



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

ANÁLISIS DE LA GERMINACIÓN Y SOBREVIVENCIA DE
***Baccharis linearis* (Ruiz et Pav.) EN DISTINTOS SUSTRATOS PARA**
REHABILITACIÓN DE RELAVES MINEROS

Memoria para optar a Título
Profesional de ingeniero forestal

KENNETH DIAMOND MADARIAGA

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

Santiago, Chile

2021

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

ANÁLISIS DE LA GERMINACIÓN Y SOBREVIVENCIA DE *Baccharis linearis*
(Ruiz et Pav.) EN DISTINTOS SUSTRATOS PARA REHABILITACIÓN DE
RELAVES MINEROS

Memoria para optar a Título
Profesional de Ingeniero Forestal

KENNETH DIAMOND MADARIAGA

| Calificaciones: | Nota | Firma |
|---|------|-------|
| Prof. Guía Sr. Eduardo Martínez H. | 5.8 | |
| Prof. consejero Sr. Carlos Magni D. | 5.5 | |
| Prof. consejero Sr. Gabriel Mancilla E. | 6.6 | |

AGRADECIMIENTOS

La confianza es uno de los elementos más importantes dentro del desarrollo de los vínculos humanos, por lo que agradezco profundamente la confianza y paciencia a Eduardo Martínez y Angela Faundez, por apoyarme en todo momento dentro de este largo y dificultoso camino que significó este proyecto. A mis hermanos, que han estado conmigo siempre, a pesar de la distancia. A mis amigos, que se han sumado en este largo camino que cumplen el rol de familia cuando uno está lejos. Y el mayor de los agradecimientos a mi Madre y a mi hermana, esto es por y para ellas.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Pasivos ambientales (PA)..... | 3 |
| 1.1.1 Biosólidos o lodos sanitarios..... | 3 |
| 1.1.2 Relaves mineros..... | 4 |
| 1.1.3 Sedimentos de embalse de riego..... | 5 |
| 1.2 Tecnosoles..... | 6 |
| 1.3 Antecedentes de <i>Baccharis linearis</i> | 6 |
| 1.4 Economía circular..... | 7 |
| 1.5 OBJETIVOS..... | 8 |
| 1.5.1 Objetivo General..... | 8 |
| 1.5.2 Objetivos específicos..... | 8 |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 9 |
| 2.1 Materiales..... | 9 |
| 2.1.1 Área de estudio..... | 9 |
| 2.1.2 Contenedores..... | 9 |
| 2.1.3 Preparación de sustrato..... | 9 |
| 2.1.4 Material vegetativo..... | 12 |
| 2.2 Método..... | 12 |
| 2.2.1 Ensayo de germinación de <i>Baccharis linearis</i> en condiciones controladas 13 | |
| 2.2.2 Llenado de los contenedores con sustrato..... | 13 |
| 2.2.3 Siembra..... | 13 |
| 2.2.4 Mantenimiento y monitoreo..... | 14 |
| 2.2.5 Levantamiento del ensayo..... | 14 |
| 2.2.6 Análisis de los datos..... | 14 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 16 |
| 3.1 Germinación..... | 16 |

| | | |
|-----|---------------------------|----|
| 3.2 | Sobrevivencia | 18 |
| 3.3 | Contenido de humedad..... | 21 |
| 4. | CONCLUSIONES | 22 |
| 5. | BIBLIOGRAFÍA | 24 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Caracterización de tratamientos. | 10 |
| Cuadro 2. Propiedades físicas de los materiales utilizados..... | 10 |
| Cuadro 3. Propiedades químicas de los materiales utilizados..... | 11 |
| Cuadro 4. Metales encontrados en tres mezclas utilizadas. Donde S corresponde a sedimento, L es lodo y el número refiere al porcentaje de participación de la mezcla en base a masa seca..... | 11 |
| Cuadro 5. Análisis bacteriológico de las 3 mezclas utilizadas y del Lodo sanitario, correspondiente a la materia fecal, bacterias de Escherichia coli y Salmonella. | 11 |
| Cuadro 6. Volumen para regar y frecuencia calculada por tratamiento..... | 14 |
| Cuadro 7. Porcentaje de mortalidad por ensayo durante la evaluación de la sobrevivencia. | 20 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama global de las etapas del ensayo. | 13 |
| Figura 2. Promedios germinativos separadas por porcentajes de Lodo/Sedimento y tratamiento de adición de relave. S= sedimento, L= lodo..... | 16 |
| Figura 3. Temporalidad de germinación de B. linearis en distintos sustratos. S= sedimento, L= lodo. | 17 |
| Figura 4. Temporalidad de germinación de B. linearis en distintos sustratos con adición de relave. S= sedimento, L= lodo, R= relave..... | 17 |
| Figura 5. Porcentaje de sobrevivencia final de los individuos de B. linearis en ensayos con distintas proporciones de L= lodo y S= sedimento, separados en ensayos con y sin relave. | 18 |
| Figura 6. Temporalidad de la sobrevivencia de B. linearis en distintos sustratos compuestos por L= lodo y S= sedimento..... | 19 |
| Figura 7. Temporalidad de la sobrevivencia de B. linearis en distintos sustratos compuestos por L= lodo, S= sedimento y R= relave. | 20 |
| Figura 8. Contenido de humedad promedio de los ensayos realizados con B. linearis, separados por proporción de L = lodo y S = sedimento, y por tratamiento con y sin relave. AR = Antes del riego y DR = Después del riego. | 21 |
| Figura 9. Temporalidad del contenido de humedad en los distintos sustratos compuestos por L= lodo y S= sedimento..... | 22 |
| Figura 10. Temporalidad del contenido de humedad en distintos sustratos compuestos por L= lodo, S= sedimento y R= relave. | 22 |

RESUMEN

Una de las consecuencias del sector industrial es la generación constante de desechos que no tienen una rápida reintegración al medio ambiente, por lo que son denominados “pasivos ambientales” (PA) haciendo referencia a la deuda generada al medio ambiente. En su gran mayoría los PA son depositados, acumulados y abandonados en sectores naturales, generando cambios en las propiedades abióticas del medio disminuyendo la actividad de la biota nativa del sector. Uno de estos son los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) que al contacto con el medio ambiente pueden afectar tanto las aguas superficiales y subterráneas, el suelo, el aire, la flora, la fauna y la salud de las personas. Por otro lado, existen PA como lodos sanitarios y sedimentos de embalse de riego agrícolas. Una pequeña proporción de estos PA son utilizados en suelos agrícolas o bien dispuestos en rellenos sanitarios. Considerando estas características, se evaluaron mezclas de estos PA en vivero, con el objetivo de ser utilizados en planes de cierre de depósitos de relaves mineros (DRM).

