales elaborados a partir de distintos componentes, cuyo estudio y análisis es materia del presente proyecto, podría ofrecer soluciones en el ámbito de la rehabilitación ambiental que se requiere tras la ocurrencia de los impactos que genera la actividad minera.

Los tecnosoles podrían constituir una técnica capaz de mejorar sustancialmente los resultados de las medidas de mitigación o compensación requeridas en las resoluciones de calificación ambiental descritas en la ley 19.300 de bases generales del medio ambiente (1994, modificada el año 2020), referentes a la revegetación y tratamiento de relaves posteriormente a su cierre. El uso de tecnosoles se debe a la necesidad de contar con las propiedades edáficas requeridas para constituir sustratos aptos para albergar vegetación, con lo cual, aumentaría el éxito en el establecimiento y supervivencia de las plantas dispuestas sobre ellos, dando así cumplimiento a los requerimientos legales, al igual que generar importantes beneficios ambientales, sociales y paisajísticos (Macías *et al.*, 2007; Bolaños, 2014; Wang *et al.*, 2017).

Según un catastro realizado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2020), la Región de Coquimbo es, a nivel nacional, la que cuenta con el mayor número de depósitos de relave, con 389 de un total de 757, equivalentes al 51,38% del país, los cuales en su mayoría se encuentran en estado de abandono. Comúnmente estos relaves no reciben tratamiento alguno o las medidas estabilizadoras que se aplican son insuficientes y no responden al problema de manera directa. Es por ello que pese a la gran información disponible es indispensable la realización de un análisis crítico que considere el escenario y características de la realidad nacional respecto del manejo de PAMs y las posibilidades de aplicar nuevas medidas y la manera más adecuada de ajustarlas a dicho contexto.

En Chile, la legislación ambiental referente a la actividad minera y los relaves, cumple con ciertas medidas que buscan resguardar la vida y salud humana, así como el medio ambiente. Sin embargo, las actuales medidas de remediación ambiental y los estándares exigidos por ley son muy inferiores a lo establecido en países como EE.UU. (Oblasser y Chaparro, 2008), nación que para el cumplimiento de sus estándares recurre a las alternativas más económicas que aseguren el logro de buenos resultados.

Información aportada por Casale *et al.* (2011) sobre el estado de los relaves mineros en la Región de Coquimbo, indican que el 84% de los relaves se encuentra en estado de abandono y el 91,6% carece de forestación. Estas condiciones generan que solo el 8% (aproximadamente) de los relaves en esta región no sufre procesos de erosión y dispersión eólica de sus contaminantes; el resto de los relaves sufre erosión y dispersión moderada o intensa, con los consecuentes problemas ambientales y sociales que se generan.

En este contexto y en consideración de que muchas veces las medidas adoptadas por las empresas mineras en cuanto al manejo posterior de los relaves, no consideran su estabilidad a largo plazo y, por otra parte, la legislación es poco precisa o rigurosa en cuanto a las acciones de manejo y seguridad que exige, es que en Chile se han producido varios accidentes ambientales con serias consecuencias, así como severos eventos de contaminación ambiental.

Medvinsky *et al.* (2015), señalan varios ejemplos históricos. Uno de los casos más graves registrados en Chile se produce el año 1965 cerca de la localidad de Calera, Región de Valparaíso, a causa de un terremoto. Con el movimiento de la tierra, hubo un colapso en la estabilidad física del muro de confinamiento de un tranque de relave, correspondiente a la mina El Soldado. Al ceder el muro, se produjo un deslizamiento del relave, lo que sepultó todo un pueblo minero habitado, muriendo de esta manera más de 200 personas.

Otro grave accidente se produjo durante un evento climático inusual de lluvias abundantes que afectó a las regiones de Atacama, Antofagasta y Coquimbo en el año 2015. Varios tranques de relave cedieron, provocando aluviones con este material, los cuales contaminaron numerosos pueblos mineros y sepultaron varios otros, incluyendo el pueblo de Chañaral casi por completo, evento en el cual se registraron 31 personas fallecidas y 49 desaparecidas (Medvinsky *et al.*, 2015).

Otro caso es el de la mina abandonada Las Palmas. A raíz del terremoto del año 2010, el tranque de dicha mina cedió y generó un aluvión que sepultó una casa y mató a sus cuatro habitantes, además de generar la contaminación de cientos de kilómetros del Valle las Palmas (Medvinsky *et al.*, 2015).

Un caso de gran contaminación ambiental es el de la Bahía de Chañaral, la cual por más de 52 años recibió a través del cauce del Río Salado, más de 320 millones de toneladas de sólidos residuales mineros, y más de 850 millones de toneladas de aguas residuales de procesos industriales de una mina de cobre cercana. Este suceso hizo retroceder alrededor de dos kilómetros el borde del océano, generando una playa artificial estéril, compuesta por residuos mineros catalogados como corrosivos y tóxicos (Medvinsky *et al.*, 2015).

Otro ejemplo es la situación del pueblo de Andacollo, en el cual se encuentran más de 18 relaves insertos en plena ciudad. Esto lo llevó a ser declarado el año 2009 como 'Zona saturada de contaminación por material particulado', contando con el mayor número de enfermedades respiratorias en el país. Desde entonces, se han realizado algunas medidas de mitigación, como extraer y relocalizar los relaves o fitoestabilizarlos (Medvinsky *et al.*, 2015).

Los accidentes vinculados a los tranques de relave, así como los conflictos socioambientales que se producen con ellos, están estrechamente relacionados a algunas consideraciones que deben tenerse en la planificación de un proyecto minero y no siempre son bien abordadas. Esas consideraciones son referentes a la ubicación del tranque de relave del proyecto, teniendo en cuenta que se deben evitar escurrimientos del relave a pueblos, cursos de agua o ecosistemas cercanos, y en relación a las obras necesarias para asegurar la estabilidad del tranque y evitar fugas del relave o su dispersión en el medio.

Por otra parte, la falta de proyectos de desarrollo e investigación de medidas de manejo de relaves, genera un problema en la calidad de información de las empresas, al momento de presentar los planes de cierre de las faenas mineras. Dado el escaso desarrollo de estas materias, es necesario el estudio de las medidas más convenientes a adoptar para el manejo de los relaves. Es por ello que, se requiere de trabajos de investigación que analicen y evalúen la oportunidad de uso de las distintas técnicas existentes y su aplicación en el contexto país, y que ofrezcan medidas viables de rehabilitación ambiental.

Es necesario el desarrollo e investigación de trabajos de campo que permitan generar experiencias y conocimientos, de manera que se perfeccione el uso de las técnicas propuestas de estabilización de PAMs, y éstas contribuyan a lograr soluciones ambientales en diversas áreas productivas, a través de la revalorización y reutilización de residuos. Pese a la promoción que se hace del empleo de la fitoestabilización y recientemente del uso de tecnosoles, es necesario evaluar y desarrollar estas técnicas integradas en la realidad nacional, por lo que queda un amplio esfuerzo por hacer y toda una línea investigativa en materia de rehabilitación ambiental y manejo de pasivos ambientales.

El objetivo general de este trabajo fue realizar un análisis crítico de las actuales medidas de manejo de Pasivo Ambientales Mineros (PAM), proponiendo el uso de tecnosoles para la rehabilitación ambiental sobre relaves de zonas áridas e identificar brechas de información que permitan ser cubiertas con nuevas investigaciones. Específicamente se espera:

- Actualizar el estado del arte de la fitoestabilización para el manejo de PAM en zonas áridas.
- Proporcionar los antecedentes necesarios y proponer distintos mecanismos para la elaboración de suelos artificiales o tecnosoles para rehabilitación ambiental sobre relaves mineros en zonas áridas.
- Elaborar una propuesta de construcción e implementación de tecnosol para la rehabilitación ambiental sobre un relave minero en la Región de Coquimbo, Chile.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Material

El material empleado consiste en la bibliografía científica disponible en medios digitales, informes técnicos de proyectos relacionados con tecnosoles u otros cuyos contenidos sean de relevancia o se vincule con el objeto de estudio y constituya un aporte de información para el presente trabajo.

Se analizó el caso específico del proyecto FIC-R de Tecnosuelos, el cual es un ensayo de implementación de un tecnosol sobre un depósito de relave con el propósito de su rehabilitación ambiental. Sus características fueron objeto de estudio. Para ello se trabajó con los informes técnicos entregados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) para la autorización del proyecto Delta, a cargo de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), correspondientes a la Evaluación de Impacto Ambiental requerida para su aprobación. De la misma manera se trabajó con la ficha de proyecto aprobado.

Este proyecto contempla la habilitación de una superficie de 102 hectáreas para el emplazamiento de los relaves espesados que se produzcan como resultado de los procesos de minería, con una capacidad para contener 10 millones de toneladas de material. Su ubicación es en las coordenadas UTM WGS 84 Huso 19 6.623.000 N y 286.500 E.



Figura 2. Área de estudio, Planta Delta, ENAMI. Comuna de Ovalle, Región de Coquimbo.

4.2. Método

El método empleado consiste en una búsqueda y sistematización de documentación científica existente, al igual que los informes técnicos de proyectos de implementación, desarrollo y/o elaboración de tecnosoles o cualquier otro cuyo contenido sea de relevancia o se vincule con el presente trabajo.

Adicionalmente, se analizó el caso específico de un ensayo en la Región de Coquimbo, donde se proponen distintos tratamientos para la estabilización de un relave, como parte de los trabajos de investigación propios de la Gerencia de Sustentabilidad ENAMI (Delta) y del proyecto FIC-R de Tecnosuelos.

4.2.1. Actualización del estado del arte de la fitoestabilización para el manejo de PAM en zonas áridas

Se revisaron las fuentes bibliográficas incluidas en revistas especializadas en las bases de datos ISI - Web of Science, Scopus, ScienceDirect, EBSCO, Wiley, Nature, Springer, Oxford U. Press, IEEE, Westlaw Chile, ACS, JSTOR, Sage Journals, Digitalia, entre otras disponibles en el sistema de biblioteca de la Universidad de Chile. Para realizar la búsqueda se utilizaron palabras clave, escritas tanto en inglés como en español. La búsqueda se acotó en el contexto de pasivos ambientales mineros, climas áridos y semiáridos, entre otras. Adicionalmente, se realizó la búsqueda de las palabras clave y sus combinaciones en la plataforma *Scholar Google*. Con la información documental obtenida se procedió a la lectura y selección del material, el cual se incluyó como parte del presente documento.

Cuadro 1. Palabras clave incluidas en la búsqueda.

Español	Inglés
Fitoestabilización	Phytostabilization
Fitorremediación	Phytoremediation
Pasivos ambientales mineros	Mining Environmental Liabilities
Zonas áridas	Arid zones
Climas semiáridos	Semi-arid climates
Depósitos de relaves	Mining tailings, tailings dam

4.2.2. Uso de tecnosoles para rehabilitación ambiental sobre relaves mineros

El desarrollo y la implementación de tecnosoles constituyen una técnica con diversas aplicaciones, puesto que no es una medida convencional, existen escasos ejemplos de proyectos que trabajen en ellas. Fue necesaria la compilación de la información existente en la literatura, luego su evaluación y selección implicó verificar la procedencia y validez de la fuente. Finalmente se estableció el marco teórico y las aplicaciones existentes.

Posteriormente se realizó un análisis bibliográfico exhaustivo que recogió los resultados de los proyectos precedentes, los componentes y técnicas empleadas en la ejecución de los tecnosoles y la conveniencia de su uso y aplicaciones. Para ello, se consideró un número mínimo de 30 publicaciones, lo que se consideró como muestra suficiente para conocer la efectividad de la técnica y las mejores maneras de aplicarla.

Sobre la base de las distintas características de los relaves, como su composición, pH, salinidad y humedad, y el manejo que se hace de ellos en la minería convencional, se propusieron directrices para la aplicación de esta técnica según las condiciones imperantes en minería de zonas áridas y semiáridas, y según los requerimientos particulares de cada proyecto y su relave. De esta forma se propuso de manera teórica, sobre la base teórico-empírica existente, el mecanismo para la ejecución de la rehabilitación ambiental a través del uso de tecnosoles.

Cuadro 2. Palabras clave incluidas en la búsqueda de material bibliográfico precedente.

Español	Inglés
Tecnosol	Technosoil
Sustentabilidad	Sustainability
Economía circular	Circular economy
Lodos de aguas residuales domésticas	Domestic wastewater sludge
Residuos de construcción y demolición	Construction and demolition waste
Gestión del agua	Water management

La búsqueda de palabras clave consideró además de las ya señaladas, los términos relacionados con ellas.

4.2.3. Propuesta para el uso de un tecnosol como medida de rehabilitación ambiental en un relave minero en la Región de Coquimbo, Chile

Para ejemplificar el procedimiento de planificación para la elaboración y uso de los tecnosoles como técnica de rehabilitación ambiental se revisó el caso específico del proyecto Delta, a cargo de ENAMI en la Región de Coquimbo. Se realizó un análisis bibliográfico (basado principalmente en los informes públicos de ENAMI), sobre la composición de su relave, la gestión del agua, pH y otras propiedades químicas y físicas. De esta manera se pudo identificar la clase de tecnosol apropiada para ser implementado en el relave, con el fin de asegurar la supervivencia de la vegetación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis bibliométrico de las referencias utilizadas

La mayor proporción de las búsquedas se realizó a través del motor 'Scholar Google'. En cuanto a la fuente de los textos revisados, existió una gran presencia de publicaciones encontradas en ELSEVIER, plataforma de divulgación científica, en segundo lugar, muchos textos fueron obtenidos por la plataforma SpringerLink. El resto de las publicaciones fueron obtenidas en una amplia variedad de revistas y plataformas de divulgación científica.

Con un total de 140 documentos leídos y utilizados como referencias en este trabajo, 60,9% corresponden a textos en idioma inglés y 39,1% a textos en idioma español. Si se excluyen de este número los textos referentes a leyes o estadísticas de Chile y se considera únicamente la literatura científica utilizada, el número de textos en idioma español es de 50, (Figura 3).

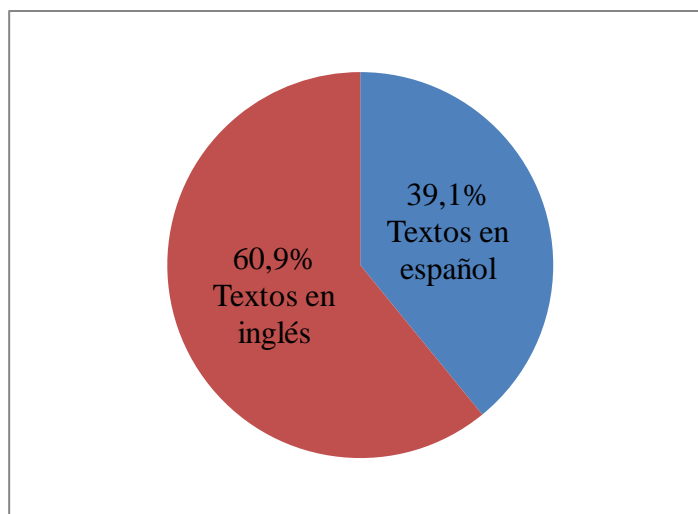


Figura 3. Porcentaje de publicaciones científicas encontradas por idioma inglés/español.

A partir de esta información se puede evidenciar que la mayor cantidad de trabajos e investigaciones científicas son realizados en idioma inglés. Pese a ello, varios de esos textos son hechos en países o por personas de habla hispana.

En cuanto a la proporción de términos clave por idioma, existe una gran diferencia para las tres palabras claves en sus versiones inglés/español, las cuales son *technosoil* / tecnosol, *phytoremediation (phytostabilization)* / fitorremediación (fitoestabilización) y *restoration (rehabilitation)* / restauración (rehabilitación).

En la Figura 4 se muestra la relación de cada término según idioma.

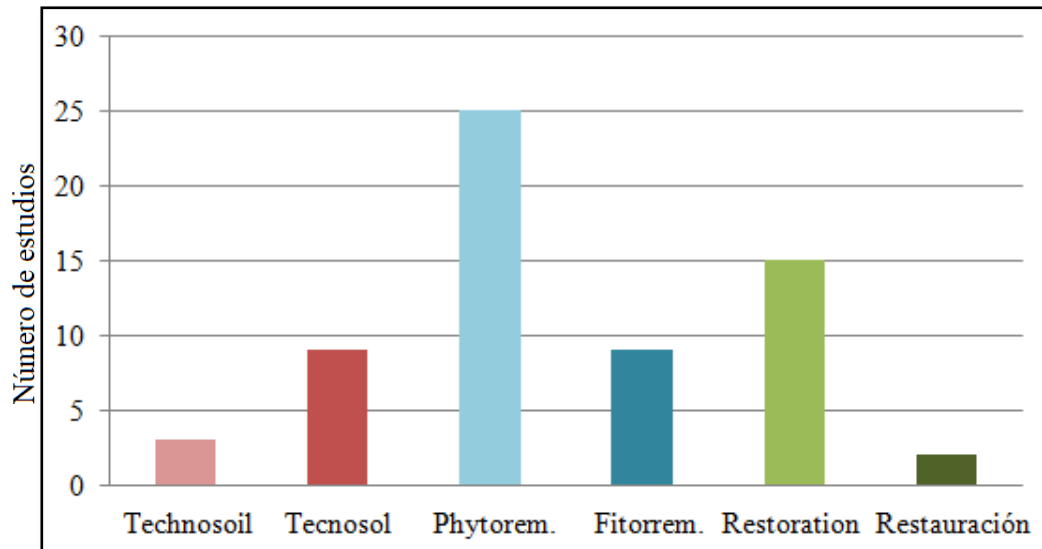


Figura 4. Número de estudios por terminología encontrada en inglés/español.