El presente estudio evaluó la germinación y sobrevivencia de la especie nativa y colonizadora *Baccharis linearis* (Ruiz et pav.) (romerillo) en distintos sustratos elaborados con PA para ser utilizados en la rehabilitación de relaves mineros. Se utilizó biosólidos o lodo sanitario, sedimento de embalse de riego agrícola y relave minero espesados para la elaboración de los sustratos. Se realizaron cinco tipos de mezclas utilizando distintas proporciones de lodo (L) y sedimento (S): (100S-0L; 75S-25L; 50S-50L; 25S-75L; 0S-100L) con y sin adición de relave (R). Se evaluó germinación y sobrevivencia de *Baccharis linearis*. Después de seis semanas se encontró que al aumentar el porcentaje de lodo en el sustrato la germinación fue menor, respecto a la sobrevivencia de los individuos ocurrió que los tratamientos 100% sedimentos con y sin relaves obtuvieron mayor cantidad de individuos. El relave no afectó significativamente la germinación y sobrevivencia de individuos, probablemente debido a que *B. linearis* crece naturalmente en relaves mineros.

Palabras claves: Tecnosoles, pasivos ambientales, biosólidos, sedimentos, lodo, flora nativa.

ABSTRACT

One of the consequences of the industrial sector is the constant generation of wastes that are not quickly reintegrated into the environment, for this reason they are called "environmental liabilities" (EL), referring to the debt generated to the environment. The vast majority of the ELs are deposited, accumulated and abandoned in natural areas, generating changes in the abiotic properties of the environment and decreasing the activity of the native biota of the sector. One of these are the Mining Environmental Liabilities (MEL) that can affect both surface and groundwater, soil, air, vegetation, wildlife and human health. On the other hand, there are ELs such as sanitary sludge and sediments from agricultural irrigation reservoirs, part of which are used in agricultural soils or landfills. Considering these characteristics, mixtures of these ELs were evaluated in a nursery, with the objective of being used in closure plans for mining tailings deposits.

The present study evaluated the germination and development of the native and colonizing species *Baccharis linearis* (Ruiz et pav.) (romerillo) in different substrates made with ELs to be used in the rehabilitation of mine tailings. Biosolids or sanitary sludge, agricultural irrigation reservoir sediment and thickened mine tailings were used for the elaboration of the substrates. Five types of mixtures were made using different proportions of sludge (L) and sediment (S): (100S-0L; 75S-25L; 50S-50L; 25S-75L; 0S-100L) with and without the addition of tailings (R). Germination and survival of *Baccharis linearis* were evaluated. After six weeks, germination was lower according as increasing the percentage of sludge in the substrate, and the survival of individuals occurred in the same way, increasing the percentage of sludge in the substrate and decreasing the survival in the trials. Tailings substrate did not significantly affect germination and survival of individuals, probably because *B. linearis* grows naturally in mine tailings.

Key words: Technosols, environmental liabilities, biosolids, sediments, sludge, native flora.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo de los residuos industriales y domiciliarios en Chile es un tema importante para fines medio ambientales. El aumento poblacional y la industrialización constante de los procesos urbanos ha llevado a una alta producción de residuos que, a la fecha, solo algunos son regulados por Ley. Uno de estos residuos industriales son los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), que con el fin de focalizar y reducir el impacto al medio ambiente son depositados en zonas de sacrificio denominados Tranques de Relaves Mineros o depósitos de relave minero (DRM) (BCN, 2012). La producción y acumulación de estos residuos con elementos tóxicos (ej.: arsénico, mercurio, cobre) (Romero, 2010; Salinas, 2014) generan un problema, ya que pueden ser transportados por el viento causando problemas en la flora, fauna o salud de las personas adyacentes a los tranques de relave (BCN, 2012). Otros Pasivos ambientales (PA) son los generados por las plantas depuradoras de aguas servidas, que generan grandes volúmenes de materiales con alto contenido en Carbono destinados principalmente a zonas de sacrificio como rellenos sanitarios o, en menor medida, son utilizados por la agricultura (Cuevas, 2016). Por último, la utilización de embalses de riego por parte de la agricultura genera una acumulación de sedimentos tanto en el fondo como en las salidas del flujo de agua en los canales de regadío, los que son extraídos con maquinaria y destinados a áreas de acopio.

Según el anuario 2020 del Servicio Nacional de la Geología y Minería (SERNAGEOMIN) Chile es el principal productor de cobre en el mundo, lo que se reflejado directamente el Producto Interno Bruto (PIB) correspondiente a un 12,5% la minería nacional. Por lo que en el catastro realizado en el mismo año realizado por el SERNAGEOMIN contemplan 757 depósitos de relaves mineros y predicen un aumento en la explotación minera a corto plazo, que afecta directamente en la producción de relaves mineros. De estos, 389 depósitos de relaves pertenecen a la Región de Coquimbo y 168 en la Región de Atacama concentrándose la mayor parte de la actividad minera en estas regiones, cabe destacar que de estos depósitos hay solo 39 activos en la región de Coquimbo y 31 en la Región de Atacama, los restantes son depósitos de relave inactivos o abandonados. Estas regiones se caracterizar presentar un clima Mediterráneo árido (Di Castri, 1976; Astaburuaga, 2004) por lo que presentan una baja cubierta vegetal o ausencia de esta, siendo esta la principal causa del levantamiento de material particulado de relaves por efecto de la erosión eólica, causante de problemas de salud y seguridad de las personas y el medio ambiente (Espinace, 2006; Gil-Loaiza, 2018).

Uno de los residuos urbanos utilizables son los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) que por su alto contenido de material orgánico (Fernández, 2015) pueden ser utilizados para enriquecer sustratos estériles (Moreno, 2006). Actualmente, las PTAS deben regirse bajo la normativa D.S. N°4/2009 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, este permite la disposición de estos residuos, sin embargo, el principal inconveniente es su acumulación en sectores de acopio, ocasionando en algunos casos emisiones de material particulado u olores, generando molestias en comunidades cercanas (Reyes, 2011). Por esta razón, se busca

disponerlos para su reincorporación en los suelos agrícolas, en la producción de biogás o utilizarlos en sitios de recuperación medioambiental (Castro, 2007; Montes, 2008; Tiznado, 2003). Otro de los PA a utilizar son los sedimentos de los embalses para riego agrícola, que por efecto de la disminución del flujo del agua y el aumento del ancho del cauce generan sedimentos que se acumulan en la parte inferior de la presa dificultando su salida y causando una pérdida de volumen de agua que generan un gasto económico adicional para su remoción (Fuentes, 2018).

Una de las medidas para iniciar la recuperación de los terrenos degradados es la fitoestabilización, cual consiste en el uso de un tipo particular de planta denominada metalófito, que permiten una estabilización química, física y biológica del sustrato (Ginocchio y León-lobos, 2011). Estas medidas tienen que ser económicamente viables, fáciles de manejar y aplicables en terreno. En el caso de necesitar la adición de acondicionadores de suelo, estos se deben encontrar disponible localmente, en cantidades suficientes, de fácil elaboración, ser compatibles con las especies vegetales seleccionadas para el programa de revegetación y no provocar impactos ambientales a corto o largo plazo (Ginocchio *et al.*, 2011).

Uno de los factores a modificar y de interés para este estudio es la intervención del suelo, de modo que proporcione las condiciones adecuadas tales como retención y drenaje de agua, intercambio catiónico, concentraciones adecuadas de solutos y pH adecuado, con el fin de que el sustrato sostenga y permita el desarrollo de la vegetación nativa.

Los Tecnosoles son suelos modificados o extraídos de la tierra por el hombre, los que están compuestos por una geomembrana, roca dura técnica o artefactos. En donde son incluidos dentro de la clasificación de artefactos los suelos de desechos, lodos, rellenos, desechos de minería y/o materiales elaborados por el hombre, entre otros. (WRB, 2007). Se desconoce las proporciones óptimas de estos artefactos para el desarrollo de la vegetación nativa, dificultando futuros programas de rehabilitación ambiental de relaves.

En este estudio se busca evaluar el desempeño en vivero de *Baccharis linearis* (Ruiz et Pav.) Pers., establecido en diferentes sustratos. *B. linearis* es una especie nativa y colonizadora que crece de forma natural en planicies asoleadas, sectores degradados y con poca disponibilidad agua, contando con una distribución desde la región de Atacama hasta la región de los lagos (Riedemann y Aldunate, 2001), cabe mencionar que *B. linearis* ya se ha utilizado en programas de fitoestabilización en Chile.

Por esta razón es necesario buscar nuevas alternativas para el uso de los pasivos ambientales, con el fin de poder mitigar los impactos que provocan al medio ambiente y, de la misma forma, beneficiar a las especies nativas que se establecen en el área. Por lo mencionado anteriormente en este estudio se busca desarrollar una mezcla de PA que permita la germinación y la sobrevivencia de especies colonizadoras y nodrizas *Baccharis linearis* en sectores semiáridos de Chile.

1.1 Pasivos ambientales (PA)

En términos económicos los activos son la valorización económica de derechos y bienes que estén sujetos a una empresa y los pasivos, son las deudas que recaen en esta misma, por lo que cuando hablamos de pasivos ambientales nos referimos a la suma de los daños no compensados por la empresa al medio ambiente y sus comunidades, estos contemplan operaciones normales o casos de accidente durante todo su historial de desarrollo (Russi y Martínez, 2003).

Uno de los principales PA en Chile son los Pasivos ambientales Mineros (PAM) regulados por el Decreto Supremo N°248 (2007) de la ley minera. Actualmente el SERNAGEOMIN define los PAM como una faena minera abandonada o paralizada que constituye un riesgo significativo para la salud de las personas o para el medio ambiente. El principal problema es el colapso de los depósitos por movimientos sísmicos o excesos de relave, que causan derrames contaminando el suelo, agua superficiales y subterráneas, ya que este presenta variedad de metales pesados (BNC, 2012). Cabe destacar que el primer catastro de Faenas Mineras de Chile fue realizado en el año 2007, que luego fue actualizado por el SERNAGEOMIN en el año 2010.

Otro de los PA son los lodos sanitarios provenientes de la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS), que debido a su producción constante dentro de la región Metropolitana ha generado problemas respecto a su disposición, almacenamiento y administración de lodos, estos problemas son reconocidos por la empresa Aguas Andinas S.A. (2019), que por la saturación de vertederos donde se depositan gran parte de los lodos fue necesario construir una planta de procesamiento de Biosólidos ubicada en el km 59 de la ruta 5, denominada Planta el Rutal, que es la encargada de acumular los biosólidos de gran parte de la región que actualmente está cerca de su límite de almacenamiento. Este problema se ha mitigado bajo el uso de silos de recepción de lodos para optimizar su gestión con el fin de ser utilizados como biofertilizantes y/o recuperadores de suelos agrícolas (Aguas andinas, 2019).

Otro de los PA considerados en este estudio son los sedimentos de embalse de riego, refiriéndose a la acumulación de sedimentos en los embalses destinados para solventar la demanda de agua para los agricultores locales. Los principales problemas que genera la acumulación de sedimentos es la disminución del volumen del agua en el embalse y la obstrucción de los canales de salida, generando un gasto adicional para los embalses y menos disposición de agua para los agricultores.

1.1.1 Biosólidos o lodos sanitarios

Dentro del decreto N°148 (2004) de manejo de residuos industriales se define como Lodo a cualquier residuo semisólido que ha sido generado en plantas de tratamiento de efluentes, aguas servidas y/o residuos industriales líquidos. La composición de estos

residuos se puede tratar de fangos, barros o sedimentos provenientes de procesos que genera la actividad antrópica. La generación de estos lodos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) se produce mediante la entrada de agua a la planta junto a los lodos, para posteriormente ser separados y centrifugados, así obtener un producto con humedad cercana a un 60%, luego el lodo es secado hasta obtener una humedad final que varía entre el 5% y el 40%, conformando lo que se conoce como biosólido (Rámila y Rojas, 2008). Dentro del artículo 86 del decreto N°148 se permite el uso de estos residuos para actividades agrícolas y/o recuperación de suelo, debido a su alto contenido de material orgánico.

La utilización de biosólidos genera mayor permeabilidad, retención de humedad y aportan nitrógeno, fósforo y calcio al suelo (Fernández, 2015; Donoso *et al.*, 2016). De esta forma, se producen condiciones favorables para el desarrollo de la vegetación colonizadora, potenciando la actividad microbiana en la interacción del sistema suelo-vegetación (Santibáñez *et al.*, 2004). La mayor cantidad de materia orgánica estabiliza los agregados del suelo, mejorando el balance hídrico y también el potencial hídrico de las especies forestales sometidas a restricción hídrica (Donoso *et al.*, 2016). La utilización de estos biosólidos debe ser moderada, porque la aplicación en altas dosis puede ocasionar una carga excesiva de material orgánico, malos olores y pérdida de nitrógeno por lixiviación (Ginocchio *et al.*, 2011).

Dentro del Decreto N°4 el cual establece el reglamento para el manejo de lodos generados en PTAS detalla las características favorables y desfavorables de los lodos, además, menciona sus clasificaciones, restricciones, diferentes usos y condiciones técnicas de aplicación en distintos suelos, por otra parte, en el artículo 3 del mismo decreto no considera una aplicación al suelo si este es en depósitos de relave o ambientes estériles, por lo que los lodos están exentos de restricciones de uso. El mismo decreto clasifica y define los lodos en clase A y B, considerando los de clase A como lodos con una densidad de coliformes fecales menor a 1000 número más probable (NMP) por gramo de sólidos totales, debe tener base de materia seca o tener una densidad de *Salmonella sp.* Menor a 3 NMP en 4 gramos de sólidos totales, en el caso de los lodos de clase B se definen como la media geométrica del contenido de coliformes fecales debe ser menor a 2.000.000 NMP en un análisis no menor a siete muestras tomadas al momento del uso o de la eliminación del lodo.