Existe una gran cantidad de trabajos que no emplean el uso de la palabra *tecnosol* o *technosoil* para describir sus actividades, pese a lo cual son trabajos que emplean tecnosoles de todas maneras, ya que a pesar de que los autores no los identifiquen como tal, las acciones que realizan al incluir enmiendas y mezclas sobre los suelos con propósito de rehabilitación ambiental, constituyen por definición tecnosoles.

Es así como se encuentra un total de 17 publicaciones que tratan sobre enmiendas o mejoradores de sustrato y sus combinaciones para la rehabilitación de relaves mineros y suelos degradados. Así mismo se encuentra un total de 26 publicaciones relacionadas con la reutilización de desechos u otros productos para la elaboración de enmiendas y sus mezclas, que aunque no sean identificados como tecnosoles, por definición lo son.

También fueron identificados otras palabras y conceptos por los cuales se obtuvo información relacionada de gran utilidad, (Figura 5).

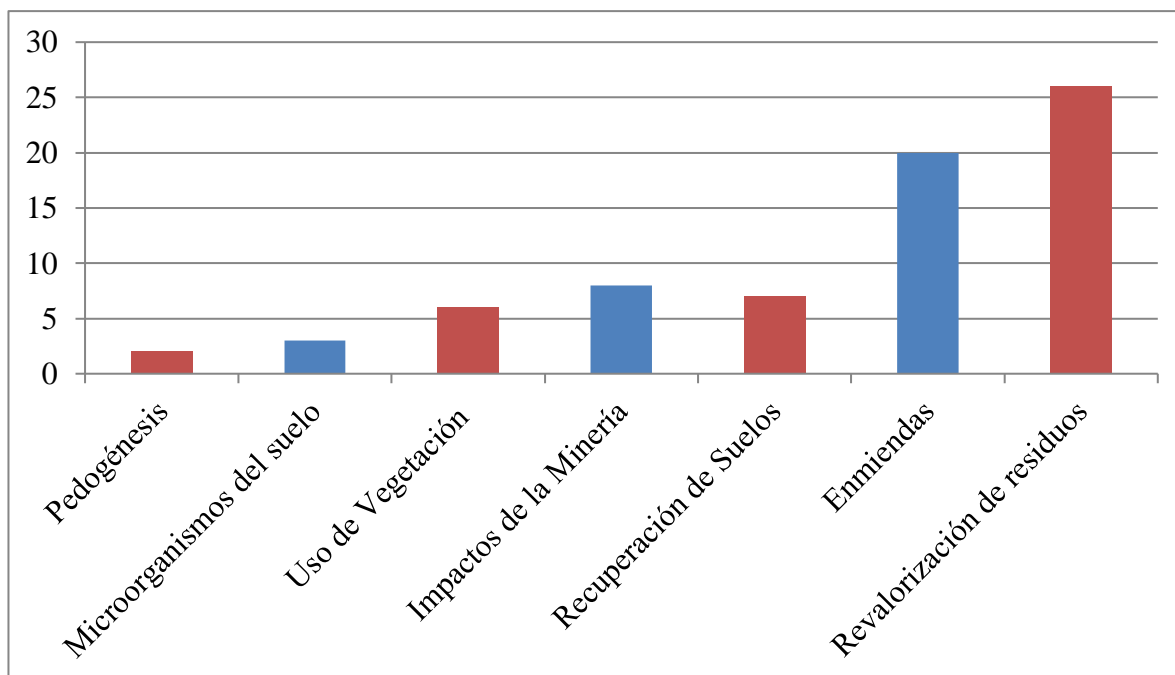


Figura 5. Número de estudios encontrados por terminología.

En cuanto a la nacionalidad y origen de las publicaciones, España es el país que se encuentra a la vanguardia con un total de 27 publicaciones consultadas, tanto en el uso y desarrollo de tecnosoles como en diversas materias de la rehabilitación ambiental sobre relaves mineros. En segundo lugar se encuentra Estados Unidos e Inglaterra con 15 y 12 publicaciones respectivamente, estos países también presentan un amplio desarrollo e investigación respecto de tecnologías fitorremediadoras y fitoestabilizadoras, así como también en el uso de tecnosoles y el estudio de suelos y ecosistemas degradados y su recuperación o rehabilitación ambiental.

Dentro de estos mismos criterios también destacan por número de publicaciones consultadas países como Italia (6), Alemania, Canadá y Portugal (4 c/u); China, Australia, Suiza, Francia y Países Bajos (3 c/u). En menor medida se encuentran ejemplos en Bélgica, México, Austria, Perú, Colombia, Japón, Suecia, Corea del Sur, India, Grecia, Argentina, Nueva Zelanda y Bangladesh.

La mayor proporción de estudios consultados realizó sus actividades en contextos de zonas áridas o semiáridas, por lo cual sus limitaciones y resultados son, al menos en relación con el factor climático, similares a lo que se podría esperar para el caso de Chile y la región de Coquimbo. Países como España, Estados Unidos, Italia, México, Portugal, Australia, poseen territorios desérticos y semidesérticos con características similares a las de la zona centro norte de Chile (Figura 6).

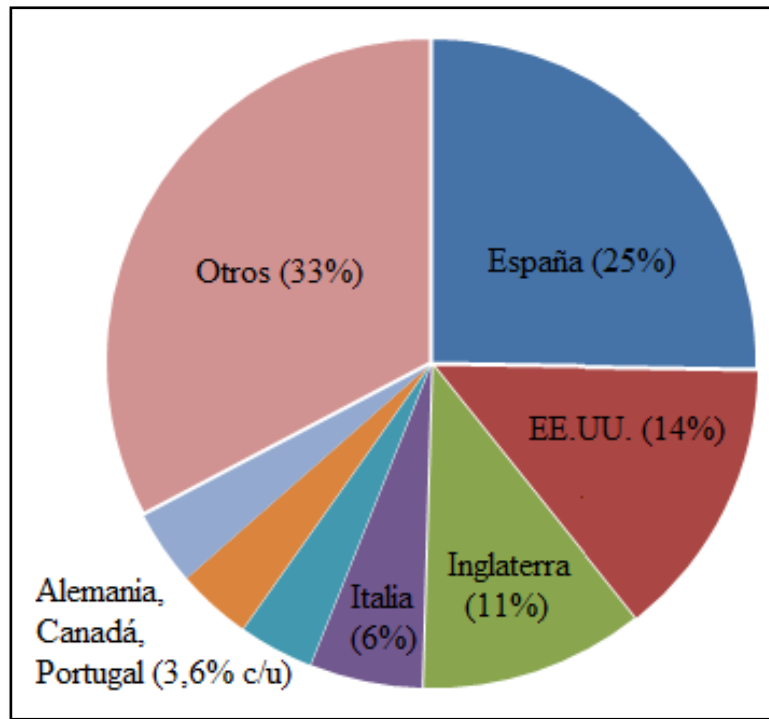


Figura 6. Porcentaje de estudios encontrados por país de origen.

Chile es otro país con una gran cantidad de publicaciones consultadas, con un total de 26, de las cuales en su mayoría son trabajos de uso, implementación e investigación de tecnologías fitoestabilizadoras/fitorremediadoras. Por otra parte, también existen 9 trabajos que estudian la generación de residuos y sus medidas de gestión y reutilización posteriores, en rubros como la construcción y agricultura.

5.2. Medidas de manejo de PAMs en Chile

En Chile el sector minero históricamente ha generado un importante aporte económico al Producto Interno Bruto Nacional, con casi 3.988 mil millones de pesos, Banco Central de Chile (BCC, 2020). La industria minera ha tenido gran presencia y desarrollo a lo largo del país y si bien se han incorporado paulatinamente nuevas tecnologías que hacen de la explotación y todas sus fases un proceso más eficiente, sigue generando fuertes impactos ambientales, tanto por su magnitud espacial como por su intensidad.

En este sentido, a partir del año 2000 surgió la preocupación y toma de acciones respecto de la remediación de los impactos generados por la minería, así como las acciones de mitigación y/o compensación respecto de la generación de PAMs (Oblasser y Chaparro, 2008). Hasta entonces, la actividad minera no contemplaba ningún tipo de acción

remediadora y los depósitos de relaves eran abandonados una vez terminada la explotación de las minas.

El año 2011 con la promulgación de la Ley 20.551 (Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras) con vigencia a partir del 11 de noviembre del 2012 y luego con la promulgación del Decreto 41 (Aprueba Reglamento de la Ley De Cierre De Faenas e Instalaciones Mineras), Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCNC, 2012), con vigencia a partir del 22 de noviembre del año 2012, se establece el marco legal e institucional que se debía adoptar para el cierre de una mina, contemplando en su vida útil la etapa de cierre. Esto tuvo como consecuencia que las acciones de mitigación ambiental a seguir debían ser previstas e indicadas con anterioridad según las exigencias de la Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (BCNC, 2020).

El corto periodo de tiempo con vigencia de esta legislación, la escasa experiencia respecto de la rehabilitación ambiental y el manejo de los PAM, sumado a la inexactitud y escuetas exigencias de la ley, han derivado en que las acciones realizadas en esta materia sean en muchos casos insuficientes, o no respondan de forma directa a los impactos generados por la actividad minera.

5.2.1. Impactos ambientales de la minería en Chile

La minería es una actividad de gran importancia para el país. Sin embargo, posee grandes riesgos para el medio ambiente, el sector silvoagropecuario y la salud humana. La generación de enormes cantidades de residuos sólidos y sus características fisicoquímicas pueden afectar el agua, suelo, aire, flora, fauna y derivar en la degradación de ecosistemas (Bell, 1999; Ginocchio y Baker, 2004; Orchard *et al.*, 2009). De igual manera, los impactos que genera la minería en el medio físico que ocupa están relacionados con los daños mecánicos sobre el paisaje y la destrucción de los ecosistemas (Dudka y Adriano, 1997; Tordoff *et al.*, 2000).

Uno de los impactos más notables que genera esta actividad son los depósitos o tranques de relave. Los relaves corresponden a un residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos que queda como resultado de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo es transportado hasta los depósitos o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (Ministerio de Minería, 2019).

En Chile, principalmente en la región de Coquimbo, existe una alta concentración de depósitos de relave abandonados, encentrándose en ella 106 de los 170 existentes (Méndez y Maier, 2008; Orchard *et al.*, 2009). Los relaves poseen una alta concentración de metales pesados, así como otros elementos y compuestos tóxicos (Dudka y Adriano, 1997; Lagos *et al.*, 1998; Peppas *et al.*, 2000), por lo que son un riesgo latente que puede generar diversos problemas ambientales y sociales.

En la etapa de cierre de una mina, los relaves suelen quedar al descubierto y dadas las condiciones semiáridas y clima mediterráneo predominante en Chile central, pasan por un

proceso de deshidratación, dejando un sedimento seco compuesto por partículas finas que quedan expuestas a distintos factores de dispersión como lo son el viento y la lluvia (Peppas *et al.*, 2000; Santibáñez *et al.*, 2008; Grandlic *et al.*, 2008). Adicionalmente, al quedar expuestos a la intemperie pueden reaccionar con el agua y el oxígeno y generar drenaje ácido y/o la lixiviación de los metales, con la consecuente potencialidad de contaminar los suelos y cursos de agua cercanos (Goodman, 1974; Bell, 1999; Peppas *et al.*, 2000; Santibáñez, 2006).

5.2.2. Minería del Cobre

El cobre es el mineral metálico de mayor explotación en Chile, su minería presenta una gran problemática relacionada con la baja proporción de cobre mineral obtenible en las rocas de las que se extrae (Minerals Yearbook, 1992; Dudka y Adriano, 1997). Esto ocasiona que dentro de los impactos generados por la minería metálica, el cobre sea una de las industrias que genera los mayores desplazamientos de tierra y los mayores volúmenes de residuos y relaves (Jolly, 1985; Dudka y Adriano, 1997; Tordoff *et al.*, 2000).

Además de los impactos generados por la minería del cobre, existen los relacionados a su fundición y refinación. Estas industrias que procesan el cobre generan enormes emisiones de gases tóxicos, como lo son el dióxido de carbono (CO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) (Dudka y Adriano, 1997). Estos contaminantes ocasionan serios efectos perjudiciales para el medio ambiente, los cultivos y la salud humana (Smith y Bradshaw, 1972); sin embargo, en la actualidad se aplican procesos por los cuales se captura el SO₂ y se convierte en ácido sulfúrico (H₂SO₄), el cual es utilizado en la industria minera.

5.3. Fitoestabilización como técnica de rehabilitación ambiental

La fitoestabilización es una tecnología relativamente reciente que se basa en la capacidad de las plantas para disminuir la biodisponibilidad de metales al propiciar su precipitación a formas menos solubles como carbonatos o sulfuros metálicos, a través de la interacción de metales con productos orgánicos y por absorción y acumulación de metales en tejido radicular (Cunningham *et al.*, 1995; Wong, 2003). Su objetivo es reducir la movilidad de los elementos o compuestos contaminantes de un sustrato a través del establecimiento de vegetación sobre él y la acción de sus raíces, con lo cual se disminuye el riesgo que estos representan sin tener que extraerlos de su lugar (Méndez y Maier, 2008; Bolan *et al.*, 2011).

La fitoestabilización no solo usa la capacidad de las plantas para reducir la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, también a través de la cubierta aérea de la vegetación se puede reducir la erosión por viento y lluvia, las raíces previenen la erosión por arrastre de agua, inmovilizan los metales y previenen su lixiviación (Cunningham *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 2017).

El objetivo de la fitoestabilización es generar en el largo plazo una comunidad vegetal capaz de sustentar los procesos naturales de formación del suelo, prevenga la dispersión de los contaminantes, promueva la actividad microbiana del suelo y restaure las funciones ecosistémicas a fin de lograr una comunidad vegetal autosustentable (Méndez y Maier, 2008; Wang *et al.*, 2017).

La fitoestabilización es parte de un conjunto de técnicas que se agrupan dentro de la Fitorremediación. La fitorremediación es una tecnología que usa las distintas capacidades remediadoras de las plantas respecto de la contaminación de suelos y aguas. Es efectiva tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos y en el último tiempo ha sido bastante investigada y recurrida debido a su seguridad de aplicación, como a su bajo costo, además de los beneficios ambientales que genera (Chaney *et al.*, 1997; Dary *et al.*, 2010; Glick, 2010). Distintos estudios han tenido resultados prometedores, se destacan de esta técnica las ventajas de ser *in situ* y su eficiencia en los costos de aplicación (Wang *et al.*, 2017).

Cuadro 3. Técnicas de fitorremediación y mecanismos por los cuales actúan.

Técnica de Fitorremediación	Mecanismo de Acción
Fitoestabilización	Efecto mecánico de la vegetación. Complejación y precipitación de metales. Acumulación en tejido radicular.
Fitoextracción	Hiperacumulación de metales en tejido vegetal, principalmente tejido aéreo.
Fitovolatilización	Transformación de los contaminantes, transporte y volatilización a través de las hojas.

Adaptado de lo propuesto por Marques *et al.*, 2009.

Dentro de los métodos tradicionales de manejo de relaves mineros destacan los físicos y químicos. Sin embargo, estos métodos poseen grandes limitaciones referidas a su alto costo de aplicación, baja eficiencia y la generación de impactos secundarios. Por otra parte, las técnicas de fitorremediación son *in situ*, atienden de manera directa el problema de los relaves, por lo cual cuentan con grandes oportunidades de ser aplicadas (Méndez y Maier, 2008; Grandlic *et al.*, 2008; León-Lobos *et al.*, 2011).

5.3.1. Factores que determinan los resultados de la fitoestabilización

Las principales problemáticas a las que se enfrentan los proyectos de fitoestabilización están relacionadas a las condiciones ambientales en las que se establecen las plantas. El factor del clima es preponderante, las especies seleccionadas deben estar adaptadas al clima local (León-Lobos *et al.*, 2011). En climas áridos y semiáridos deben ser resistentes a la sequía (Méndez y Maier, 2008). Otros factores climáticos como la lluvia y la temperatura pueden no solo afectar el crecimiento de las plantas, sino también generar reacciones químicas en los contaminantes y erosión del suelo (Bolan *et al.*, 2011).

Las características físicas y químicas de los relaves de la minería metálica son muy perjudiciales para el establecimiento y crecimiento de la vegetación, no solo por la alta concentración de contaminantes, sino también por la baja cantidad de nutrientes, las deficientes condiciones de estructura del sustrato, un alto pH, alta salinidad, deficiencia de materia orgánica, ausencia de microorganismos y actividad biológica, y su baja capacidad de retención de agua (Munshower, 1994; Cunningham *et al.*, 1995; Tordoff *et al.*, 2000; Grandlic *et al.*, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008; Bolan *et al.*, 2011; Santibáñez *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017).

Los relaves son susceptibles a la erosión por agua y viento, lo que también limita el establecimiento de la vegetación (Bradshaw y Chadwick, 1980), más aún, pueden ocurrir procesos de compactación superficial, incluso procesos de cementación que pueden generar una barrera superficial impenetrable, lo que genera enormes dificultades para el establecimiento de las plantas (Bradshaw *et al.*, 1978).

Dadas estas condiciones adversas a las que se enfrentan las plantas en terreno, muchos proyectos de reforestación y revegetación de áreas degradadas por relaves mineros presentan bajas tasas de crecimiento y sobrevivencia de la vegetación, por ende, son ineficientes en su propósito. Es por ello que numerosos autores señalan la necesidad de intervenir el suelo para mejorar las condiciones de recepción de las plantas. La alternativa más recurrida para este propósito es la aplicación de enmiendas, acondicionadores o mejoradores de sustrato (Bradshaw, 1997; Kumpiene *et al.*, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008; Bolan *et al.*, 2011; Karami *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017).

5.3.2. Fitoestabilización, medidas complementarias y sinergias

Los distintos programas de fitoestabilización desarrollados en Europa y Estados Unidos han optado por hacer un uso prioritario de los recursos genéticos nativos o endémicos, identificando las plantas metalófitas locales adaptadas a las condiciones climáticas imperantes (Grandlic *et al.*, 2008).

La ingeniería genética es una herramienta con grandes posibilidades de contribuir a la efectividad y éxito en los programas que emplean las técnicas de fitorremediación, por ejemplo, al modificar la morfología de las raíces o actuando sobre genes que codifican

enzimas de interés que interactúan de diversas formas con los contaminantes, para metabolizarlos o estabilizarlos, entre otras maneras por las cuales las plantas reaccionan ante su presencia en el medio y/o ingreso a su organismo (Cherian y Oliveira, 2005; Bolan *et al.*, 2011).

Otra medida que puede generar muy buenos resultados en programas de fitoestabilización es el uso de bacterias promotoras del crecimiento de las plantas o PGPB, por sus siglas en inglés. Esta técnica consiste en la identificación y posterior inoculación de las plantas con bacterias capaces de sobrevivir en los relaves, y que a través de su actividad en la zona de la rizósfera, generan un proceso de facilitación para el establecimiento, sobrevivencia y crecimiento de las plantas, disminuyendo con ello los montos requeridos de enmiendas a aplicar (Grandlic *et al.*, 2008).

5.3.3. Ventajas de la Fitoestabilización como técnica de rehabilitación ambiental

Una de las principales dificultades o problemáticas a las que se enfrentan los proyectos de rehabilitación ambiental sobre relaves mineros radica en la gran extensión de la superficie de los relaves. La fitoestabilización es una medida que se aplica principalmente en terrenos extensos con contaminación superficial (Cunningham *et al.*, 1995; Delgadillo *et al.*, 2011), por lo que es idónea para aplicarse sobre relaves mineros.

La vegetación que se establece sobre la superficie de los relaves contribuye a evitar la erosión del suelo, interceptando el impacto directo del viento y la lluvia, disminuyendo la escorrentía y la dispersión eólica, a la vez que promueve la reposición de varias propiedades del suelo (Méndez y Maier, 2008; Bolan *et al.*, 2011). Así mismo la vegetación establecida induce la actividad biológica del suelo, bacteriana principalmente, a la vez que lo aísla de las temperaturas extremas que pueden desecarlo o agrietarlo por congelamiento (Bolan *et al.*, 2011). La vegetación no solo genera un efecto mecánico sobre el suelo a través de las raíces, sino que también permite la agregación de partículas finas que producen aglomerados de suelo (Bradshaw, 1997; Bolan *et al.*, 2011).

Si tanto la vegetación que se establece sobre los relaves, como el suelo que la alberga tienen una adecuada profundidad y continuidad, estos actúan conteniendo los contaminantes, evitando su percolación a aguas subterráneas y reduciendo el flujo del agua que los arrastra a través del perfil del suelo, evita su dispersión y la lixiviación tanto de los contaminantes como de los nutrientes necesarios para las plantas (Bradshaw, 1997; Tordoff *et al.*, 2000; Barton *et al.*, 2005; Méndez y Maier, 2008; Bolan *et al.*, 2011; Khan, 2013); desde luego, la profundidad adecuada debe ser estudiada en ensayos de campo y puede ser variable, dependiendo de la profundidad del relave.

La revegetación de los relaves mineros puede ser una de las mejores alternativas de manejo disponibles, ya que es la única técnica capaz de remediar los impactos visuales sobre el paisaje y en ciertos casos los terrenos tratados son capaces de soportar nuevos usos, tal como el recreacional o incluso usos forestales o agrícolas (Tordoff *et al.*, 2000) y en el

largo plazo es capaz de constituir comunidades vegetales autosustentables que recreen las condiciones ecológicas previas al impacto si se realiza una adecuada selección de las especies a disponer (Tordoff *et al.*, 2000; Méndez y Maier, 2008).

Dadas estas características, su funcionalidad y amplias posibilidades de aplicación, el hecho de ser una medida sustentable y ecológicamente amigable es que la fitoestabilización es una técnica con grandes oportunidades de uso, de ella destaca además su carácter económico o su costo relativamente bajo de aplicación (Cunningham *et al.*, 1995; Tordoff *et al.*, 2000; Singh y Jain, 2003; Reichenauer y Germida, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008; Ehsan *et al.*, 2009; Dickinson *et al.*, 2009; Ginocchio y León-Lobos, 2011).

5.3.4. Desventajas de la Fitoestabilización

Dadas algunas propiedades bioquímicas de la rizosfera es posible que se influencie las dinámicas de transformación, movilidad y biodisponibilidad de los metales y metaloides presentes en el suelo, lo que incluye su acidificación, liberación de ácidos orgánicos y variaciones en la actividad microbiana (Bolan *et al.*, 2011).

En el caso de las plantas metalófitas y las hiperacumuladoras su rol es incierto. Si no existen estudios que determinen sus capacidades y las tasas de traslocación de los contaminantes al tejido aéreo, o no se delimita y cierra adecuadamente el área de su emplazamiento, es posible que se generen problemas en cuanto a la transferencia de estos contaminantes en la cadena alimenticia, principalmente por invertebrados que se alimentan de las hojas, así como herbívoros mayores (Dickinson *et al.*, 2009; Bolan *et al.*, 2011). Es por ello y dada una serie de factores que influyen y modifican las tasas de alocación de metales en distintas partes de la planta (Medina, 2010), que se debe evaluar cada especie y su respuesta fisiológica al ser establecidas sobre relaves, considerando distintos tiempos fenológicos, edades de las plantas, condiciones del sustrato, concentración de metales y clima local.

El rol de las plantas es fundamental en la fitoestabilización, su uso inadecuado y la falta de conocimiento de sus capacidades o sus efectos pueden generar serios problemas (Dickinson *et al.*, 2009). De igual manera, el éxito de las plantas está supeditado a su capacidad para soportar las condiciones climáticas y edáficas locales (Padmavathiamma y Li, 2007).

A pesar de que se seleccionen plantas tolerantes al estrés hídrico, debe proveerse un riego inicial para favorecer el éxito en el establecimiento de la vegetación, que puede variar entre 3 y 6 meses (Tordoff *et al.* 2000; Williams y Currey, 2002). Sin embargo, este riego no debe exceder el tiempo indicado, de manera de evitar la dependencia de las plantas. Por otra parte, extenderlo indebidamente implica un gasto monetario adicional (Munshower, 1994).

Existen otros riesgos latentes como es el caso de la cosecha de la vegetación, la cual puede contener en sus tejidos los contaminantes. Estos pueden ser dispersados a la atmósfera por la combustión de la biomasa (Ernst, 2005).

5.3.5. Consideraciones importantes para los programas de fitoestabilización

Los procesos de fitorremediación son lentos y deben ser considerados a largo plazo, de manera que se asemeje a los procesos ecológicos naturales (Bradshaw, 1983; Cunningham *et al.* 1995), el objetivo de la fitoestabilización de relaves mineros es establecer una comunidad vegetal autosustentable sobre el relave (Bradshaw, 1997; Ginocchio, 1998; Tordoff *et al.*, 2000; Méndez y Maier, 2008), lo que implica que la vegetación y el resto de los organismos presentes en el suelo, sean capaces de sobrevivir en el tiempo y dar comienzo a un proceso dinámico de sucesión, en el cual se produciría la colonización de nuevos individuos como resultado de la reproducción de las plantas establecidas y ante la eventual llegada de propágulos externos.

Existen varias técnicas de recuperación de sustratos metalíferos, pero solo el uso adecuado de vegetación para estabilizar los desechos mineros logra que sea efectiva la rehabilitación ambiental en el largo plazo (Tordoff *et al.*, 2000). Es por ello que un aspecto de suma importancia a la hora de evaluar el éxito de todo programa de fitoestabilización es considerar la sucesión vegetal, en términos de desarrollo de la comunidad vegetal establecida, la propagación de las plantas y la eventual colonización de nuevas especies (Méndez y Maier, 2008). Desde luego también deben ser evaluados parámetros comunes como el crecimiento de las plantas y la producción de biomasa.

El éxito de los proyectos de implementación de fitoestabilización como técnica de remediación de pasivos ambientales mineros dependerá plenamente de la selección de las plantas a establecer, las cuales deben ser capaces de tolerar las condiciones climáticas y edáficas imperantes (Bolan *et al.*, 2011; León-Lobos *et al.*, 2011). Así mismo es importante la correcta elección del método de colocación de las plantas. Al respecto, Méndez y Maier (2008) señalan que el trasplante o plantación tiene mejores resultados generales que el uso de semillas o la siembra directa, ya que estas últimas pueden tener menores tasas de sobrevivencia y una cobertura más heterogénea.

Por otra parte, además de las limitantes propias del medio en el cual será establecida la vegetación en proyectos de restauración ambiental y forestación de ecosistemas degradados; algunos de los principales problemas para alcanzar el éxito en estos proyectos son: los malos resultados en la fase de establecimiento, la escasa disponibilidad, diversidad y calidad de plantas nativas en vivero, y la falta de un plan nacional de restauración o políticas que la fomenten (Bannister *et al.*, 2018).

5.4. Propuesta de uso de Tecnosoles como técnica de rehabilitación de PAMs en zonas áridas

Los tecnosoles fueron definidos en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, por sus siglas en inglés), durante la categorización realizada en el periodo 2006/2007 que introdujo a los tecnosoles como uno de los Grupos de Suelos de Referencia (GSR), siendo suelos caracterizados por la presencia de un >30% de artefactos (cualquier componente introducido por el ser humano), geomembrana construida o roca dura técnica (WRB, 2007). Así, los tecnosoles son definidos como suelos dominados o fuertemente influenciados por materiales hechos o expuestos por la actividad humana (WRB, 2008).

5.4.1 Fundamentos para la proposición de la técnica

Los suelos son un factor crítico que controla los ecosistemas que en él se establezcan. Entre ellos se mantiene una estrecha interrelación. Los procesos biológicos que se desarrollan en el suelo son de gran importancia para el crecimiento de la vegetación y el desarrollo de los ecosistemas (Bradshaw, 1997; Chambers, 2000; Huang *et al.*, 2012).

Los sustratos mineros poseen numerosas características perjudiciales para el establecimiento y desarrollo de vegetación (Clemente *et al.*, 2006; Mendez y Maier, 2008; Madejón *et al.*, 2009; de la Fuente *et al.*, 2011; Kohler *et al.*, 2014). Por ello es fundamental en proyectos de rehabilitación ambiental sobre relaves mineros, la restauración de los suelos como medio que soporta y alberga la vegetación (Bradshaw, 1983; Huang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017).

A través del tiempo, la minería en Chile ha provocado el desplazamiento de grandes superficies de bosque nativo, al igual que otros severos daños a distintos ecosistemas, tanto en pequeña escala como en grandes superficies (Folchi, 2001; Orchard *et al.*, 2009). El depósito de los relaves sepulta y destruye extensas superficies de suelos. Los suelos son un recurso no renovable, ya que su proceso de formación y regeneración, conocido como pedogénesis, resulta ser extremadamente lento, tardando varias décadas e incluso siglos en algunos casos; por otra parte, los procesos de degradación que pueden afectarlos, actúan rápidamente, deteriorando sus características, adelgazándolo, e incluso destruyéndolos completamente en cortos periodos de tiempo (FitzPatrick, 2006; Eckmeier *et al.*, 2007; Bolaños, 2014; Pérez, 2014).

El clima y la geología son los principales factores que determinan la formación de suelos, sin embargo, con el propósito de su restauración, la asistencia humana en distintos momentos de su desarrollo puede contribuir a acelerar este proceso, pasando a ser un nuevo factor modelador (Bradshaw, 1997; Scalenche y Ferraris, 2009). En los tecnosoles la pedogénesis está directamente determinada por los materiales que lo componen y su organización (WRB, 2008).

Para alcanzar la meta de rehabilitación o restauración ambiental sobre relaves mineros es preciso abordar de manera holística el problema a resolver, para lo cual debe garantizarse la mantención de la vegetación y el funcionamiento y desarrollo del ecosistema que se establezca. La incorporación de tecnosoles adecuados para cada caso permite dar una respuesta satisfactoria para tales propósitos, mejorando las condiciones para las plantas, permitiendo la reposición de propiedades químicas y físicas y el desarrollo de la biota del suelo, a la vez que reduce los riesgos de contaminación a comunidades humanas cercanas o suelos circundantes (Chambers, 2000; Scalenche y Ferraris, 2009; Huang *et al.*, 2012; Bolaños, 2014; Villaverde, 2018).

La creación y uso de tecnosoles para la rehabilitación de PAMs constituye una medida que aborda el problema de manera integral, ya que proporciona un suelo capaz de soportar vegetación y permitir su desarrollo, permite la reposición de la actividad biológica del suelo y constituye en sí mismo una cubierta física que aísla al relave del medio. Si bien, la aplicación de un acondicionador puede producir efectos similares, estos son transitorios y dependerán de los montos y tipo de enmienda utilizada, siendo necesaria la reaplicación periódica de ellas para mantener sus beneficios, lo que constituye una mantención más laboriosa y con ello un costo monetario adicional (Bolán *et al.*, 2003; Keller *et al.*, 2005).

5.4.2. Elaboración de tecnosoles

Los tecnosoles deben responder a las necesidades que originan su uso. En este sentido, deben poseer una porosidad mayor que el relave, una estructura física estable, un alto o relativamente alto contenido de materia orgánica, los nutrientes demandados por la vegetación y la capacidad de infiltrar y retener agua. Su elaboración consiste en la aplicación de una o más tipos de enmiendas, las que pueden estar mezcladas entre sí, depositadas sobre la superficie del relave o mezcladas con él.

Las enmiendas se pueden categorizar en dos tipos según el origen del material: orgánicas e inorgánicas (Santibáñez *et al.*, 2011b; Wang *et al.*, 2017). En este sentido, la mezcla ideal de componentes de un tecnosol está dada por la participación, de al menos, una enmienda de carácter orgánica, alta en nutrientes y carbono disponible y otro componente o enmienda de carácter inorgánico o mineral. Este tipo de enmiendas le dan consistencia física al tecnosol y contribuyen a estabilizar la materia orgánica añadida.

Las especies de plantas a disponer sobre el tecnosol deben ser adecuadamente seleccionadas para garantizar el éxito del programa, es decir, deben poseer las características necesarias para sobrevivir en las condiciones imperantes y tener las propiedades remediadoras o estabilizadoras de interés. Así mismo, es de suma importancia tener la precaución de que la enmienda escogida sea compatible con la especie vegetal utilizada y que no represente una fuente de posibles impactos ambientales secundarios (Ginocchio y León-Lobos, 2011; Santibáñez *et al.*, 2011).

En cuanto a la metodología de elaboración de tecnosoles, se señala que los componentes deben ser mezclados al momento de su depósito sobre el relave, posteriormente se debe revolver o voltear la mezcla cada dos semanas por un mes (dos veces), con el propósito de lograr la homogenización y aireación de sus componentes, Unidad de Planificación y Gestión Rural (UPGR, 2013).

Los tecnosoles deben ser elaborados con la consideración de que una vez establecida la vegetación fitoestabilizadora o fitorremediadora sobre ellos, deben darse las condiciones necesarias para el desarrollo de la actividad microbiana y de la biota del suelo. Una comunidad microbiana presente en el suelo es de gran importancia para la estabilización de la vegetación, así como para la de los suelos, ya que en ellos debe darse la ocurrencia del ciclo de carbono y otros nutrientes para su mantención en el tiempo (Huang *et al.*, 2012).

Estudios recientes han demostrado la importancia de los microorganismos presentes en el suelo para las tecnologías de fitorremediación, ya que juegan un rol primordial promoviendo el establecimiento y crecimiento de las plantas, disminuyendo la biodisponibilidad de los contaminantes, entre otros importantes efectos sobre el suelo y la vegetación (Cao y Liu, 2015; Wang *et al.*, 2017). La microfauna del suelo además contribuye al espacio total de los poros en el suelo, mejorando las condiciones de infiltración y retención de agua, así como la presencia de aire en él (Bradshaw, 1997).

Hattori, (1992), señala que los metales pesados presentes en el suelo perjudican la actividad microbiana y su incremento de biomasa. Es por ello, que las labores de recuperación de suelos deben generar la reposición de la biota del suelo y su actividad, siendo este factor indispensable para el ciclo de nutrientes y materia orgánica, y la mantención de varios procesos biogeoquímicos (Pérez de Mora *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2009; Melgar-Ramírez *et al.*, 2012).

5.4.3. Componentes de los tecnosoles y el Concepto de Economía Circular

La Economía Circular es un concepto que promueve la reducción o eliminación de la generación de residuos en distintos procesos y líneas productivas. Así mismo, introduce el concepto clave de la revalorización de los residuos. Muchos de los desechos generados en variadas industrias de distintos rubros, como el forestal, la agricultura, ganadería, construcción, son eliminados o desechados sin la consideración de que pueden constituir un subproducto con valor y factibilidad de ser empleados posteriormente por otras industrias y actividades.

Para la elaboración de tecnosoles, se debe considerar en todo momento el uso de materiales localmente disponibles y el empleo de desechos potencialmente útiles, generados por otras actividades. De esta manera, se puede ampliar la vida útil de diversos materiales que son considerados residuos, pasando a ser subproductos con valor económico, los que pueden ser reintegrados a una actividad productiva (Bolaños, 2014; Pérez, 2014).