1.1.2 Relaves mineros

Los relaves mineros corresponden a desechos generados por la actividad minera que contempla una solución acuosa polimetálica sulfatada con alto contenido de cobre, plomo, zinc, hierro, cadmio, mercurio, selenio, zinc y arsénico obtenido del proceso de separación de los minerales de interés (Romero, 2010; Salinas, 2014). Los relaves generados se destinan a tranques artificiales, que en zonas áridas y semiáridas en Chile evaporan el agua quedando en una mezcla homogénea, el cual no se considera un suelo

natural ya que su funcionalidad para permitir el establecimiento de plantas se encuentra limitada, debido a un alto contenido de elementos tóxicos y casi nula actividad biológica (Salinas, 2014).

Según los datos del Servicio Nacional de la Geología y Minería (SERNAGEOMIN) del Anuario 2020 Chile es el principal productor de cobre en el mundo (participación de 28,5%) y es segundo en producción de molibdeno (participación de 20,2%), reflejado en el Producto Interno Bruto (PIB) correspondiente a un 12,5% la minería nacional, en donde un 11,2% de éste corresponde a la minería del cobre. Esto conlleva a que en el Catastro nacional del 2020 se evaluó que Chile genera una tasa de 530 millones de toneladas al año de relave en 757 depósitos de relaves mineros (112 activos, 467 no activos, 173 abandonados y 5 en construcción), se estima un aumento en la tasa de producción de relaves en los próximos años.

Las actividades relacionadas con los depósitos de relaves mineros se rigen bajo el decreto supremo N°248 (2007), el cual establece que el SERNAGEOMIN tenga la facultad de aprobación de proyectos con una producción menor a 5000 toneladas al mes teniendo como fin el fiscalizar la implementación de estos proyectos y sus medidas de seguridad (SERNAGEOMIN, 2016), por otro lado, los proyectos que presentan una producción mayor a 5000 toneladas al mes se regulan bajo la ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la cual especifica que los proyectos deben someterse al Servicio de Evaluación de impacto Ambiental (SEIA), para que posteriormente el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) sea quien emita las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), las cuales establecen las condiciones bajo las que se aprueba el proyecto (Fundación Chile, 2018).

La Ley 20.551 (2011, vigencia 2012) que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras tiene como objetivo regularizar el cierre de mineras y sus respectivos relaves, por consiguiente, busca asegurar la estabilidad física y química del territorio como también resguardar la salud y seguridad de las personas. El plan de cierre debe contemplar objetivos tanto técnicos como económicos de acuerdo con las características de la faena minera, el cual se debe presentar antes del cese de las actividades. Este plan es obligatorio para toda industria extractivista, teniendo que cumplir con todas las medidas y actividades contempladas en dicho documento dentro de los plazos establecidos.

1.1.3 Sedimentos de embalse de riego

De acuerdo con las necesidades hídricas de la agricultura en la región de Coquimbo, fue necesario construir embalses que permitiesen la acumulación de grandes cantidades de agua para su distribución en la zona, por lo que fue necesario construir el Sistema La Paloma correspondiente al conjunto de obras ubicadas en la cuenca del Río Limarí, cerca de Ovalle, en la provincia del Limarí. El sistema está compuesto principalmente por el embalse Recoleta, La Paloma y Cogotí, que en su conjunto generan una capacidad útil de

1.000 millones de m³ que permiten el riego a una superficie estimada de 50.000 Ha (Flores, 2010) que en la actualidad 62 millones de m³ corresponden a sedimentos que disminuyen en un 7,5% la capacidad de almacenaje de los embalses considerando que el sedimento al humectarse aumenta su volumen, lo que se traduce en 75 millones de m³ menos de agua, que equivale al riego de una temporada de 7.500 ha (Asociación de canalistas del embalse Recoleta, 2018). En el siguiente estudio se usaron los sedimentos del embalse Recoleta ubicado sobre el río Hurtado, este permite regar una superficie de 14.000 hectáreas referido a una capacidad de 100 millones de m³, según su portal web.

1.2 Tecnosoles

Según el World Reference Base for Soil Resources (WRB) del 2015, los Tecnosoles son suelos compuestos de materiales extraídos o modificados por el hombre que se componen de una geomembrana, roca dura técnica o materiales orgánicos e inorgánicos, estos materiales son denominados artefactos (>30% del total de elementos). Los artefactos pueden tener origen en desechos urbanos, rellenos, lodos, escorias, escombros, desechos de minería, cenizas, pavimentos con su estructura no consolidada, suelos con geomembranas e incluso los suelos construidos con materiales elaborados por el hombre (WRB, 2007). La fabricación de Tecnosoles con los artefactos mencionados son de utilidad en la sustitución de suelos naturales, degradados y/o contaminados, esto le entrega un valor útil a recursos que hoy no tienen un nuevo uso (Bolaños y Verde, [s.a]), con la finalidad de mejorar el estado del suelo.

El uso de los Tecnosoles con fines de rehabilitación ambiental, permiten mejorar la calidad de suelos y/o sitios contaminados o degradados, ya que sus capacidades fisicoquímicas que potencian el desarrollo de la biomasa permiten el reciclaje de elementos necesarios para los ecosistemas, que por consecuencia permite un aumento en la actividad biológica, que finalmente se reflejar en mayor retención de agua y otros elementos en sectores que anteriormente no había vegetación (Bolaño, 2015). Estas medidas ayudarán a combatir el cambio climático, reducir la erosión de los sectores afectados y favorecer el aprovechamiento de elementos de los artefactos gracias a la valorización de los residuos.

1.3 Antecedentes de *Baccharis linearis*

Baccharis linearis (Ruiz et Pav.) Pers. O Romerillo es un arbusto nativo, perteneciente a la familia Asteráceas (Compositae), es un arbusto dioico de 0,5 a 1,5 m de altura, visiblemente con abundantes ramas y hojas de 1 a 2 cm de largo, agudas con distribución alternas, coriáceas y brillosas. Produce flores de color crema, flores masculinas con corola tubulosa y flores femeninas de corola filiforme más corta que el estilo. Frutos aquenios cilíndricos de color pardo claro con vilano blanco. Su presencia de flores es en verano y se reconoce principalmente por su aspecto de “pincel” de los frutos maduros.

Su presencia está frecuentemente ligada a la cordillera Patagónica de Argentina como también en terrenos arenosos entre la región de Atacama y Los Lagos, encontrándose en comunidades entre los 1000 y 2200 msnm (Donoso y Larisa, 2007), por su característica de colonizadora espontánea dominante repuebla sitios afectados por acción antrópica, tales como terrenos degradados, bordes de caminos, planicies asoleadas y suele estar presente en situaciones de post-cultivo. Además, *B. linearis* posee la facultad de ser nodriza facilitando la sucesión entre las especies del bosque esclerófilo (Ginocchio y León-Lobos, 2011; Riedemann y Aldunate, 2001), siendo una especie altamente relevante para lo que significa la restauración de ecosistemas.