Es de suma importancia que estos componentes se generen en grandes cantidades, ya que los relaves cubren extensas superficies que deben ser cubiertas por ellos. Además deben estar localmente disponibles, debido a las complicaciones y costos de trasladar grandes volúmenes de material.

Es muy importante en remediación de PAMs y uso de tecnosoles, que los materiales utilizados para su constitución sean, en parte, pasivos ambientales generados por otras industrias o actividades productivas. De esta manera se reducen los impactos que estos pasivos pueden provocar al ser eliminados de maneras convencionales (vertederos), y en su lugar, pasan a constituir un tecnosol.

UPGR, (2013) señala los buenos resultados y beneficios de la implementación de plantas municipales de reciclaje de distintos tipos de residuos, lo que ha permitido disminuir considerablemente los volúmenes de desechos que son arrojados a los vertederos. Se generan subproductos con un nuevo valor o utilidad a partir de ellos, como materiales de origen orgánico, tal como madera o restos de alimentos, u inorgánicos no peligrosos como los residuos de construcción y demolición, los que pueden ser reutilizados para diversos fines, tal como la elaboración de suelos artificiales.

Los tecnosoles generalmente se constituyen por dos tipos de materiales: los que aportan materia orgánica y nutrientes, y los inorgánicos o minerales, los cuales también pueden aportar nutrientes pero su función principal es metaestabilizar a los compuestos orgánicos, de manera que no se generen reacciones químicas negativas por su exceso (Macías *et al.*, 2007; Bolaños, 2014).

5.4.4. Componentes Orgánicos

La acumulación de materia orgánica, ya sea viva o muerta, contribuye a soportar una variedad de organismos del suelo (Bradshaw, 1997). Se ha observado que las enmiendas provenientes de materia orgánica tienden a disminuir la concentración de metales en el suelo, así como su absorción por parte de las plantas. El compost, por ejemplo, genera este efecto sobre suelos contaminados con Plomo (Pb), mientras que el carbón vegetal es más apropiado para suelos contaminados con Cobre (Cu) (Karami *et al.*, 2011).

Enmiendas con alto contenido de materia orgánica (>10% base seca), permiten reducir la movilidad y concentración de diversos metales en el suelo, tales como el Plomo (Pb), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Aluminio (Al), Arsénico (As), así como la absorción por parte de las plantas (McGrath *et al.*, 1988; Tordoff *et al.*, 2000; Walker *et al.*, 2003; Adriano *et al.*, 2004; Walker *et al.*, 2004; Alvarenga *et al.*, 2009; Karami *et al.*, 2011; Pardo *et al.*, 2011). La adición de materia orgánica es un método empleado comúnmente para mejorar las condiciones de suelos degradados, particularmente en regiones semiáridas, contribuye a facilitar el establecimiento de vegetación sobre ellos (Tejada *et al.*, 2007).

Existe una amplia variedad de residuos orgánicos generados por diversos rubros, destacan los lodos provenientes de aguas residuales, el compost, biocarbón vegetal, restos de

cosechas forestales, restos de cosechas y procesamiento en la agricultura, residuos urbanos, entre otros.

5.4.4.1. Lodos de aguas residuales o biosólidos

Las Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas (PTAS) son las responsables de generar los biosólidos o lodos de aguas residuales como producto del proceso de colección, tratamiento y separación de los componentes de estas aguas.

Su efectividad como mejorador de sustrato para beneficiar el establecimiento y crecimiento de plantas cuando es aplicado sobre relaves mineros ha sido comprobada y se debe a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes, como lo son el Nitrógeno (N) y Fósforo (P) (Bradshaw, 1997; McBride *et al.*, 1997; Lobos, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008). Sin embargo, estos mismos autores señalan la potencialidad de este recurso de agravar las condiciones químicas adversas en los relaves, lo que se debe principalmente a una dosis muy alta de aplicación de biosólidos, la falta de estabilización previa de los lodos, o bien por aplicar esta enmienda por sí sola, aconsejándose la incorporación y mezcla de otro acondicionador mineral que la estabilice.

Los biosólidos, por su alto contenido de materia orgánica incrementan los niveles de Carbono Orgánico Disuelto (COD), factor que influye en la solubilidad y biodisponibilidad de los metales en el suelo. Este COD se origina por una rápida descomposición de la materia orgánica facilitada por un aumento explosivo de la actividad microbiana tras la aplicación del biosólido, con lo cual se crean complejos entre los metales y el COD, aumentando con ello la biodisponibilidad y la absorción por las raíces de las plantas (Lamy *et al.*, 1993; McBride *et al.*, 1997; Antoniadis y Alloway, 2002). Por consiguiente, pueden generarse problemas de toxicidad de las plantas y de contaminación al medio ambiente cercano (Lobos, 2008).

Para evitar la ocurrencia de estos problemas se recomienda no utilizar biosólidos sin estabilización previa, en caso contrario, los biosólidos no deben ser aplicados sin ser mezclados con algún otro acondicionador de carácter inorgánico, dado que esta es una manera de estabilización *in situ*, así mismo deben realizarse mediciones para encontrar la dosis adecuada, ya que no debe ser demasiada la cantidad a aplicar, Lobos (2008) recomienda una dosificación no superior a 200 Mg ha⁻¹. Es necesaria la toma de estas precauciones, ya que los biosólidos pueden contener metales pesados y su exceso puede aumentar la salinidad del sustrato (Lobos, 2008; Santibáñez *et al.*, 2008).

5.4.4.2. Compost de desechos orgánicos

El compost proveniente de residuos orgánicos urbanos, así como de otras actividades productivas puede ser una buena alternativa como enmienda de los suelos, dada la gran cantidad de materia orgánica contenida en él (alrededor de 20% de base seca), y los

nutrientes que aporta, favoreciendo el crecimiento de la vegetación (Wong, 2003; Alvarenga *et al.*, 2008; Kohler *et al.*, 2014). Así mismo, contribuye a aumentar la capacidad de intercambio catiónico, mantiene una baja permeabilidad hidráulica y previene la ocurrencia de drenaje minero (Peppas *et al.*, 2000).

Pese a sus numerosos beneficios, es posible que el compost genere los mismos inconvenientes de los biosólidos, al agregarse una ‘sobrecarga’ de materia orgánica, lo que puede aumentar la biodisponibilidad de los metales pesados del suelo, es por ello que se recomienda probar previamente las cantidades a añadir sobre suelos degradados (De la Fuente *et al.*, 2011).

5.4.4.3. Restos vegetales de cultivos de zonas semiáridas

En zonas semiáridas, como el centro norte de Chile, se realizan numerosos cultivos de distintas especies vegetales, destacan por su envergadura el cultivo de olivos y vides.

Los desechos de almazara, en la producción de aceite de oliva, pueden ser utilizados con buenos resultados como enmiendas para disminuir la biodisponibilidad de contaminantes metálicos en el suelo así como favorecer el establecimiento y crecimiento de la vegetación. El efecto obtenido con estas enmiendas es preferible a la aplicación de fertilizantes minerales, ya que su permanencia en el suelo es mayor (Pardo *et al.*, 2013).

A través del uso de compost de alperujo de aceitunas se logra disminuir la movilidad de elementos metálicos en el suelo, se mejoran sus propiedades y se favorece el crecimiento vegetal y la germinación de semillas (Pardo *et al.*, 2011).

El uso de orujos de uva, al igual que otros restos como las borras y los sarmientos para la producción de compost, es una práctica relativamente reciente, pero que ha demostrado mejorar la calidad del suelo en cuanto a su estructura y constituye un aporte de materia orgánica que beneficia a la vegetación (Uliarte *et al.*, 2017; LIFE SARMIENTO, 2019; Cotacallapa *et al.*, 2020).

5.4.4.4. Estiércol animal proveniente de la ganadería

Algunos estudios ocupan estiércol animal proveniente de la ganadería como mejoradores para el suelo, Walker *et al.* (2003), utilizan estiércol fresco de vacas, en tanto Pardo *et al.* (2011), usan estiércol líquido de cerdos. En estos trabajos, el estiércol es empleado como enmienda para la rehabilitación de suelos degradados por actividades mineras y contaminados por metales pesados. Estos proyectos han tenido resultados favorables tanto en disminuir la biodisponibilidad y movilidad de los contaminantes, como para favorecer el desarrollo de la vegetación que se establece sobre ellos.

Por otra parte, el uso de estiércol líquido y sólido de cerdos podría no ser la mejor alternativa para el desarrollo de las plantas, ya que contribuye a dificultar su germinación y crecimiento (Gandarillas *et al.*, 2016). No obstante, Zornoza *et al.* (2017), señalan que el estiércol de cerdo puede generar buenos resultados al ser mezclado con lodos de mármol como enmienda mineral.

La adición de guano de cabra sobre relaves tampoco parece ser la mejor opción por sí sola, ya que puede causar un aumento de la salinidad del relave con valores de conductividad eléctrica que superan los 10 (dS/m), y con ello dificultar el desarrollo radicular y el crecimiento de la vegetación (Ramírez, 2012). Sin embargo, es posible obtener mejores resultados al mezclar el guano de cabra con ripios de lixiviación provenientes de la actividad minera. Una aplicación de 100 toneladas de guano de cabra por hectárea, mezclado con proporciones de 50% y 33% de ripios de lixiviación, son capaces de generar condiciones de sustrato que mejoran el crecimiento radicular (Ramírez, 2012).

Es por ello que se enfatiza la necesidad de estabilizar las enmiendas de carácter orgánico y mezclarlas con componentes minerales disponibles, y de esta manera evitar la ocurrencia de problemas secundarios derivados de las enmiendas orgánicas.

5.4.5. Componentes inorgánicos

Las enmiendas de carácter inorgánico o mineral tienen como principal propósito mejorar las condiciones físicas y estructurales de los suelos, a la vez que cumplen la función de estabilizar enmiendas con alto contenido de materia orgánica, de manera que estas no generen problemas secundarios de contaminación (McBride *et al.*, 1997; Macías *et al.*, 2007; Santibáñez *et al.*, 2008; UPR, 2013; Bolaños, 2014).

5.4.5.1. Residuos de la Construcción y Demolición

Los denominados RCD son un grupo de residuos provenientes del rubro de la construcción que se caracteriza por una composición diversa, la cual dependerá de varios aspectos tales como el tipo de obra y los materiales empleados en ella; sin embargo, su composición general suele incluir tierras y áridos mezclados, piedras, restos de ladrillos, hormigón, asfaltos, cristales, plásticos, yesos y maderas (Burgos, 2010; Centro de Investigación de Tecnologías de la Construcción CITEC, 2017).



Figura 7. Imagen de RCD urbanos domiciliarios.

La construcción es uno de los rubros productivos que demanda una gran cantidad de materias primas y energía a la vez que genera una de las mayores cantidades de residuos sólidos (Burgos, 2010), los cuales tienen la potencialidad de ser empleados en la elaboración de tecnosoles. Los RCD, aunque apenas aportan nutrientes, presentan buenas condiciones de porosidad, aireación y retención de agua (Nehls *et al.*, 2013).

La generación de RCD provoca numerosos problemas cuando no existen cuerpos legales o protocolos que planifiquen y fomenten su prevención, es decir, evitar que estos se generen. Debe fomentarse su reciclado o revalorización, de manera que los materiales con posibilidades de uso sean empleados antes de ser desechados, ya que su eliminación común genera entre otros impactos un desplazamiento y sepultación de suelos con otros usos potenciales, contaminación de suelos y acuíferos, deterioro paisajístico, entre otros (Burgos, 2010).

Es por ello que el empleo de este pasivo ambiental generado por la industria de la construcción puede ser revalorizado y utilizado en la elaboración de tecnosoles, pasando a ser un activo que además contribuye a la rehabilitación de pasivos mineros. Los RCD como componente de los tecnosoles pueden ser una alternativa eficiente. El Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de España (2012) los destaca por tener una alta tasa de producción y por su facilidad técnica para ser reciclados y el bajo costo de dicho proceso.

El uso de RCD como componente mayoritario (70% - 85%) en una mezcla de tecnosol con enmiendas orgánicas, genera muy buenos resultados en cuanto a los beneficios para la vegetación que se establece sobre ellos y las propiedades del suelo que la sustentan (Herrán *et al.*, 2016). Pese a ello, la aplicación de esta enmienda por sí sola, al igual que los biosólidos por sí solos, pueden generar efectos adversos, ya que los RCD poseen elevados niveles de sulfatos, provenientes de yesos principalmente, es por ello que se destaca la importancia de aplicarlos en mezclas (UPGR, 2013).

5.4.5.2. Sedimentos de embalses y canales de riego

La precipitación y depósito de sedimentos en embalses de aguas, ya sea embalses de riego, represas para generación eléctrica, pasa a constituir un gran problema en el mediano y largo plazo, principalmente porque su acumulación ocupa un espacio físico disminuyendo así el volumen disponible para el almacenamiento de agua, a la vez se generan otros problemas como la obstrucción de bocatomas y otros conductos (Lecaros, 2011; Fuentes, 2018). Este mismo problema se produce en los canales de riego, en los cuales por efecto del levantamiento del lecho dado el grosor de la capa de sedimentos, se producen desbordes ante las crecidas por lluvias en temporada invernal.

Los sedimentos finos y gruesos que se acumulan en estos cuerpos de agua pasan a ser generadores de dichos problemas, por lo cual su retiro contribuye a evitarlos. Pese a ello, este material pasa a ser un residuo al momento de su retiro, a menos que se revalorice e integre a un ciclo económico pasando a ser un subproducto con potenciales de aplicación.

Una de estas aplicaciones es su uso como enmienda para el suelo, de esta manera se aprovechan estos sedimentos, constituidos por diferentes partes de materiales finos y gruesos. Su aplicación al suelo contribuye a mejorar las condiciones estructurales, su porosidad, capacidad de retención de humedad, entre otros. Existen escasos ejemplos de este tipo de trabajo, ya que es una práctica inusual, por lo general los embalses no son tratados y los mecanismos de extracción de sedimentos son costosos cuando el cuerpo de agua está aún presente sobre ellos. Sin embargo, Bobadilla (1980) logra buenos resultados al utilizar sedimentos de causas de agua como enmienda para suelos salinos-sódicos.

El uso de sedimentos de embalses y canales de riego permite revalorizar un residuo indeseado y potencial agente de problemas, que además constituye un pasivo ambiental generado por la agricultura, logrando su integración a un nuevo ciclo en el cual pasa a ser un componente de tecnosoles, permitiendo así la recuperación de pasivos generados por otra industria, la minería.

5.4.5.3. Otras enmiendas minerales

Pérez (2014) logra buenos resultados tanto en la mejora de las características del suelo como en los beneficios para la vegetación, al añadir Carbonato Cálcico (CaCO_3) como componente de tecnosoles, mismos resultados reportados por Alcántara (2015) al utilizar enmiendas alcalinas mezcladas con humus como componente orgánico.

Restos triturados de las conchas de moluscos como los mejillones son empleados en la elaboración de tecnosoles con gran éxito ya que contribuyen a fijar los metales pesados presentes en el suelo gracias al aporte de carbonatos, además de aumentar el pH del mismo (Asensio *et al.*, 2008).

5.4.6. Leyes y normas relacionadas en Chile

Los RCD en Chile son clasificados como residuos de construcción (RESCON). La legislación que regula su generación, manejo, almacenamiento y disposiciones finales se encuentra fragmentada en varias leyes que regulan las actividades del rubro de la construcción y leyes y normas del trabajo. Vagamente se hace referencia a la gestión de estos residuos y mucho menos a su prevención, reutilización o reciclaje (CITEC, 2017).

Actualmente en Chile no existen incentivos ni ley que se enfoque en un manejo integral de los residuos provenientes del sector de la construcción, por lo que su gestión es escasa y el desarrollo de la industria que los clasifica y reutiliza/recicla es incipiente. Para una correcta gestión de estos residuos se debe considerar en las primeras fases de toda obra edificatoria la realización de estimaciones respecto del tipo y cantidades de residuos que serán generados, para así prever su retiro y posterior tratamiento (Burgos, 2010; CITEC, 2017).

Por otra parte, la normativa que regula a los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales se encuentra en el Decreto 4 promulgado y publicado el 2009 por el MINSEGPRES. En él se establecen las características sanitarias que deben cumplir dichos residuos, los cuales deben pasar por procesos previos que disminuyan su peligrosidad, riesgos de contaminación e interacción con vectores (animales). En el artículo tercero de este cuerpo legal, se establece que su disposición sobre relaves no se considerará como aplicación al suelo, por lo que en este caso se excluye de varias exigencias respecto de los riesgos para el medio ambiente, cursos de agua y comunidades cercanas (BCNC, 2009).

Es así como las principales consideraciones para su empleo en el ámbito de la elaboración de tecnosuelos son referentes a la estabilidad de los lodos (que debe ser garantizada por las plantas que los producen) y su transporte, en el cual deben tomarse las medidas necesarias para evitar fugas o derrames involuntarios.

El Decreto 4 del 2009, promueve la reutilización de los lodos con diversos fines, destacando sus propiedades para mejorar las condiciones físicas y químicas de suelos delgados o degradados, siempre dentro del marco de las prácticas exigidas.

5.4.7. Consideraciones importantes para el uso y elaboración de tecnosoles

Los tecnosoles son una técnica que requiere del conocimiento previo de las condiciones del sitio en que será establecido, otros factores geomorfológicos y climáticos y las características de los materiales que lo constituirán, así como su desarrollo con el paso del tiempo (Tordoff *et al.*, 2000; Vittori *et al.*, 2014).