B. linearis tiene una buena producción de frutos y semillas por lo que se resiembraba con frecuencia y suele colonizar terrenos abandonados por agricultores o sobre pastoreo. *B. linearis* también se puede implementar en jardines de secano, además es utilizado como primera protección contra el viento y sus cenizas son ocupadas en la medicina alternativa contra el reumatismo (Riedemann y Aldunate, 2001). Otra característica de *B. linearis* es que es metalófito, es decir que tiene la capacidad de almacenar cobre en su sistema radicular siendo ideal para la fitoestabilización de relaves mineros, en el caso de este estudio, es idónea para relaves de producción de cobre (Ginocchio y León-Lobos, 2011; Acevedo, 2018), la fitoestabilización se ha realizado en zonas del centro de Chile, en suelos áridos, pobres de nutrientes y con contenido de cobre en el suelo, en donde se puede apreciar la estabilización natural de romerillo y otras especies colonizadoras.

1.4 Economía circular

La Economía circular (EC) pretende generar un cambio en el sistema actual, buscando una economía eficiente en el uso de recursos con tal de impulsar el mercado a nuevas oportunidades en el desarrollo e innovación de nuevos nichos, que por consecuencia garantiza la seguridad de los suministros de los recursos esenciales, lucha contra el cambio climático y limita los impactos medioambientales, por lo que podemos concluir que la economía circular es la intersección de los aspectos ambientales, económicos y el bienestar social (Burgos, 2018). La EC pretende amoldar el sistema actual utilizando un modelo cíclico, el que se dedica a extraer, transformar, distribuir, usar y recuperar elementos que pueden ser reincorporados a los ciclos biológicos o a los ciclos técnicos para el desarrollo de productos industriales (Sandoval, 2017).

El término EC comienza a surgir en el año 1987 en Brundtland, luego que en un reporte de la Comisión Mundial del Desarrollo y Medio Ambiente se le denominase como “*Economía sustentable*”. En donde describen aquel presente y sus proyecciones económicas evidenciando la poca visión a futuro del desarrollo económico y medioambiental en los distintos continentes. En el capítulo “una economía mundial sustentable” habla que Latinoamérica estaba bajo una gran deuda internacional, donde distintos países con gran cantidad de recursos naturales buscaron financiamiento internacional para el desarrollo industrial y lograr la explotación de estos. Por lo cual, en

tales condiciones se les recomienda en el reporte escrito por Osvaldo Sunkel (1985), buscar un desarrollo sustentable, es decir, “...evitar acciones negativas contra el medio ambiente ante la necesidad económica...”, en donde también señala, a través de una carta, la necesidad de enfocarse en la expansión y desarrollo del medio ambiente, ya que éste es esencial para el desarrollo en la calidad de vida, en el empleo y la productividad de un país como los de Latinoamérica.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la germinación y la sobrevivencia de *Baccharis linearis* (Ruiz et Pav.) en distintos sustratos compuestos por diferentes porcentajes de pasivos ambientales para su uso en la rehabilitación ambiental de relaves mineros.

1.5.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la emergencia y sobrevivencia de los individuos de *B. linearis* en los distintos sustratos bajo condiciones de vivero.
- Evaluar el efecto del relave minero en el desarrollo de la especie *B. linearis* en los distintos sustratos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Área de estudio

El ensayo se realizó en el vivero Antumapu del Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza, de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, en donde se efectuó la instalación, la evaluación y el análisis de las muestras en las dependencias del Centro de Producción de Semillas y Árboles Forestales (CESAF).

2.1.2 Contenedores

Se prepararon 50 tubos de PVC tipo sanitario de 30 cm de largo por 11 cm de diámetro, equivalente a 330 cm³ en volumen. A estos contenedores se les instaló una sonda TDR (Decagon Devices Inc.) cada 3 días el contenido de agua volumétrico (θ cm³ cm⁻³) del sustrato. Finalmente, les cubrió la base con una malla porosa que permite el drenaje del agua excedente y contener el sustrato en el contenedor.

2.1.3 Preparación de sustrato

Se utilizó lodo estabilizado con baja humedad proveniente de la planta de tratamiento de aguas servidas del Rutil (km 59), de Aguas Andinas en la Comuna de Til, Región Metropolitana. El sedimento de embalse de riego agrícola, proveniente de la sección media no inundada del embalse Recoleta, ubicado en la Comuna de Ovalle en la Región de Coquimbo. Mientras que el relave minero, provino del depósito de relaves espesados de la Planta Delta de procesamiento de cobre de ENAMI, ubicada en la Comuna de Ovalle en la Región de Coquimbo.

Se realizaron mezclas de los PA disponibles para la preparación de los sustratos. Para fines prácticos, se utilizó el número de palas bajo las proporciones requeridas para cada mezcla, una mezcladora tipo betonera de volteo lateral con capacidad de 130 litros, sacos escombreros para almacenamiento y una carretilla para el transporte de estos últimos.

El sustrato se fabricó en 5 niveles con diferentes porcentajes de concentración entre lodo (L) y sedimento (S), con y sin aplicación de 200 g de relave (R).

Para obtener una mezcla homogénea se utilizó una betonera con tapa para evitar emanaciones y pérdida de material. Para asegurar una correcta mezcla, la mezcla se

realizó durante 5 minutos en la betonera. Cabe destacar que cada mezcla se realizó en su totalidad para las macetas y sus respectivas repeticiones. Finalmente, se obtuvo 10 tratamientos con 5 repeticiones cada uno, es decir, 50 unidades muestrales en total con mezclas de lodo, sedimento y relave (Cuadro 1).

Cuadro 1. Caracterización de tratamientos.

| Tratamiento | Composición |
|-------------|-----------------------------------|
| T1 | 100% Lodo |
| T2 | 75% Lodo – 25% Sedimento |
| T3 | 50% Lodo – 50% Sedimento |
| T4 | 25% Lodo – 75% Sedimento |
| T5 | 100% Sedimento |
| T6 | 100% Lodo + Relave |
| T7 | 75% Lodo – 25% Sedimento + Relave |
| T8 | 50% Lodo – 50% Sedimento + Relave |
| T9 | 25% Lodo – 75% Sedimento + Relave |
| T10 | 100% Sedimento + Relave |

Las propiedades físicas de los pasivos ambientales utilizados como materias primas se muestran en el cuadro 2 y en el cuadro 3 se observan las propiedades químicas, estos datos fueron brindados por el proyecto de gestión de pasivos ambientales del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional. Entre las propiedades físicas, todos los PA se encuentran en dominio Franco arenoso (liviano), lo cual no debiera generar impedimentos al crecimiento de las raíces. En cuanto a la densidad aparente, tanto el sedimento de embalse como el relave tienen valores esperables para suelos minerales, mientras que el Lodo tiene valores menores a 1, típicos de suelos con alta acumulación de materia orgánica. En el cuadro 4 se muestran los metales encontrados en tres mezclas con distintas proporciones de lodo y sedimento de embalses de riego. En el cuadro 5 se presenta un análisis bacteriológico, evidenciando que tanto el lodo como sus mezclas no sobrepasan los valores indicados por el artículo 7 definido para lodos clase A por el decreto N°4 del reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.