Los programas de revegetación de relaves en regiones semiáridas no están limitados solo por la fitotoxicidad del sustrato y la falta de nutrientes, sino también por el escaso almacenamiento y suministro de agua en el suelo (Kohler *et al.*, 2014). Es por ello que las especies seleccionadas para ser establecidas deben ser nativas o endémicas, estar adaptadas a las condiciones climáticas locales y a la presencia de metales pesados en el sustrato (Orchard *et al.*, 2009; Kohler *et al.*, 2014).

Debe existir una sinergia entre los materiales seleccionados para componer los tecnosoles y la vegetación que se dispondrá sobre ellos, ya que no todas las plantas reaccionan de la misma manera a las mismas características edáficas (Santibáñez *et al.*, 2011; León-Lobos *et al.*, 2011; Centro de Estudios Ambientales CEA, 2018). En este sentido, la materia orgánica y el aporte de nutrientes es fundamental. Sin embargo, existen casos en los que las propiedades físicas como la granulometría son de gran relevancia y determinan un mayor éxito en el establecimiento y crecimiento de la vegetación (CEA, 2018).

El empleo de tecnosoles como medida de rehabilitación ambiental es una técnica innovadora y en desarrollo, por lo cual es necesario el monitoreo posterior a su implementación para evaluar el desarrollo del suelo, su comportamiento y dinámica, así como la evaluación de su efectividad y las posibles mejoras que se puedan incluir o adoptar en nuevos proyectos que los empleen (Bolaños, 2014).

Los tecnosoles pueden presentar riesgos para la salud de las personas al ser ingeridos, si bien es algo inusual, puede ocurrir. El nivel de riesgo dependerá de los componentes del tecnosol, por lo que deben ser escogidos cuidadosamente y evitar aquellos corrosivos, tóxicos o que presenten otra condición de peligro. Así mismo, la presencia de metales tóxicos también es un factor de riesgo, en cuyo caso su peligrosidad dependerá en gran medida de la biodisponibilidad de estos componentes, así como de la cantidad de material ingerido (González, 2014).

5.4.8. Proyectos de desarrollo, uso y establecimiento de tecnosoles

Un proyecto que integre el uso de vegetación sobre relaves mineros (tecnologías fitorremediadoras) y el desarrollo de tecnosoles a partir de alguna enmienda o mezcla de ellas como capa superficial que permita el establecimiento de dicha vegetación, debe permitir en el largo plazo el desarrollo y mantención de la comunidad vegetal y la mantención del suelo y sus procesos ecológicos.

Es por ello que en la planificación se deben considerar todos los aspectos que determinen su funcionalidad, en este sentido, todos estos factores deben ser integrados para lograr la mejor articulación entre ellos, siendo su propósito la reconstrucción total del ecosistema (Huang *et al.*, 2012; Kohler *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017). Es así como el foco de estos proyectos debe dirigirse a los tres aspectos que deben ser restituidos para el éxito, desarrollo y mantención en el tiempo de los ecosistemas: el suelo y sus características, la vegetación a establecer sobre ellos y la actividad biológica del suelo (Wang *et al.*, 2017).

La incorporación de enmiendas que aporten materia orgánica tiene considerables beneficios en comparación al uso de fertilizantes minerales comunes, esto se debe a que además de proporcionar elementos de importancia para las plantas (N, P, K), estos aportan carbono, lo que favorece la actividad microbiológica, mejorando las condiciones para la biota del suelo, a la vez que gracias a la capacidad de permanencia en el suelo en lugar de ser momentánea, favorece en el largo plazo las condiciones edáficas (Alburquerque *et al.*, 2010; Pardo *et al.*, 2013).

Walker *et al.* (2003) logran muy buenos resultados tanto en reducir la movilidad y biodisponibilidad de los metales del suelo como mejorando las condiciones edáficas para la vegetación a través del uso de enmiendas orgánicas como lo son el estiércol bovino y el compost humificado de hojas de oliva y la fracción sólida de las aguas residuales de almazara. Trabajo implementado en suelos contaminados con cobre, zinc y plomo en la Provincia de Murcia, España.

Asensio *et al.* (2008), compararon tres escenarios: uno control sin tratamiento y otros dos con aplicación de distintas mezclas de tecnosoles, se observó que al cabo de un año la vegetación estaba completamente ausente en el primer sitio. En cambio en los otros dos se estableció con éxito, más aún, se logró desarrollar una capa superficial de suelo constituida por el tecnosol y la materia orgánica aportada por la vegetación. Estos tecnosoles fueron establecidos sobre escombreras de minas en la Provincia de Galicia, España, cuya composición contiene altos niveles de sulfuros y cobre.

Scalence y Ferraris (2009) investigaron los resultados de la implementación de dos suelos artificiales tras 4 y 40 años tras su establecimiento, comparando su situación inicial con el desarrollo actual. Para el caso del suelo más reciente la medición se realizó cuatro años después de ser establecido, tiempo en el cual se había conformado un horizonte A y C. Para el caso del suelo artificial más antiguo, la medición se realizó 40 años después de ser establecido, tras lo cual se evidencia el desarrollo de los horizontes O/A/AB/Bw/BC/C.

Pérez (2014) logró estabilizar el pH e inmovilizar elementos tóxicos del suelo, a la vez que generar una cubierta de tecnosol estable en el tiempo capaz de recuperar suelos degradados en la Bahía de Portmán, Murcia, España.

Bolaños (2014) analizó la efectividad de distintos tecnosoles empleados en la rehabilitación ambiental de suelos y aguas, concluyendo que son útiles cuando estos son preparados de manera adecuada para responder a las características específicas del medio contaminado en el que serán dispuestos. Así mismo señala su efectividad para reducir la acidificación de las

aguas y suelos, su capacidad reductora y sus buenas características ambientales y productivas como suelos que albergan vegetación.

Herrán *et al.* (2016) reportaron buenos resultados al emplear RCD, biocompost y poda triturada. No se observaron niveles de toxicidad en los lixiviados que se originaron aunque sí niveles altos en sulfatos y Fe. La vegetación que se estableció de forma posterior fue capaz de crecer y desarrollarse en los tecnosoles.

Un proyecto de tecnosoles implementados en Gardelegi concluyó que estos resultaron ser apropiados para el desarrollo vegetal, haciendo posible con ello la restauración ecológica y paisajística de suelos degradados (CEA, 2018). Sobre este mismo proyecto se destaca la importancia del tiempo como factor decisivo en la dinámica y desarrollo de los tecnosoles, ya que en una primera instancia las mediciones indicaron una alta concentración de metales y sólidos en suspensión de los lixiviados recogidos. Sin embargo, transcurridos tres años el pH se neutralizó, bajó la cantidad de sólidos en suspensión y se inmovilizaron metales. Esto pudo deberse, según explican los autores, a la naturaleza joven del tecnosol y una cierta inestabilidad de los materiales empleados en él, lo que sería común en varios casos. Con el paso del tiempo, los tecnosoles tienden a estabilizarse y homogeneizarse.

5.5. Propuesta de tecnosoles para la Región de Coquimbo, Chile

5.5.1. Minería en la Región de Coquimbo, Chile

Dentro del rubro de la minería uno de los desechos más voluminosos generados son los relaves. La Región de Coquimbo concentra el 51,38% de los depósitos de relave a nivel país con 389 de ellos, de un total de 757 catastrados a nivel nacional (SERNAGEOMIN, 2020).

En la Provincia de Limarí, el 89% de los relaves carecen de forestación sobre ellos y en los casos donde existe presencia de vegetación el 93% se debe a un origen natural, es decir, no hubo intervención humana en el proceso, por el contrario, su origen es la colonización natural (Casale *et al.*, 2011).

Uno de los mayores problemas que generan los relaves una vez terminada su vida útil y son abandonados, se relaciona con la contaminación del medio ambiente circundante. Al quedar expuesto a la intemperie, la superficie del relave se ve sometida a un constante proceso de erosión eólica y por escorrentía, lo que puede dispersar las partículas y causar numerosos problemas tales como la contaminación de aguas, suelos, ecosistemas terrestres y marinos y la salud humana (Tordoff *et al.*, 2000; Santibáñez y Varnero; 2005; Soto, 2016). Para la Provincia de Límari, en el 96% de los casos los relaves sufren dispersión de sus partículas a través del viento (Casale *et al.*, 2011).

Es por esto que deben tomarse prontamente medidas respecto del manejo de PAMs y con ellas evitar la generación de múltiples problemas ambientales y sociales.

El empleo de vegetación sobre los relaves puede ser una técnica efectiva pero con varias limitantes. Particularmente en zonas áridas y semiáridas la situación se complica bastante, ya que no existe la estructura física, química ni biológica del suelo capaz de albergar vegetación y los factores de los cuales ella depende, tal como la retención de agua, la biota del suelo, el ciclado de carbono y nutrientes.

Aun cuando cada relave tenga propiedades físicas y químicas propias, la mayoría de estos residuos se caracterizan por ser infértiles para las plantas y presentar una serie de restricciones para su presencia en ellos (Santibáñez *et al.*, 2008).

El uso de tecnosoles para la rehabilitación ambiental puede ofrecer un conjunto de soluciones que garanticen el éxito de los programas de recuperación de suelos degradados como es el caso de los relaves. A través de su implementación se puede proveer una cubierta física que aisle el relave del medio, evitando así la generación de reacciones químicas adversas o la ocurrencia de drenaje minero. A la vez, el uso de tecnosoles permite un apto establecimiento y desarrollo de las comunidades vegetales, las cuales constituyen otro mecanismo por el cual los relaves son estabilizados.

Estas tecnologías en su conjunto permiten lograr con éxito el propósito de disminuir o eliminar las vías de exposición de los contaminantes a la vez que se generan numerosos beneficios ambientales a través de la creación de una cubierta vegetal autosustentable en el tiempo.

5.5.2. Caso de estudio, Proyecto Delta

El Proyecto Delta, cuyo titular es la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), es un proyecto de explotación minera subterránea del yacimiento Panulcillo. Sus actividades contemplaban el movimiento de material a razón de 2.000 toneladas por día. Se ubica a 15 kilómetros al noroeste de la ciudad de Ovalle, Provincia de Limarí, Región de Coquimbo. Este lugar se encuentra a 800 m.s.n.m. aproximadamente y está comprendido entre las coordenadas UTM 6.630.000N - 286.000E y 6.620.000N - 288.000E en la ladera occidental del Cerro La Lucha, en un sector aledaño a la quebrada Rincón del Sauce (ENAMI, 2007a).

El relave asociado a este proyecto se emplaza en una superficie de 102 hectáreas y tiene la capacidad de albergar 10 millones de toneladas. El terreno escogido para su emplazamiento fue seleccionado por poseer una pendiente regular entre 2 y 7%, de manera que se eviten derrames por este factor. El suelo posee buena estabilidad geotécnica y es de baja permeabilidad. De igual manera, no existen quebradas ni causas naturales o caminos aledaños. Además, se incluye un muro de confinamiento, un sistema de drenaje e intercepción de aguas lluvias (ENAMI, 2007a).



Figura 8. Imagen del relave del Proyecto Delta.

5.5.2.1 Caracterización ambiental del área de estudio

El clima local se conoce como semidesértico o semiárido, caracterizado por la ausencia de precipitaciones la mayor parte del año en los meses del período estival. Las precipitaciones se concentran en los meses de invierno y van entre los 100 y 200 mm. La temperatura media anual es de 18°C en verano y 9°C en invierno, con una alta oscilación entre día y noche; la mayor parte del tiempo se evidencia una gran sequedad atmosférica y escasez de nubosidad (ENAMI, 2007b).

Los suelos que serán afectados por las instalaciones, incluyendo el tranque de relave son descritos en general como delgados, con gran presencia de gravas, compactos y según su Capacidad de Uso, son catalogados en suelos de clase VI a VIII, por lo cual no presentan condiciones adecuadas para actividades agrícolas y son altamente susceptibles a la erosión (ENAMI, 2007b).

El ecosistema predominante se reconoce como estepario interior, compuesto principalmente por vegetación xerófila adaptada a las condiciones de aridez e irregularidad de las precipitaciones. Se caracteriza por la presencia mayoritaria de un matorral bajo cuya cobertura no supera el 75%. La especie más abundante es *Gutierrezia resinosa*, otras especies que abundan son *Cordia decandra*, *Gymnophyton flexuosum*, *Flourensia thurifera*, *Porlieria chilensis* y *Schinus molle* (ENAMI, 2007b).

En el lugar de emplazamiento del proyecto, seis especies son citadas como Vulnerables a nivel regional *Eriogyne aurata*, *Eriogyne heinrichiana*, *Caesalpinia angulata*, *Carica*

chilensis, *Bridgesia incisifolia* y *Porlieria chilensis*. Fuera de categoría se encuentran las cactáceas *Opuntia berteri*, *Opuntia ovata*, *Eulychnia acida* y *Echinopsis chilensis* (ENAMI, 2007b).

En cuanto a la fauna se reconoce una amplia diversidad de aves, la ausencia de anfibios y la presencia de *Spalacopus cyanus* o cururo, mamífero en peligro de extinción. También se encuentra un grupo de reptiles compuesto por *Liolaemus platei*, *Liolaemus pseudolemniscatus*, *Liolaemus fuscus*, *Liolaemus nitidus*, y *Tachymenis chilensis*, todos endémicos y en estado de conservación (ENAMI, 2007b).

Los impactos que generó la realización de este proyecto sobre los componentes suelo, flora y fauna fueron descritos como no significativos, dadas las condiciones previas de degradación del ecosistema debido al uso histórico que ha tenido, pastoreo y tala de bosque nativo principalmente y por la presencia de amplias superficies representativas de estos ambientes al interior de la región. Sin embargo se reconoció que estos tres componentes serán afectados de forma casi irreversible por desplazamiento y/o destrucción principalmente en la etapa de construcción (ENAMI, 2007c).

Dentro de las medidas de compensación previstas por el Plan de Manejo del proyecto, respecto del componente ‘paisaje’, se señaló la realización de una revegetación de las áreas modificadas, en las cuales se restablecerá una cubierta vegetal similar a la preexistente, cuyo énfasis estará orientado a las especies presentes en el área, así como aquellas con problemas de conservación (ENAMI, 2007d).

En cuanto al componente flora y vegetación, se señaló la realización de labores de rescate de cactáceas que se encuentren en el área a intervenir por la obra, identificándose dos especies del género *Eriosyce* (*E. aurata* y *E. heinrichiana*) las cuales se encuentran en estado de conservación. Posteriormente se realizó su relocalización en lugares aledaños y de características similares al lugar del que fueron extraídas para que continúen con su desarrollo natural (ENAMI, 2007d).

En cuanto al resto de flora en categoría de conservación, se planea la compra de estas especies en viveros para su posterior plantación, la cantidad de ejemplares a comprar y su ubicación posterior serán definidas en terreno junto a la autoridad competente (ENAMI, 2007d).

5.5.3. Enmiendas y componentes disponibles

El pH usual de los relaves generados a partir de la minería de cobre y oro en Chile es cercano al neutro o ligeramente alcalino, dadas las grandes cantidades de Ca presentes en ellos (Casale *et al.*, 2011). En general, la solubilidad de los metales pesados disminuye a pH neutro debido a la precipitación de los mismos producida como hidróxido o carbonato (Dijkstra *et al.*, 2002; Pérez, 2014). Es por ello que para el caso de este relave los componentes empleados deben ser mezclados en las proporciones que menos modifiquen su pH original.

En Chile se estima que la tasa per-cápita de producción de RCD alcanzaría los 0,8 kg*habitante⁻¹*día⁻¹ (Muñoz, *et al.*, 2011), por lo que este residuo se produce en cantidades suficientes para ser empleados en la rehabilitación de relaves mineros, considerando la extensa superficie que tienen.

La ausencia de medidas de manejo de RCD y las grandes cantidades que se generan de estos residuos provocan serios problemas respecto de su disposición final ya que en Chile existen numerosos vertederos ilegales de residuos sólidos (VIRS) (Contreras, 2009; Cantor y Mateus, 2017) y en muchos casos se desconoce el lugar de eliminación de los RCD (García, 2016).

Una de las principales problemáticas que tienen las empresas constructoras, en cuanto al adecuado manejo de sus residuos, son las escasas opciones de mercado que demandan estos productos, lo que comparado a los costos de su gestión y diferenciación lo hacen poco interesante como práctica a adoptar. Es por ello que el estado juega un rol vital en el cual debe fomentar la creación de plantas de reciclaje de estos productos, así como incentivar el manejo de ellos por parte de las empresas y crear leyes que consideren los impactos ambientales y sociales que genera su mala gestión, para así aumentar los estándares exigidos a quienes produzcan los residuos (Burgos, 2010).

El uso de RCD en la elaboración de tecnosoles permite dar una solución ambiental doble al emplear los pasivos ambientales generados por el rubro de la construcción mientras que propician la recuperación ecológica de los relaves mineros.

Otro posible componente inorgánico del tecnosol corresponde a los sedimentos de embalses de riego. Su acumulación genera problemas en la mantención de los embalses. Al retirar estos residuos de su lugar se puede hacer uso de ellos sin impactos negativos al medio. Existen escasos ejemplos de este tipo de trabajos a nivel mundial, ya que extraer sedimentos que están en el lecho de un cuerpo de agua es técnicamente difícil y económicamente costoso (Fuentes, 2018).

Hoy en día es totalmente posible realizar la extracción de estos sedimentos de manera sencilla y económica, ya que producto de la fuerte sequía que afecta a nuestro país, principalmente en la zona central, el agua de los embalses ha retrocedido ampliamente en comparación a su capacidad y volumen histórico (Dirección General de Aguas (DGA), 2020). Esto implica el dejar al descubierto grandes superficies de sedimentos que se secan a la intemperie, los cuales son de fácil extracción por lo que se facilita y economiza enormemente la operación de su retiro.

El Embalse Recoleta se ubica a 27 km. aproximadamente del relave del proyecto Delta. Es propiedad de sus usuarios y administrada por la Asociación de Canalistas del Embalse Recoleta (ACER). Se ha observado en los sucesivos periodos en que ha sido secado (2011-2016) que el piso del embalse muestra un desarrollo muy abundante de vegetación (Soto, 2016), por lo que se puede concluir que sus características son aptas para las plantas.



Figura 9. Sedimentos del embalse Recoleta.

Los biosólidos, si bien tienen la potencia de generar algunas complicaciones en caso de no ser usados apropiadamente, pueden ser una enmienda muy benéfica que favorezca el desarrollo de la vegetación. Su aplicación debe considerar una dosificación justa, sin exceder ciertos montos. Lobos (2008) señala que esta dosis podría ser de $200 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Así mismo, los lodos pueden ser estabilizados al mezclarse con otra enmienda de carácter inorgánica.

En la Región de Coquimbo la empresa responsable del tratamiento de las aguas servidas es Aguas del Valle, la que deposita la totalidad de los casi 40.000 m^3 de lodos en el vertedero El Panul, ubicado a 26 kilómetros al norte de Ovalle (Vargas, 2015). Este gran volumen de residuos genera numerosos problemas en su sitio de disposición final y no es aprovechado de manera alguna pese a sus propiedades como mejorador de sustrato.

Es por ello que su uso alternativo como componente de este tecnosol puede ser muy prometedor, ya que se evita el depósito sobre rellenos sanitarios a la vez que se aprovecha como un subproducto, beneficiando a la vegetación y contribuyendo a la recuperación de relaves. Este material es producido en grandes cantidades, por lo que puede ser ocupado para cubrir las grandes superficies de los relaves.

Otro posible componente que aportaría materia orgánica está constituido por los restos vegetales del cultivo de vides, que se realiza ampliamente en las regiones mediterráneas y semiáridas de Chile. El uso de orujos de uva, al igual que otros restos como las borras y los sarmientos para la producción de compost es una práctica relativamente reciente pero que ha tenido gran éxito en los proyectos que ha sido implementada, disminuyendo con ello la contaminación que se produce por su quema y aprovechando a través de la revalorización de estos desechos al constituir un subproducto útil. Mejora en la calidad del suelo, aporte de

materia orgánica y beneficios para la vegetación presente o por establecer son algunos de los beneficios que se logran con su utilización (Uliarte *et al.*, 2017; LIFE SARMIENTO, 2019; Cotacallapa *et al.*, 2020).

En Chile existe una tenue promoción por reutilizar los desechos del cultivo de vides, principalmente para utilizarlos como abono en estos mismos cultivos al reconocer que son una buena fuente de materia orgánica, así como otros beneficios que provoca para el suelo (Díaz *et al.*, 2009). Uno de los puntos de mayor relevancia es aprovechar y revalorizar los residuos que se generan de estos cultivos y evitar su quema o descomposición a la intemperie, lo que ocasiona contaminación o desaprovechamiento de un potencial subproducto. En Coquimbo existen más de 12.200 hectáreas de viñedos y parronales, equivalentes al 9,4% de la superficie de viñas en el país, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2018).

En los últimos años el cultivo de olivos ha crecido enormemente, aumentando en 20 años en 700% la superficie destinada a ellos, concentrándose entre las regiones de Coquimbo y la del Libertador General Bernardo O'Higgins (Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA), 2017). La superficie regional de cultivo en Coquimbo es de 1.232 hectáreas, con amplia presencia en la Provincia de Limarí (Consultores en Gestión de Agronegocios (ASAGRIN), 2007). El rubro de los olivos es uno de los mayores en cultivos de frutales del país y genera grandes cantidades de desechos orgánicos que han sido probados por otros autores y son recomendables por los beneficios que aportan como enmienda orgánica para los suelos, por lo cual es una alternativa viable de uso en tecnosoles que ocupan un residuo generado por la agricultura.

Existen otras fuentes alternativas potenciales de materia orgánica que pueden ser aplicadas a la elaboración de tecnosoles. Estas se obtienen como residuos a través de las distintas actividades agrícolas y ganaderas de la Región de Coquimbo. Por ejemplo, el cultivo de especies vegetales forrajeras representa el 16,1% de superficie a nivel país, 18,5% de superficie dedicada al cultivo de flores, 11,9% de hortalizas, 10% de frutales y el 93,4% de la superficie de viñas pisqueras del país (ODEPA, 2018). Todos estos cultivos generan grandes cantidades de residuos de origen vegetal que usualmente son desechados, pero tienen la potencialidad de uso en la elaboración del tecnosol en estudio.

En cuanto a la ganadería, en esta región se concentra el 54,8% de cabezas de ganado caprino a nivel nacional, el 56,9% de asnales y el 52% de mulares; además de varias otras especies de ganado en menor medida (ODEPA, 2018), de las cuales se puede obtener estiércol con alto contenido de materia orgánica que puede ser empleado como componente de tecnosoles.

Dado el tipo de minerales que se explotan en Chile, el cobre está presente en la mayoría de los relaves en concentraciones tóxicas, por ello es de gran importancia añadir enmiendas que aporten materia orgánica ya que se ha visto una fuerte relación entre los niveles de materia orgánica presente en el suelo y la concentración de Cu en la solución suelo (McGrath *et al.*, 1988), disminuyendo con ello su concentración y su tendencia a ser absorbido por especies vegetales (Karami *et al.*, 2011), lo que ha sido comprobado

numerosas veces en distintos estudios realizados en Europa y EE.UU. (Adriano *et al.*, 2004).

5.5.4. Selección de especies

Un estudio realizado por Orchard *et al.* (2009) muestra la presencia de 68 especies colonizadoras espontaneas de relaves, además identifica 420 especies con potencial de uso como fitoestabilizadoras de las cuales el 28% es flora nativa regional. Las especies identificadas además tienen varios otros usos conocidos como lo son la ornamentación, provisión de forraje, medicinal, melífero, artesanía y propiedades fotoquímicas. El 69% de las especies identificadas son nativas de Chile, es por ello que constituyen un recurso fitogenético muy valioso que puede ser utilizado en la rehabilitación de desechos masivos de relaves.

Esto comprueba que Chile posee un amplio y valioso conjunto de especies con potencialidades fitorremediadoras que pueden ofrecer soluciones en el ámbito de la rehabilitación ambiental de relaves mineros, sin embargo es necesario que se amplíe su conocimiento y se desarrollen investigaciones a fin de comprender plenamente este recurso y las mejores maneras de aplicarlo (Mench *et al.*, 2010).

Con relación a la selección de especies, la elección de especies comerciales disponibles puede ser la alternativa más sencilla y económica, pero esta opción es la que presenta las mayores dificultades de establecimiento y éxito a corto plazo, siendo la mejor opción el uso de especies nativas (Tordoff *et al.*, 2000).

Las especies prioritarias para uso en la reforestación del embalse son las ya identificadas por ENAMI como las desplazadas por el emplazamiento del proyecto. Su provisión debe ser propia, es decir, las especies deben reproducirse en condiciones de vivero, con énfasis de esfuerzo en las catalogadas bajo categoría de conservación. Sin embargo esto puede no ser del todo posible debido a numerosas restricciones respecto del conocimiento sobre estas plantas y las maneras de propagarlas con éxito.

Así mismo su disponibilidad es muy escasa, no existen suficientes investigaciones ni viveros que produzcan estas especies y menos en las cantidades requeridas, en este sentido Bannister *et al.* (2018) señalan que esta es precisamente una de las mayores limitantes en restauración de suelos degradados, recalcando la importancia del incentivo de su investigación y cultivo y la adaptación de protocolos de viverización que permitan proveer plantas de calidad en cantidades suficientes.

Es muy importante que se seleccionen especies que estén adaptadas a la contaminación por metales, idealmente que trasloquen estos elementos en el tejido radicular, es decir, que sean metalófitas excluyentes, de manera que se evite la entrada de estos componentes a la cadena alimenticia (Ginocchio y León-Lobos, 2007), en segundo lugar, las especies selectas deben estar adaptadas a las condiciones climáticas locales y ser inocuas para el medio ambiente, es decir, nativas, no introducidas o exóticas.

La especie *Ipomea alpina* se ha identificado por ser una metalófito con gran capacidad para concentrar cobre en sus hojas (Ginocchio y León-Lobos, 2007), por lo cual es una planta con potencial uso en programas de fitoextracción, más no tanto como fitoestabilizadora, a menos que se tomen las precauciones pertinentes y se aisle el sitio del relave donde serán dispuesta, evitando así el contacto con personas y ganado.

Oenothera affinis podría considerarse como una buena candidata para iniciativas de remediación en Chile, ya que es una hierba nativa perenne, resistente a la sequía, fácil de propagar y que produce una gran cantidad de biomasa (González *et al.*, 2008).

Un estudio sobre plantas nativas con potenciales para ser aplicadas en fitoestabilización indica que *Acacia caven* (espino), *Gymnophyton robustum* (monte de burro), *Polypogon australis* y *Baccharis linearis* (romerillo), son especies acumuladoras de contaminantes principalmente en sus tejidos radiculares, todas tolerantes al cobre (Henríquez y Hernández, 2017).

Milla y Guy (2018), probaron la respuesta de numerosos individuos de distintas especies nativas de Chile y su potencial para la fitorremediación en un relave de mina de cobre, si bien todos los individuos mostraron algún grado de estrés, lograron verificar que las tasas de sobrevivencia eran mayores para *Prosopis chilensis* (algarrobo), *Baccharis linearis* (romerillo), *Schinus polygamus* (huingán) y *Acacia caven* (espino). En tanto las tasas de translocación de metales a tejido aéreo fueron menores en el caso de algarrobo y *Quillaja saponaria* (quillay).

Todas estas especies tienen en común el ser nativas, soportar las condiciones climáticas semiáridas y las condiciones adversas de toxicidad en el suelo, si bien estas especies no coinciden con las identificadas en terreno, la repoblación con vegetación debe realizarse con las mejores opciones disponibles y mientras no exista oportunidad de escoger libremente las especies deseadas, es posible realizar con éxito la rehabilitación ambiental del relave con estas especies nativas de mayor disponibilidad y que ya han sido probadas con éxito.

5.5.5. Propuesta de elaboración del tecnosol

Una vez seleccionados los componentes del tecnosol, en base a su disponibilidad, conveniencia de uso y costo de transporte se debe proceder a mezclarlos. Esta mezcla debe estar compuesta mayoritariamente por artefactos minerales y minoritariamente por los de carácter orgánico. Esta relación dependerá del tipo de enmienda orgánica a utilizar, es así como por ejemplo los biosólidos al poseer una de las mayores cantidades de carbono orgánico total deben ser aplicados entre el 10 y 20% de la mezcla. Para el caso de otros componentes orgánicos es posible que este porcentaje sea mayor, dependiendo de su proporción en contenido de materia orgánica.

Como se desconoce el verdadero funcionamiento de los componentes y sus mezclas, lo ideal es que en cada proyecto se realicen ensayos para determinar la combinación más

adecuada. Así mismo en caso de haber más de un componente a disposición, estos deben ser mezclados en distintas combinaciones y porcentajes para determinar el tipo de componente ideal y los porcentajes de participación respectivos.

La profundidad de la capa de tecnosol a implementar es también objeto de investigación, si bien existen algunas recomendaciones que señalan de 20 a 25 centímetros (Lobos, 2008), las mismas también aseguran que puede ser necesaria una mayor profundidad. Es por ello que este aspecto también es materia de estudio en futuros proyectos, particularmente sobre zonas áridas, ya que se requiere de la acumulación y retención de agua en dicho volumen de suelo, el cual de ser superficial se desecará con mayor facilidad.

Como las superficies de los relaves son muy extensas, se requiere de enormes cantidades de material que constituya los tecnosoles, en muchos casos no será posible cubrir la totalidad del relave dada su extensión, por ello se debe recurrir a focalizar los tecnosoles en los puntos precisos donde se establecerá posteriormente la vegetación. Es importante que estas medidas sean exitosas en el largo plazo, ya que eventualmente el desarrollo de la vegetación y su propagación van a contribuir a los procesos de pedogénesis en los espacios que bordean a los tecnosoles.

Las propuestas de disposición y distribución de tecnosoles pueden ser revisadas en el apéndice 8.1 Propuesta de diseño de tecnosoles.

5.5.6. Consideraciones finales

El año 2016 entró en vigencia la Ley 20.920, Ley de gestión de residuos con responsabilidad extendida al productor y fomento al reciclaje, la cual señala varias directrices respecto de la clasificación de ciertos residuos y buscar su valorización, mas no sobre obligaciones respecto de reducir su producción y propiciar su reutilización o gestionar los residuos para su reciclaje, tampoco articula o impulsa la industria en ese sentido (BCNC, 2016).

Mediante el proceso de elaboración de tecnosoles se permite valorizar materiales de desechos como residuos no peligrosos los cuales son reintegrados a un ciclo biogeoquímico al constituir un suelo que alberga vegetación (Bolaños, 2014).

La Comisión Chilena del Cobre (CCC, 2016) señaló la importancia de las buenas prácticas respecto del manejo de los relaves en la fase de cierre de instalaciones y faenas mineras. Estas prácticas permiten la rehabilitación ambiental de los relaves, la cual para ser efectiva debe enfocarse en la recuperación de todos los componentes del ecosistema: suelo, biota del suelo y vegetación (Huang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017).

La ausencia de políticas nacionales que fomenten una reducción en la generación de residuos, así como la creación de mercados que promuevan las actividades de reciclaje y valorización de residuos para su uso posterior, son las principales trabas que existen para implementar de manera transversal en la minería las correctas prácticas ambientales y sociales respecto del manejo de los relaves que genera.

También debe ser priorizada la contribución con recursos económicos y subsidios que consideren diferentes formas de forestación de ecosistemas degradados, así como la necesidad urgente que tiene Chile de desarrollar un plan estratégico nacional de restauración y forestación que contemple medidas y metas en el mediano y largo plazo (Bannister *et al.*, 2018).

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de técnicas y tecnologías con criterios de sustentabilidad para la rehabilitación ambiental de relaves mineros es bastante reciente, por lo cual es una disciplina que tiene mucho por investigar y perfeccionar. Actualmente los proyectos de recuperación ambiental sobre relaves han preferido adoptar el uso de vegetación y las propiedades de las plantas para dar solución a los problemas que emanan de los relaves. En este sentido, la fitoestabilización, así como otras tecnologías fitorremediadoras, han surgido para dar soluciones ambientales en este ámbito, dada su efectividad, facilidad de uso, economía y la obtención de beneficios múltiples.

Se puede concluir en cuanto a la situación actual de la fitoestabilización como medida de manejo de PAM que es una técnica ampliamente utilizada. Las principales variaciones en su empleo se remiten a la composición de especies a utilizar, para lo cual se enfatiza que deben ser nativas para adaptarse de mejor manera al contexto local sin generar problemas secundarios. Así mismo, el foco de la fitoestabilización está puesto en garantizar el éxito y sobrevivencia de las plantas, para ello la mayoría de los estudios ha recurrido al uso de enmiendas o acondicionadores de sustrato, para mejorar las propiedades del suelo y facilitar las condiciones de establecimiento de la vegetación.

En zonas áridas y semiáridas la fitoestabilización se enfrenta a condiciones más adversas y por ende a mayores restricciones y probabilidades de fracaso. Es por esto que muchos proyectos que utilizan vegetación para estabilizar relaves mineros han recurrido a centrar sus esfuerzos en mejorar dichas condiciones de llegada, modificando principalmente el factor suelo y con ello lograr los resultados tanto en sobrevivencia de las plantas como en su desempeño posterior.

El propósito primordial de esta técnica es la rehabilitación ambiental de suelos y cursos de agua degradados, contaminados o completamente ausentes, en este sentido, los tecnosoles presentan una amplia versatilidad, lo que permite que sean empleados en distintos escenarios al adecuar su composición y elaboración a las condiciones particulares de cada proyecto.

Existe un número suficiente de proyectos que han implementado tecnosoles con éxito y de los cuales se pueden extraer sus experiencias, aciertos y errores para perfeccionar el uso de esta técnica. En cuanto a su disposición sobre relaves mineros la principal dificultad radica en que los componentes del tecnosol pueden interactuar con los metales o contaminantes del relave y producir reacciones químicas adversas.

Los tecnosoles deben poseer en conjunto ciertas condiciones fisicoquímicas, los cuales son indispensables para su funcionamiento sobre relaves y para la capacidad de sustentar vegetación y su desarrollo en el largo plazo. La primera de estas condiciones es no presentar interacciones negativas con el relave. Así mismo, deben contener materia orgánica estable y nutrientes, tener la capacidad de retener agua y albergar microorganismos y tener una estructura y profundidad adecuada para el desarrollo del tejido radicular de las plantas.

Toda propuesta y proyecto que busque implementar tecnosoles para la rehabilitación ambiental sobre relaves mineros debe adecuarse a las características particulares de cada relave, y considerar el entorno social y ambiental. Para las zonas semiáridas como lo es la región de Coquimbo, es necesario identificar la disponibilidad local de los materiales que van a componer el tecnosol. Estos deben estar disponibles en cantidades suficientes, y se debe conocer su acción o aporte a la mezcla.

Las plantas seleccionadas deben ser de distintas especies, se debe incluir no solo el uso de árboles, sino también de arbustos y hierbas idealmente, de manera que la estructura resultante sea diversa y tan similar a los ecosistemas naturales como sea posible.