Cuadro 2. Propiedades físicas de los materiales utilizados.

| Pasivo ambiental | Arena (%) | Limo (%) | Arcilla (%) | Textura | Densidad aparente (Db = g cm ⁻³) | Conductividad hidráulica saturada (Ksat= cm h ⁻¹) |
|------------------|-----------|----------|-------------|---------|--|---|
| Lodo | 72,3 | 18,22 | 9,49 | Fa | 0,69 | 0,89 |
| Sedimento | 81,97 | 8,7 | 9,32 | af/Fa | 1,39 | 4,88 |
| Relave | 64,12 | 21,6 | 14,3 | Fa | 1,48 | 4,14 |

Cuadro 3. Propiedades químicas de los materiales utilizados.

| Pasivo ambiental | pH | CE (dS m-1) | MO (%) | CIC (cmol kg-1) | N | P | K | Ca | Mg | Na (ppm) | Fe | Mn | Zn | B | Cu |
|------------------|-----|-------------|--------|-----------------|------|-----|-----|------|------|----------|------|------|-----|------|------|
| Lodo | 6 | 18,1 | 13,8 | 40,6 | 1848 | 631 | 751 | 30,9 | 7,1 | 1,5 | 167 | 30,6 | 217 | 29 | 120 |
| Sedimento | 8 | 4,1 | 0,56 | 11,4 | 28 | 9 | 67 | 9,1 | 1,2 | 0,81 | 22,3 | 11,7 | 1,5 | 1,8 | 1,5 |
| Relave | 8,6 | 2,2 | 0,76 | 3,5 | 20 | 4 | 103 | 2,5 | 0,29 | 0,38 | 15,8 | 6,9 | 6,9 | 0,91 | 16,8 |

CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica; N: Nitrógeno; P: Fósforo; K: Potasio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; Na: Sodio; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; Fe: Hierro; Mn: Manganeseo; Zn: Cinc; B: Boro y Cu: Cobre.

Cuadro 4. Metales encontrados en tres mezclas utilizadas. Donde S corresponde a sedimento, L es lodo y el número refiere al porcentaje de participación de la mezcla en base a masa seca.

| Mezclas | As | Cd | Cr | Cu | Fe | Mn | Hg | Mo | Ni | Pb | Se | Zn |
|---------|------|-------|------|-----|-------|-----|------|------|------|----|------|-----|
| 75S 25L | 0,58 | 0,01 | 97,5 | 327 | 16189 | 575 | 0 | 0,03 | 11,6 | 22 | 0,02 | 393 |
| 50S 50L | 0,61 | 0,01 | 104 | 334 | 16057 | 500 | 0 | 0,02 | 12,5 | 22 | 0,02 | 418 |
| 25S 75L | 0,63 | 0,117 | 202 | 469 | 17010 | 450 | 0,38 | 7,75 | 18,9 | 36 | 0,02 | 577 |

As: Arsénico; Cd: Cadmio; Cr: Cromo; Cu: Cobre; Fe: Hierro; Mn: Manganeseo; Fe: Hierro; Mn: Manganeseo; Hg: Mercurio; Mo: Molibdeno; Ni: Niquel; Pb: Plomo; Se: Selenio y Zn: Cinc.

Cuadro 5. Análisis bacteriológico de las 3 mezclas utilizadas y del Lodo sanitario, correspondiente a la materia fecal, bacterias de *Escherichia coli* y *Salmonella*.

| Mezclas | Fecal | Total | <i>E. Coli</i> | <i>Salmonella</i> |
|---------|-------|-------|----------------|-------------------|
| 75S+25L | <1.8 | <1.8 | <1.8 | Ausencia |
| 50S+50L | <1.8 | <1.8 | <1.8 | Ausencia |
| 25S+75L | <1.8 | <1.8 | <1.8 | Ausencia |
| LODO | 23 | <1.8 | <1.8 | Ausencia |

2.1.4 Material vegetal

Se colectó semillas de *Baccharis linearis* (Ruiz et Pav.) en los sectores de Quebrada de la Plata en la comuna de Maipú, también en el Bosque Panul en la comuna de la Florida, en quebrada de Caiceo en el sector de las Cardas, región de Valparaíso y en el campus Antumapu perteneciente a la Universidad de Chile ubicado en la comuna de La Pintana. La selección de estas localidades fue en función a su distribución natural y estado silvestre de los individuos. La colecta fue realizada entre marzo-abril en el periodo de producción de semillas en el año 2019. De estas localidades se obtuvo semillas de 24 individuos en Quebrada de la plata, 23 individuos en el Bosque Panul, 12 en la quebrada de Caiceo y 5 en campus Antumapu. Estas semillas se trasportaron en bolsas de papel para ser almacenadas en refrigeradores a 5°C.

2.2 Método

El método consiste en seis etapas (Figura 1) dentro de los cuales está la obtención de semillas de *B. linearis*, confección de los contenedores, preparación del sustrato a base de pasivos ambientales y la realización de un ensayo de germinación. Posteriormente, se procedió a llenar los tubos de PVC de 110 mm de diámetro por 300 mm de largo con el sustrato. Posteriormente, se llevaron a saturación mediante inmersión con agua potable durante aproximadamente 6 horas, llenadas de tal forma que el agua ascendiera lentamente para evitar bolsas de aire, desde la base hasta la superficie de los contenedores. Luego de saturarlos los contenedores, se dejaron drenar a la sombra por una hora para posteriormente realizar la siembra. Se monitoreó la germinación, emergencia y sobrevivencia de los individuos cada tres días. El riego fue controlando según la humedad del sustrato de acuerdo con su contenido de humedad superficial y, finalmente, se obtuvo los datos para realizar su respectivo análisis (Fig. 1).

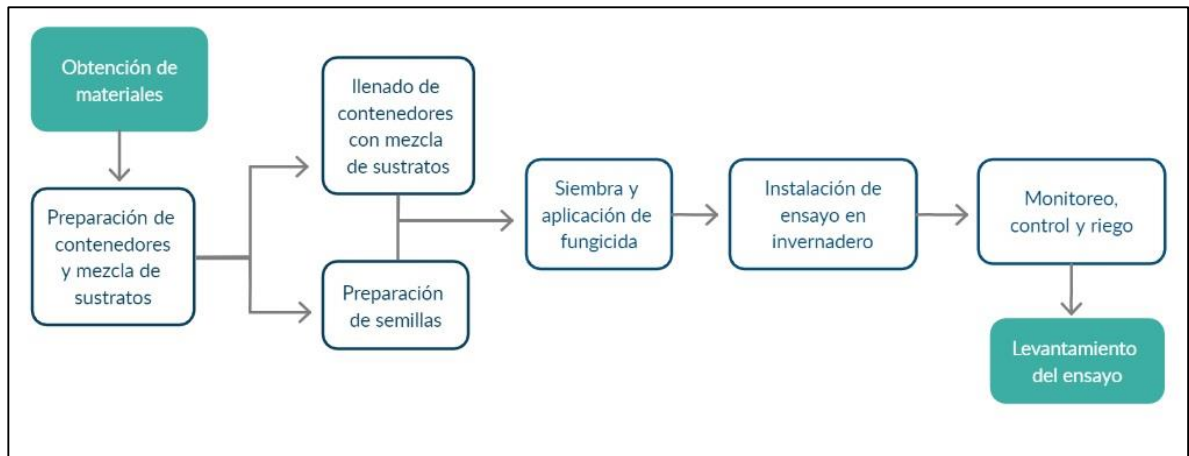


Figura 1. Diagrama global de las etapas del ensayo.