El uso de tecnosoles puede ser una alternativa de rehabilitación ambiental con beneficios múltiples ya que para su elaboración se requieren de ciertos componentes, obtenidos a partir de residuos generados por otras actividades. De esta manera se reúnen diversos pasivos ambientales revalorados y reutilizados. Es así que mediante este proceso se evita la generación de los impactos ambientales que provoca su eliminación sobre el medio, a la vez que pasan a constituir tecnosoles para la rehabilitación de relaves.

Es fundamental que tanto para la implementación de tecnosoles, como para la efectiva rehabilitación de PAM, se genere por parte del Estado una serie de políticas que fomenten el reciclaje de los residuos de las diversas industrias productivas y se facilite el encadenamiento en la línea de su reutilización. Así mismo deben promoverse políticas e incentivos económicos para la reforestación de suelos degradados, como también deben implementarse cambios en el sistema legal que regula la actividad minera, las medidas de manejo de los relaves y las obligaciones de las empresas productoras de residuos con usos potenciales, de manera que estas eviten desperdiciarlos y generar los consecuentes impactos para el medio con su disposición final en él.

Existe una amplia brecha de información que debe ser cubierta con nuevas investigaciones y proyectos que evalúen y prueben los tecnosoles y la vegetación fitoestabilizadora como medidas de manejo y rehabilitación de relaves mineros. Estos trabajos deben ser evaluados idealmente en condiciones de campo, así como en diferentes combinaciones de especies y mezclas de tecnosoles. De esta manera, será posible identificar a través de la experiencia, la metodología y condiciones más efectivas para la rehabilitación de PAMs.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adriano, D.; Wenzel, W.; Vangronsveld, J. y Bolan, N. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma* 122, pp 121–142.

Albuquerque, J.; De la fuente, C. y Bernal, M. 2010. Improvement of soil quality after 'alperujo' compost application to two contaminated soils characterised by differing heavy metal solubility. *J. Environ Manage* 92: 733-41. 9 p.

Alcántara, M. 2015. Recuperación de Suelos de Relaves Mineros para Convertirlos en Áreas Verdes en la Planta Piloto Metalúrgica de Yauris-Uncp. Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de los Materiales. Universidad Nacional del Centro de Perú. 8 p.

Alvarenga, P.; Gonçalves, A.; Fernandes, R.; De varennes, A.; Vallini, G. y Duarte, E. 2008. Evaluation of composts and liming materials in the phytostabilization of a mine soil using perennial ryegrass. *Science of the Total Environment*, 406, 43–56. 14 p.

Alvarenga, P.; Gonçalves, A.; Fernandes, R.; De varennes, A.; Vallini, G. y Duarte, E. 2009. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) effects on soil chemical characteristics. *Chemosphere*, 74, 1292– 1300. 9 p.

Antoniadis, V. y Alloway, B.J. 2002. Leaching of cadmium, nickel, and zinc down the profile of sewage sludge-treated soil. *Commun Soil Sci. Plant Anal* 33:273–86. 16 p.

ASAGRIN. 2007. Información de Contexto para la Elaboración de la Estrategia Regional de Competitividad por Rubro, Olivas Aceiteras Región de Coquimbo. Instituto de Desarrollo Agropecuario. 46 p.

Asensio, V.; Cerqueira, B.; Andrade, M.; Alonso, F. y Fernández, E. 2008. Efecto del Tratamiento con Tecnosoles en la Recuperación de Escombreras de Minas Ricas en Sulfuros Metálicos. *Macia* 10, 107-110.

BANCO CENTRAL DE CHILE. Estadísticas, Cuentas Nacionales. Producto Interno Bruto por clase de actividad económica, trimestral, volumen a precios del año anterior encadenado. [En línea] Santiago, Chile. <<https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principa1/Excel/CCNN/trimestrales/excel.html>> [consulta: 15 febrero 2020]

Bannister, J.; Vargas, R.; Ovalle, J.; Acevedo, M.; Fuentes, A.; Donoso, P.; Promis, A. y Smith, C. 2018. Major bottlenecks for the restoration of natural forests in Chile. *Restoration Ecology*. 22 p.

Barton, C.; Marx, D.; Adriano, D.; Jun-koo, B.; Newman, L.; Czapka, S. y Blake, J. 2005. Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environmental Geosciences*. 12: pp 251-265.

Bell, L. 1999. A multidisciplinary approach to producing solutions for sustainable mine rehabilitation – the role of the Australian Centre for Mine Site Rehabilitation Research. *Remediation and Management of Degraded Lands*. CRC Press LLC. Florida, USA. pp 3-11.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 1994. Ley 19.300, Aprueba Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Ministerio Secretaría General De La Presidencia. 35 p.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 2009. Decreto 4, Reglamento Para El Manejo De Lodos Generados En Plantas De Tratamiento De Aguas Servidas. Ministerio Secretaría General De La Presidencia; Subsecretaría General De La Presidencia. 13 p.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 2012. Decreto 41, Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. Ministerio de Minería. 27 p.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 2016. Ley 20.920, Establece Marco Para La Gestión De Residuos, La Responsabilidad Extendida Del Productor Y Fomento Al Reciclaje. Ministerio del Medio Ambiente. 16 p.

Bobadilla, G. 1980. Factibilidad de usar sedimentos del Distrito de Riego del río Coello para la recuperación de suelos salinos-sódicos. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Biblioteca Agropecuaria de Colombia*. N° 26, 96 p.

Bolan, N.; Adriano, D. y Naidu, R. 2003. Role of phosphorus in (im)mobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 177, 44 p.

Bolan, N.; Park, J.; Robinson, B.; Naidu, R. y Huh, K. 2011. Phytostabilization: A Green Approach to Contaminant Containment. *Advances in Agronomy*, 112. ISSN 0065-2113. 60 p.

Bolaños, D. 2014. Aplicación de Tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectados por actividades de obras civiles, urbanas y minería. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela. Tesis Doctoral. 386 p.

Bradshaw, A.; Humphreys, M. y Johnson, M. 1978. The value of heavy metal tolerance in the revegetation of metalliferous mine wastes. In: Goodman, G.T., Chadwick, M.J. (Eds.), *Environmental Management of Mineral Wastes*. Sijthoe & Noordhoe, The Netherlands. pp 311- 334.

Bradshaw, A. y Chadwick, M. 1980. *The Restoration of Land, The ecology and reclamation of derelict and degraded land*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 317 p.

Bradshaw, A. 1983. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 20, 1-17.

Bradshaw, A. 1997. The importance of soil ecology in restoration science. In: Urbanska KM, Webb N, Edwards P, editors. *Restoration Ecology and Sustainable Development*. Cambridge. pp 33–64.

Burgos, D. 2010. *Guía Para La Gestión Y Tratamiento De Residuos Y Desperdicios De Proyectos De Construcción Y Demolición*. Tesis para optar al Título de: Ingeniero Constructor. Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería en Construcción. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 120 p.

Cantor, B. y Mateus, N. 2017. *Modelos Implementados En El Manejo, Tratamiento, Aprovechamiento Y Disposición Final De Residuos De Construcción Y Demolición En Latinoamérica. (Estado Del Arte)*. Monografía Para Optar Por El Título De Ingeniero Civil. Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Bogotá, Colombia. 97 p.

Casale, J.; Ginocchio, R. y León-lobos, P. 2011. *Fitoestabilización de Depósitos de Relave en Chile. Guía N° 4: Marco Ambiental y Relaves Mineros Abandonados en la Región de Coquimbo*. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, CIMM. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Corporación de Fomento de la Producción, CORFO. Santiago, Chile. 44p.

Cao, X. y Liu, L. 2015. Using microorganisms to facilitate phytoremediation in mine tailings with multi heavy metals. *Adv. Mater. Res* 437e440. *Trans Tech Publ*. 5p.

CENTRO DE ESTUDIOS AMBIENTALES. 2018. *Tecnosuelos de Gardelegi. Memoria del Proyecto*. Ayuntamiento de Victoria-Gasteiz, España. 100 p.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE TEGNOLOGÍAS DE LA CONSTRUCCIÓN. 2017. *Informe Final CONSULTORÍA ESTUDIO: “Caracterización de residuos de la construcción, 1ªetapa: Desarrollo, validación y calibración de metodología, aplicado a casos piloto”*. Universidad del Bio-Bio, Concepción. 249 p.

Chambers, J. 2000. Seed movements and seedling fates in disturbed sagebrush steppe ecosystems: Implications for restoration. *Ecol. Appl.* 10(5). 14 p.

Chaney, R.; Malik, M.; Liy, M.; Brown S.; Brewer E.; Angle J. y Bakera, J. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotech* 8, 279-284. doi:10.1016/S0958-1669(97)80004-3. 6 p.

Cherian, S. y Oliveira, M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39: pp 9377-9390.

Clemente, R.; Escolar, A. y Bernal, M. 2006. Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials. *Bioresource Technology*, 97, pp 1894–1901.

COMISIÓN CHILENA DEL COBRE. 2016. Análisis de las Técnicas Utilizadas en Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Ministerio de Minería, Chile. 34 p.

Contreras, M. 2009. Plan de Tratamiento Integral de Residuos de la Construcción y Demolición, Puente Alto. Memoria de Título, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Arquitectura. Universidad de Chile. 86 p.

Cotacallapa, M.; Huanatico, E.; Jorge, B.; Condezo, L.; Vilca, R.; Coaguila, M. y Condori, G. 2020. Aprovechamiento de los residuos industriales vitivinícolas para la obtención de etanol y compost. Universidad Nacional de Moquegua, Perú. 145 p.

Cunningham, S.; Berti, W. y Huang, J. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnol* 13: pp 393–397.

Dary, M.; Chamber-pérez, M.; Palomares, A. y Pajuelo, E. 2010. “In situ” phytostabilisation of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus* inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria. *J. Hazard. Mater.* 177, pp 323 - 330.

De la fuente, C.; Clemente, R.; Martínez-alcalá, I.; Tortosa, G. y Bernal, M. 2011. Impact of fresh and composted solid olive husk and their water-soluble fractions on soil heavy metal fractionation; microbial biomass and plant uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 186, pp 1283 – 1289.

Delgadillo, A.; González, C.; Prieto, F.; Villagómez, J. y Acevedo, O., 2011. Fitorremediación: Una Alternativa para Eliminar la Contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14: pp 597 - 612.

Díaz, I.; Labra, E. y Mejías, P. 2009. Manejo Orgánico de Viñedos en Secano. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Chile. 4 p.

Dickinson, N.; Baker, A.; Doronila, A.; Laidlaw, S. y Reeves, R. 2009. Phytoremediation of inorganics: realism and synergies. *International Journal of Phytoremediation*. 11:2, pp 97-114.

Dijkstra, J.; Sloop, H. y Comans, R. 2002. Process identification and model development of contaminant transport in MSWI bottom ash, *Waste Manage.* 22: pp 531-541.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2020. Información Pluviométrica, Fluviométrica, Estado de Embalses y Aguas Subterráneas. Boletín N° 501. Ministerio de Obras Públicas. Chile. 45 p.

- Dudka, S. y Adriano, D. 1997. Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. Review and Analyses, *J. Environ. Qual.* 26: 13 p.
- Eckmeier, E.; Gerlach, R.; Gehrt, E. y Schmidt, M. 2007. Pedogenesis of Chernozems in Central Europe—A review. *Geoderma.* 139 (3–4): pp 288–299.
- Ehsan, M.; Santamaría, K.; Vázquez, A.; Alderete, A.; De la cruz, N.; Jaén, D. y Augustine, P. 2009. Phytostabilization of cadmium contaminated soils by *Lupinus uncinatus* Schldl. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Spanish Journal of Agricultural Research 7(2), pp 390-397.
- ENAMI, 2007a. Evaluación de Impacto Ambiental, Proyecto Delta. Capítulo 1, Descripción del Proyecto. MWH. Chile. 52 p.
- ENAMI, 2007b. Evaluación de Impacto Ambiental, Proyecto Delta. Capítulo 4, Línea Base Ambiental. MWH. Chile. 104 p.
- ENAMI, 2007c. Evaluación de Impacto Ambiental, Proyecto Delta. Capítulo 5, Identificación y Evaluación de Impactos. MWH. Chile. 41 p.
- ENAMI, 2007d. Evaluación de Impacto Ambiental, Proyecto Delta. Capítulo 6, Plan de Manejo. MWH. Chile. 19 p.
- Ernst, W. 2005. Phytoextraction of mine wastes—Options and impossibilities. *Chem. Erde.Geochem.* 65, pp 29 – 42.
- Fitzpatrick, E. 2006. Factors of soil formation: Time. In Certini, G. and Scalenghe, R. (eds.) Soils. Basic Concepts and Future Challenges. Cambridge University Press, Cambridge, RU. EU. pp 181 - 191.
- Folchi, M. 2001. La insustentabilidad de la industria del cobre en Chile: los hornos y los bosques durante el siglo XIX. *Mapocho* 49: pp 149 - 175.
- Fuentes, A. 2018. Evaluación De Alternativas De Reducción Del Volumen Para Almacenamiento De Sedimentos Aportantes A Embalses De Riego Mayores. Aplicación A Un Caso En Chile. Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile. 92 p.
- Gandarillas, M.; España, H.; Quinteros, J.; Ginocchio, R.; Bas, F. y Arias, R. 2016. Efecto de la enmienda orgánica con lodos de cerdo sobre el establecimiento de *Lolium perenne* en relaves mineros. *Agro sur*, 44, pp 41 – 52.
- García, J. 2016. Gestión de residuos de la construcción y la demolición en Chile. Chile: CMIC. 4 p.
- Ginocchio, R. 1998. Chile: restoration challenges. *Min Environ Manag.* 3 p.

Ginocchio, R. y Baker, A. 2004. Metallophytes in Latin America: a remarkable biological and genetic resource scarcely known and studied in the region. *Revista Chilena de Historia Natural* 77: pp 185-194.

Ginocchio, R. y León-lobos, P. 2007. Recursos Genéticos para Fitoestabilización: Plantas que Reducen la Contaminación por Desechos Mineros. INIA. 4 p.

Ginocchio, R. y León-lobos, P. 2011. Fitoestabilización de Depositos de Relave en Chile. Guía N° 1. Metodología General. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, CIMM. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 171.924. 85 p.

Glick, B. 2010. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnol. Adv.* 28, pp 367 - 374.

González, I.; Muena, V.; Cisternas, M. y Neaman, A. 2008. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural* 81: pp 279 – 291.

González, E. 2014. Evaluación en Nave Cerrada de los Riesgos para la Salud en Tecnosoles Procedentes de Residuos de Minería Polimetálica. Facultad de Química. Universidad de Murcia. España. 314 p.

Goodman, G. 1974. Ecology and the problems of rehabilitating wastes from mineral extraction. *Proceedings of the Royal Society.* 339: pp 373 - 387.

Grandlic, C.; Mendez, M.; Chorover, J.; Machado, B. y Maier, R. 2008. Plant Growth-Promoting Bacteria for Phytostabilization of Mine Tailings. *Environ. Sci. Technol.* 42, pp 2079 – 2084.

Hattori, H. 1992. Influence of heavy metals on soil microbial activities. *Soil Science and Plant Nutrition*, 38: pp 93–100.

Henríquez, S. y Hernandez, J. 2017. Prefactibilidad Técnica de la Fitoestabilización del Tranque de Relave N°3 Minera Altos de Punitaqui. Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en Minería y Metalurgia. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile. 82 p.

Herrán, A.; Lacalle, R.; Iturritxa, M.; Martínez, M. y Vilela, J. 2016. First results of Technosols constructed from municipal waste in Victoria-Gasteiz (Spain). *Spanish Journal of Soil Science* 10, 3232.

Huang, L.; Baumgartl, T. y Mulligan, D. 2012. Is rhizosphere remediation sufficient for sustainable revegetation of mine tailings? Universidad de Queensland, Australia. *Annals of Botany* 110: pp 223 – 238.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, 2017. Manual de Manejo de Huerto de Olivo. Instituto de Desarrollo Agropecuario, Ministerio de Agricultura, Chile.

Jolly, J. 1985. Bureau of Mines mineral facts and problems. U.S Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, DC. 965 p.

Karami, N.; Clemente, R.; Moreno-Jiménez, E.; Lepp, N. y Beesley, L. 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *J Hazard Mater.* 191: pp 41-48.

Keller, C.; Marchetti, M.; Rossi, L., y Lugon-Moulin, N. 2005. Reduction of cadmium availability to tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants using soil amendments in low cadmium contaminated agricultural soils: A pot experiment. *Plant Soil* 276, pp 69–84.

Khan, T. 2013. Soils principles, properties and management. Springer. New York. pp 89-95.

Kohler, J.; Caravaca, F. y Azcón, R. 2014. Selection of Plant Species-Organic Amendment Combinations to Assure Plant Establishment and Soil Microbial Function Recovery in the Phytostabilization of a Metal-Contaminated Soil. *Water Air Soil Pollut* 225, pp 19-30.

Kumpiene, J.; Lagerkvist, A. y Maurice, C. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—A review, *Waste Manag.* 28, pp 215–225.

Lagos, G.; Danielson, L.; Quinzio, C.; González, P.; Ropert, R. y Andía, M. 1998. Informe Final: Análisis de Normas de Abandono de Tranques de Relaves y Faenas Mineras. Santiago: DICTUC S.A. 351 p.

Lamy, I.; Bourgeois, S. y Bermond, A. 1993. Soil cadmium mobility as a consequence of sewage sludge disposal. *J Environ Qual*; 22: 7 p.