2.2.1 Ensayo de germinación de *Baccharis linearis* en condiciones controladas

Se seleccionaron 100 semillas al azar por repetición de las distintas procedencias, con un total de 3 repeticiones (total 300 semillas). Las semillas se depositaron entre dos papeles absorbentes, con distancia de 1 cm (aproximadamente) entre semillas, luego los papeles absorbentes con las semillas se almacenaron en contenedores de vidrio previamente esterilizados, el monitoreo y el riego fue diario, humectando con aspersor para mantener la humedad del papel al 100% evitando excedentes. Transcurrido siete días se contaron las semillas germinadas considerando semillas germinadas aquellas que presentaban una radícula de aproximadamente 2 mm.

2.2.2 Llenado de los contenedores con sustrato

Se realizó el llenado de los contenedores hasta el punto de dejar 2 cm de distancia entre el límite del contenedor y la superficie del sustrato, utilizando finalmente un volumen de 0,0027 m³ aproximadamente realizando movimientos de pequeña intensidad para compactar levemente el sustrato. Al tener todos los contenedores con dicho volumen se sumergieron en contenedores plásticos de 120 litros con agua para la saturación del sustrato a capacidad del contenedor (Villa, 2018).

2.2.3 Siembra

En este punto, se requirió la utilización de una pesa de precisión de 2 decimales para pesar 0,1 g de semillas, estimando un total de 330 semillas por contenedor, las cuales se sembraron de forma superficial cubiertas por una lámina de arena (2 mm) para evitar la desecación de las semillas.

La siembra se inició el primero de noviembre del 2020, por lo que se realizó un monitoreo semanal en donde se observó la germinación de las semillas, el efecto de los distintos sustratos en ellas y su posterior establecimiento.

2.2.4 Mantenimiento y monitoreo

Se realizó un monitorio de las macetas para controlar el contenido de humedad cada tres días, anterior y posterior de la siembra durante seis semanas. En donde se evaluó la retención de agua dentro de los 15 a 20 cm del contenedor, ya que esta área corresponde al agua disponible para las raíces. Respecto a la fase de germinación se determinó un umbral de riego del 40% por lo que se regó con 400 ml de agua cuando el contenido de humedad era menor al umbral.

Cuadro 6. Volumen para regar y frecuencia calculada por tratamiento

| Tratamiento | Vol. riego cm ³ /cm ³ | Frecuencia riego estimada (40%UR) días |
|-------------------------|---|--|
| 100% Lodo | 296,00 | 1,80 |
| 75% Lodo; 25% Sedimento | 303,14 | 1,85 |
| 50% Lodo; 50% Sedimento | 337,23 | 2,06 |
| 25% Lodo; 75% Sedimento | 569,13 | 3,47 |
| 100% Sedimento | 516,57 | 3,15 |

2.2.5 Levantamiento del ensayo

Se realizó el levantamiento del ensayo el 17 de diciembre del 2020 con el fin de analizar los datos obtenidos de germinación y sobrevivencia relacionado con los individuos sembrados, posteriormente se obtuvo las variables del sustrato respecto al balance hídrico, contenido de agua en los contenedores, conductividad hidráulica, capacidad de agua por contenedor y punto de marchitez permanente para cada sustrato.

2.2.6 Análisis de los datos

Se un análisis de varianzas (ANDEVA), para lo cual, se comprobó los supuestos de a) Homogeneidad de las varianzas y b) Normalidad de los residuos, para esto se utilizó la prueba de Levene y Shapiro Wilks respectivamente.

Una vez obtenido los datos paramétricos, se utilizó análisis de varianza de dos vías para evaluar el efecto de los factores y su interacción. El diseño para implementar fue factorial de dos factores, donde el primer factor fue la mezcla (proporción de sedimento de embalse y lodo, con cinco niveles) y el segundo fue con y sin aplicación relave. El nivel de confianza fue de $\alpha = 0,05$. Se utilizó el software InfoStat (Di Rienzo et al. 2011) para todos los análisis de datos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Germinación

A partir de los datos obtenidos en los primeros 10 días de siembra se generó la Figura 2, en donde se aprecia la media de germinación por tratamiento realizado en el ensayo. El promedio de germinación de *B. linearis* en condiciones de laboratorio fue de un 14% probablemente debido al prolongado tiempo transcurrido (19 meses) desde la colecta hasta el montaje del ensayo.

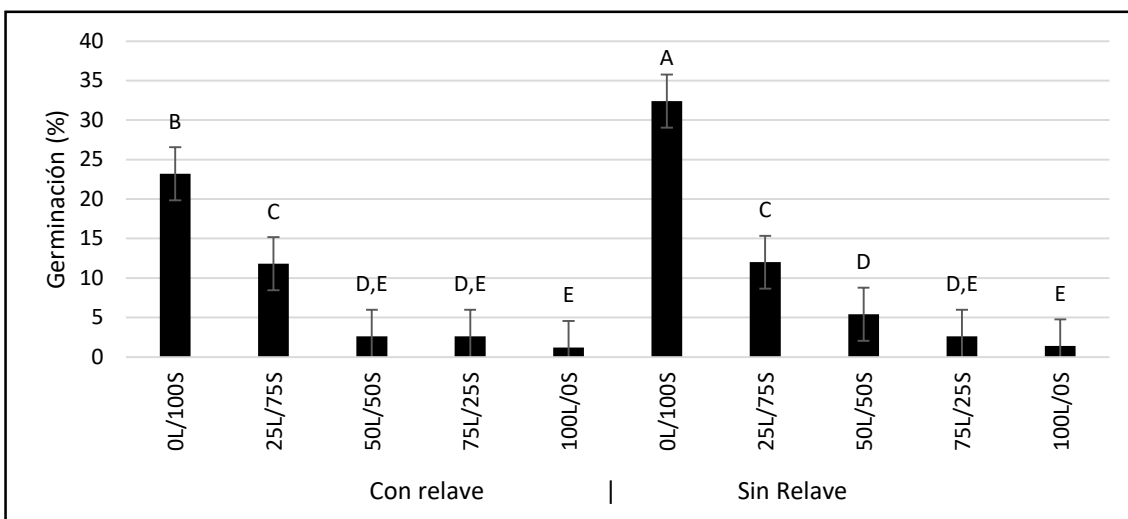


Figura 2. Promedios germinativos de los distintos porcentajes de Lodo/Sedimento y tratamiento de adición de relave. S= sedimento, L= lodo.