Lecaros, M. 2011. Estudio de Sedimentación en el Embalse Rapel. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile. 141 p.

Lee, S.; Lee, J.; Choi, Y. y Kim, J. 2009. In situ stabilization of cadmium-, lead-, and zinc-contaminated soil using various amendments. *Chemosphere*, 77, pp 1069–1075.

León-Lobos, P.; Ginocchio, R. y Baker, A. 2011. Fitoestabilización de Depósitos de Relaves en Chile. Guía N° 3: Flora y Vegetación Asociadas a Relaves Mineros Abandonados. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, CIMM. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 171.924; 64 p.

LIFESARMIENTO. 2019. Guía Técnica Para La Implementación. Gestión innovadora de los sarmientos procedentes de la poda para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora de suelos agrícolas. Murcia, España. 29 p.

Lobos, M. 2008. Efectividad de Biosólidos para la Fitoestabilización de un Tranque de Relaves Minero, en la Comuna de Nogales. Memoria para optar al Título Profesional de

Ingeniero Forestal. Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Chile. 86 p.

Macías, F.; Bao, M.; Macías-García, F. y Camps, M. 2007. Valorización biogeoquímica de residuos mediante la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales. *Aguas & Residuos*, 5, pp. 12-25.

Madejón, E.; Madejón, P.; Burgos, P.; Pérez De Mora, A. y Cabrera, F. 2009. Trace elements, pH and organic matter evolution in contaminated soils under assisted natural remediation: a 4-year field study. *Journal of Hazardous Materials*, 162, pp 931–938.

Marques, A.; Rangel, A. y Castro, P. 2009. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 39, pp 622-654.

Mcbride M.; Richards B.; Steenhuis T.; Ruiso J. y Suave, S. 1997. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. *Soil Sci.* 162: pp 487–500.

Mcgrath, S.; Sanders, J. y Shalaby, M. 1988. The effects of soil organic matter levels on soil solution concentrations and extractabilities of manganese, zinc and copper. *Geoderma.* 42: pp 177-188.

Medina, T. 2010. Bioacumulación de Elementos Traza en Especies Estabilizadoras (*Acacia saligna* (Labill)H. Wendl y *Eucalyptus camaldulensis* (Dehnh)) EN TRANQUES DE RELAVES. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. 66 p.

Medvinsky, G.; Caroca, V. y Vallejo, J. 2015. Informe 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. Fundación Relaves Chile. Fundación Terram. 23 p.

Melgar-Ramírez, R.; González, V.; Sánchez, J. y García, I. 2012. Effects of Application of Organic and Inorganic Wastes for Restoration of Sulphur-Mine Soil. *Water Air Soil Pollut* , 223: pp 6123–6131.

Mench, M.; Lepp, N.; Bert, V.; Schwitzguébel, J.; Gawronski, S.; Schoder, P. y Vangronsveld, J. 2010. Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action859, *J. Soil Sed.* 10 pp 1039 – 1070.

Mendez, M. y Maier, R. 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments—an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 116, pp 278–283.

Milla, E. y Guy, R. 2018. Phytoremediation of tailings from a Chilean Copper Mine. GECAMIN. Departamento de Ciencias Forestales y Conservación. Universidad de British Columbia, Canadá. 11 p.

MINERALS YEARBOOK. 1992. Departamento del Interior EE.UU. Bureau of Mines, Washington, DC. 1945 p.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. 2012. Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Proyecto Gear. GERD. Gobierno de España. 292 p.

MINISTERIO DE MINERIA, 2019. Glosario Minero. Ministerio de Minería. Gobierno de Chile. [En línea] <<http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>>

Munshower, F. 1994. Practical Handbook of Disturbed land Revegetation. Boca Raton, FL:Lewis Publishing. 282 p.

Muñoz, E.; Fabres, A. y Cárdenas, J. 2011. Residuos sólidos del proceso de construcción de viviendas en Chile – cuantificación, caracterización y establecimiento de indicadores. VI Encuentro Nacional e IV Encuentro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis - Vitória - ES – BRASIL. 7 p.

Nehls, T.; Rokia, S.; Mekiffer, B.; Schwartz, C. y Wessolek, G. 2013. Contribution of bricks to urban soil properties. Journal of Soils Sediments, 13: pp 575-584.

Oblasser, A. y Chaparro, E., 2008. Estudio comparativo de la gestión de pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. CEPAL. 50-52. 81 p.

OFICINA DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS AGRARIAS. 2018. Región de Coquimbo, Información Regional 2018. Ministerio de Agricultura, Chile. 15 p.

Orchard, C.; León-Lobos, P. y Ginocchio, R. 2009. Phytostabilization of massive mine wastes with native phytogenetic resources: potential for sustainable use and conservation of the native flora in north-central Chile. Cien. Inv. Agr. 36(3): pp 329-352.

Oyarzun, R.; Higuera, P. y Lillo, J. 2011. Minería Ambiental. Una introducción a los Impactos y su Remediación. GEMM. 6-7. 341 p.

Padmavathiamma, P. y Li, L. 2007. Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. Water, Air, & Soil Pollution. 184: pp 105-126.

Pardo, T.; Clemente, R. y Bernal, M. 2011. Effects of compost, pig slurry and lime on trace element solubility and toxicity in two soils differently affected by mining activities. Chemosphere, 84, pp 642–650.

Pardo, T.; Martínez-Fernández, D.; Clemente, R.; Walker, D. y Bernal, M. 2013. The use of olive-mill waste compost to promote the plant vegetation cover in a trace-element contaminated soil. Environmental Science and Pollution Research. 10 p.

Peppas, A.; Komnitsas, K. y Halikia, I. 2000. Use of organic covers for acid mine drainage control. *Miner Eng*; 13: pp 563–74.

Pérez-De-Mora, A.; Ortega-Calvo, J.; Cabrera, F. y Madejón, E. 2005. Changes in enzyme activities and microbial biomass after “in-situ” remediation of a heavy metal-contaminated soil. *Applied Soil Ecology*, 28, pp 125–137.

Pérez, V. 2014. Inmovilización de Elementos Potencialmente Tóxicos en Zonas Mineras Abandonadas mediante la Construcción de Tecnosoles y Barreras Reactivas Permeables. Facultad de Química. Universidad de Murcia. España. 296 p.

Ramírez, J. 2012. Evaluación Ex-Situ del Establecimiento de Tuna Criolla Sobre Relaves Mineros Acondicionados Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. 33 p.

Reichenauer, T. y Germida, J. 2008. Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. *ChemSusChem*. 1: pp 708-717.

REVISTA TÉCNICOS MINEROS. Relaves Andacollo, Región de Coquimbo, Chile. [En línea]. <<http://www.revistatecnicosmineros.com/>> [consulta: 27 marzo 2020]

Santibáñez, C. y Varnero, M. 2005. Nitrate Leaching from Mine Tailings Amended with Biosolids as Affected by Plants. *Geophysical Research Abstracts* 7, pp 1-5.

Santibáñez, C. 2006. Uso de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas servidas y ballica para la fitoestabilización de tranques de relaves. Tesis de Doctorado en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 103 p.

Santibáñez, C.; Verdugo, C. y Ginocchio, R. 2008. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica CIMM, Chile. *Science of the Total Environment* 395, pp 1-10.

Santibáñez, C.; Ginocchio, R. y Brown, S. 2011. Fitoestabilización de Depósitos de Relaves en Chile. Guía N° 2: Aplicación Sustentable de Acondicionadores. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, CIMM. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 171.924. 48 p.

Santibáñez, C.; De La Fuente, L.M.; Bustamante, E.; Silva, S.; León-Lobos, P. y Ginocchio, R. 2011b. Potential use of organic-and hard-rock mine wastes on aided phytostabilization of large-scale mine tailings under semiarid Mediterranean climatic conditions: short-term field study. *Applied and Environmental Soil Science* 895817. 15 p.

Scalenche, R. y Ferraris, S. 2009. The First Forty Years of a Technosol. *Pedosphere* 19 (1): pp 40–52.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. 2020. Catastro de Depósitos de Relaves en Chile. Ministerio de Minería. Santiago, Chile. 1 p.

Singh, O. y Jain, R. 2003. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied and Microbiology Biotechnology*. 63: pp 128-135.

Smith, R. y Bradshaw, A. 1972. Stabilization of toxic mine wastes by the use of tolerant plant populations. *Trans. Inst. Min. Metall. A* 81, pp 230-237.

Soto, G. 2016. Gestión territorial de pasivos ambientales prioritarios. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Formulario de Presentación de Proyecto FIC-R. 53 p.

Tejada, M.; Moreno, J.; Hernández, M. y García, C. 2007. Application of two beet vinasse forms in soil restoration: effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119, pp 289– 298.

Tordoff, G.; Baker, A. y Willis, A. 2000. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. Department of Animal and Plant Sciences, University of Sheffield. Sheffield, UK. 10 p.

Uliarte, E.; Martinez, L.; Soloa, R. y Morichetti, S. 2017. A Large-Scale Composting Experimentation Using Grape Marcs And Lees Residues From Mendoza Wine Alcohol Industry. Mendoza, Argentina. 5 p.

UNIDAD DE PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN RURAL. 2013. ‘Proyecto Parcelas de Tecnosuelos en Gardelegi’. Memoria del Primer Año. UPGR, Ayuntamiento de Victoria-Gasteiz, España. 39 p.

Vargas, E. 2015. Situación del manejo de lodos en las empresas sanitarias. *Revista AIDIS – Chile*. Santiago, Chile. Pp 16 – 20.

Villaverde, I. 2018. Los tecnosoles como alternativa para la gestión de problemas de degradación ambiental. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense de Madrid. España. 20 p.

Vitorri, A.; Lo Papa, G.; Ferronato, C.; Falsone, G.; Vianello, G. y Dazzi, C. 2014. In situ remediation of polluted Spolic Technosols using Ca(OH)₂ and smectitic marlstone. *Geoderma*, 232-234, 9 p.

Walker, D.; Clemente, R.; Roig, A. y Bernal, M. 2003. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils. *Environmental Pollution*, 122, pp 303–312.

Walker, D.; Clemente, R. y Bernal, M. 2004. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste, *Chemosphere* 57: pp 215–224.

Wang, L.; Ji, B.; Hu, Y.; Liu, R. y Sun, W. 2017. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. School of Mineral Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, PR China. *Chemosphere*, 184: pp 594-600.

Williams, D. y Currey, N. 2002. Engineering closure of an open pit gold operation in a semi-arid climate. *Int J Min Reclamat Environ* 16: pp 270–288.

Wong, M. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50: pp 775–780.

WORLD REFERENCIAL BASE. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 130 p.

WORLD REFERENCIAL BASE. 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 128 p.

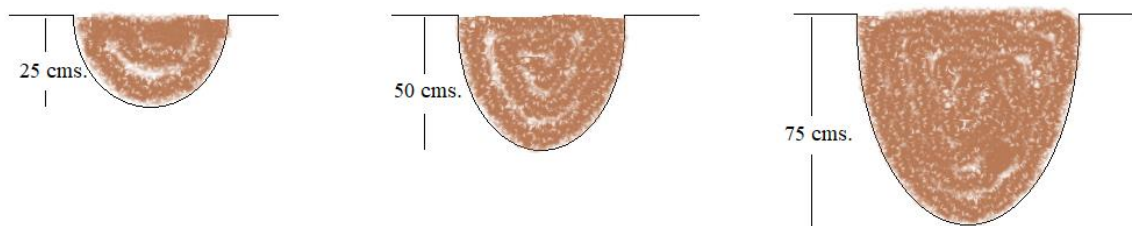
Zornoza, R.; Faz, A.; Martínez, S.; Acosta, J.; Gómez, M.; Muñoz, M.; Sánchez, R.; Murcia, F.; Fernández, F.; López, E. y Espín De Gea, A. 2017. Rehabilitación de una presa de residuos mineros mediante la aplicación de lodo de mármol y purín de cerdo para el desarrollo de una fitoestabilización asistida. *Boletín Geológico y Minero*, 128. pp 421-435.

8. APÉNDICES

8.1. Diseño de tecnosoles

Los tecnosoles cuando no son dispuestos sobre la totalidad del relave, dada la extensión de este último, deben ser dispuestos en los lugares específicos en donde se establecerá vegetación. De esta manera deben excavarse orificios sobre el relave y ser rellenos con la mezcla de tecnosol. El diámetro del agujero, así como su profundidad deben ser evaluados en cada caso y según los requerimientos de la vegetación y el espacio necesario para el crecimiento de las raíces.

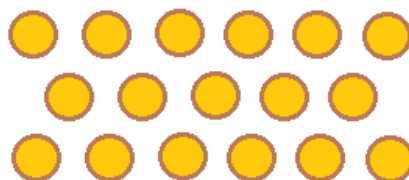
Perfil Vertical de Profundidades Variables de Tecnosoles



Como el objetivo último de la rehabilitación ambiental es recuperar una comunidad vegetal estable en el tiempo y que se asemeje tanto como sea posible a las poblaciones naturales preexistentes, es necesario que se diseñe el establecimiento de la vegetación, de manera que la estructura resultante no sea uniforme en distribución y composición de especies, sino que diversa.

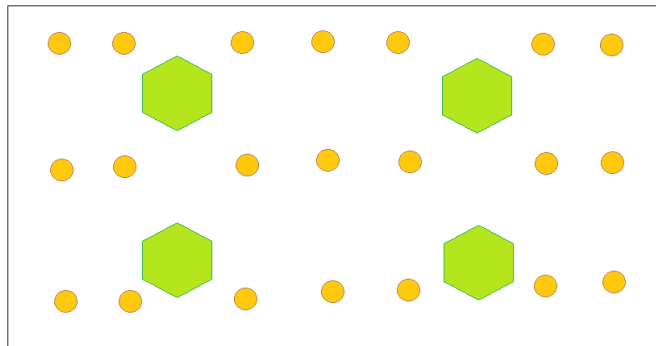
En los siguientes diagramas se expone una estructura simple en distribución y composición de especies y otra de mayor complejidad, cuando se tiende a complejizar la estructura se logran mejores resultados en el intento de asimilar el medio natural.

Estructura simple:



En cada punto hay una planta y la respectiva unidad de tecnosol que la sustenta. En una estructura más compleja se pueden dar distintas profundidades y diámetros de los tecnosoles, pudiendo ser algunos de una envergadura que sostenga pequeños parches de vegetación y no solo plantas individuales, lo cual es muy importante para facilitar los procesos dinámicos posteriores, incluyendo la reproducción y propagación de las plantas, los procesos de formación de suelo, la similitud con ambientes naturales, entre otros.

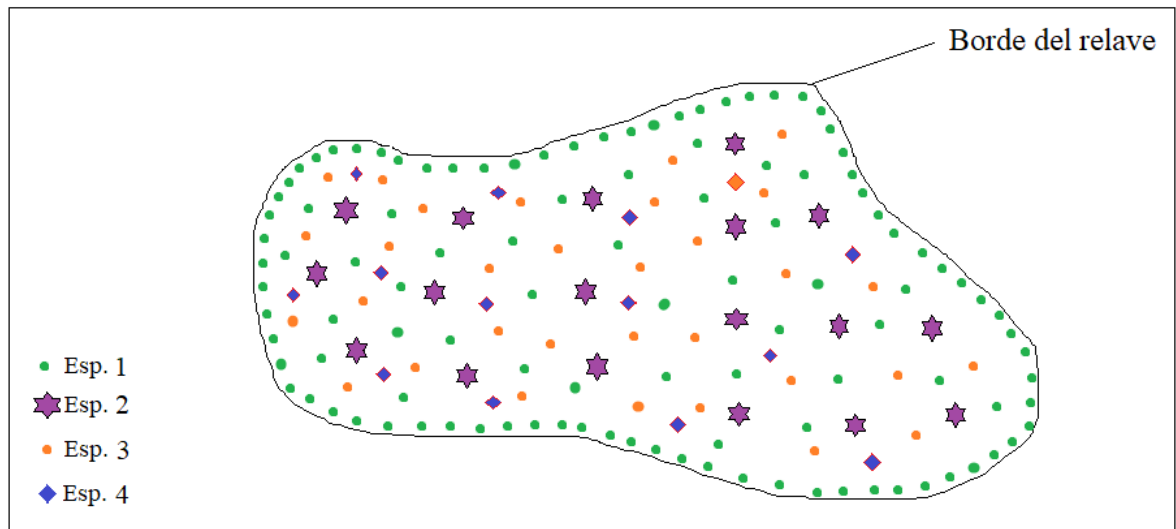
Estructura de mayor complejidad.



La tendencia de aumentar la complejidad debe mantenerse y se relaciona con la disponibilidad y tipo de especies a establecer, cuanto mayor sea el número de especies y de tipos vegetales (aboles/arbustos/hierbas/cactáceas y suculentas), y se distribuyan de manera adecuada, ya sea por poblaciones cercanas o una distribución homogénea.

También es necesario considerar otros factores como el efecto borde, al ser una zona de transición entre el relave y el resto del medio natural, el borde del relave tiene la potencialidad de contaminar el ambiente circundante, es por ello que esta zona en particular debe tener una consideración especial en su manejo, que atienda su carácter crítico y prevenga la ocurrencia de exposición de los contaminantes al medio.

Diagrama de forestación de relave con alta densidad de plantas en el borde.



El número de especies debe ser tan alto como sea posible, siempre dentro de las especies que cumplan los criterios de ser nativas, de distribución local, adaptadas a metales y el clima del lugar y que sean inocuas para el medio o el relave. Las plantas que cubran el borde del relave pueden ser de una o más especies, dependiendo de su disponibilidad, economía (por el alto número de plantas requeridas), entre otros aspectos.