Los resultados obtenidos demostraron que el sustrato con mejores resultados fue el de 0% lodo/100% sedimento sin relave, en segundo lugar, corresponde al mismo tratamiento, pero con la adición de relave y en tercer lugar se encuentran los resultados de 25% lodo/75% sedimento con y sin la adición de relave con resultados similares. Los resultados más bajos se obtuvieron en las muestras 100% Lodo/0% Sedimento con y sin relave, también se puede observar en la Figura 2 que la disminución de la germinación por efecto del relave es significativa, en donde la germinación sin relave es mayor que la germinación con relave por tratamiento, pero el verdadero efecto en la reducción de ésta es debido principalmente por el aumento en el porcentaje de lodo en los tratamientos.

Según un estudio realizado por Fredes y Doll (2007) sobre tratamientos pregerminativos en especies nativas de Chile se logró obtener en *B. linearis* un 91% de germinación con tratamientos con agua caliente, un 46% con un tratamiento estratificado de temperatura y un 26% con agua fría, por lo que se recomienda utilizar estos métodos para aumentar la probabilidad de germinación en terreno.

La baja germinación se puede explicar por la retención de agua que presentan los sustratos a medida que aumenta el porcentaje de lodo (Figuras 9 y 10), debido a que *B. linearis* es una especie de zonas xerofíticas, es decir, con baja disponibilidad de agua al año. Además, esta especie tiene un carácter de colonizadora debido a su adaptación y relación con los microorganismos (bacterias, líquenes y micorrizas) por lo que puede establecerse en zonas con un bajo contenido nutricional (Gazitua, 2013; Gazitúa *et al*, 2021), por lo que la alta presencia de nutrientes disueltos en el agua y la alta conductividad eléctrica por parte del lodo en el sustrato podría afectar la germinación de la especie.

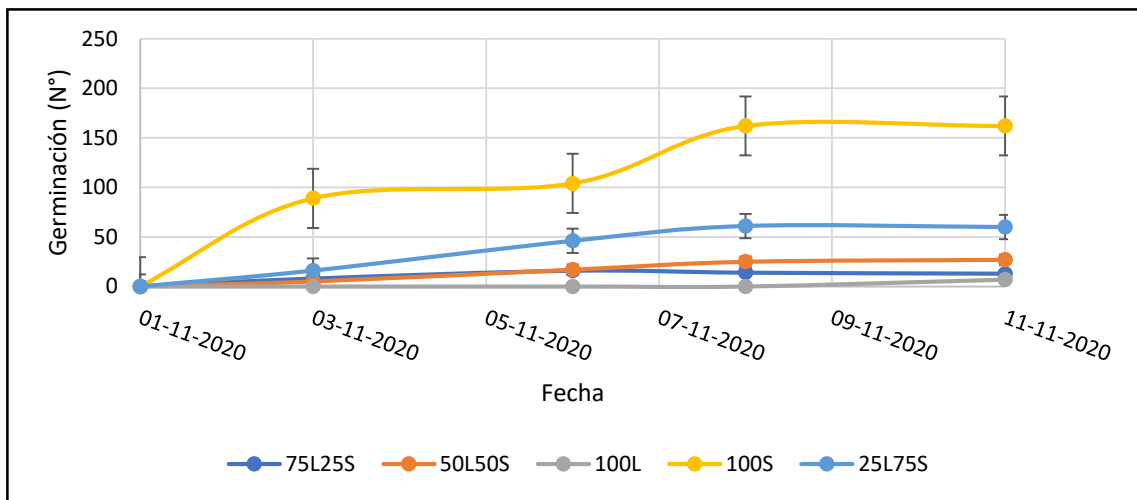


Figura 3. Temporalidad de germinación de *B. linearis* en distintos sustratos. S= sedimento, L= lodo.

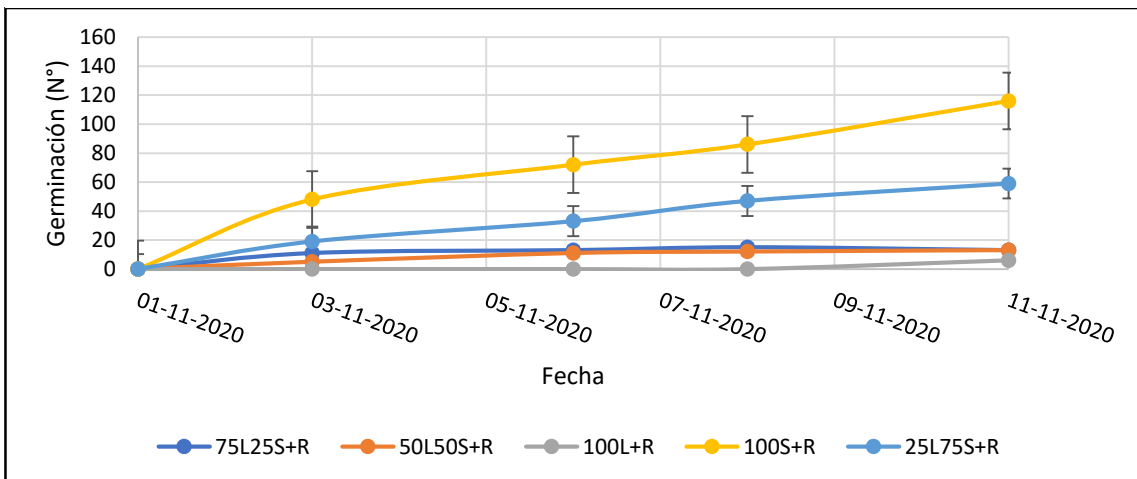


Figura 4. Temporalidad de germinación de *B. linearis* en distintos sustratos con adición de relave. S= sedimento, L= lodo, R= relave.

Luego de tres días de realizar la siembra de *B. linearis* se logra observar (Figura 3) la cantidad de semillas germinadas en los ensayos de 75L/25S, 50L/50S, 100S y 25L/75S, en donde los ensayos con mayor cantidad de semillas germinadas es 25L/75S y 100S, esta tendencia se mantiene hasta los 10 días del proceso de germinación. El ensayo de 100L no presentó semillas germinadas hasta el último día de evaluación.

Se puede observar (Figura 3) que la cantidad de semillas germinadas entre los ensayos de 100S y 25L/75S es de 89 y 16 individuos para los tres primeros días, en cuanto al día diez la diferencia es de 162 y 60 individuos respectivamente.

Para los ensayos con adición de relave se observa (figura 4) semillas germinadas de *B. linearis* para los ensayos de 75L/25S+R, 50L/50S+R, 100S+R y 25L/75S+R, de los cuales los ensayos de 100S+R y 25L/75S+R presentan la mayor cantidad de individuos germinados. Al igual que en la línea de ensayos sin relave, el ensayo de 100L+R no tuvo germinación hasta el día diez.

En este caso (Figura 4) la diferencia entre los ensayos con mayor germinación es de 48 y 19 para los tres días y 116 y 59 para el día diez de evaluación, correspondiente a los ensayos de 100S+R y 25L/75S+R.

3.2 Sobrevivencia.

Al levantar el ensayo después de 5 semanas después de su germinación se observa claramente una tendencia por parte de la especie *B. linearis* respecto al sustrato en cual se desarrolla, esto ayudó a la construcción de la Figura 5 para su análisis.

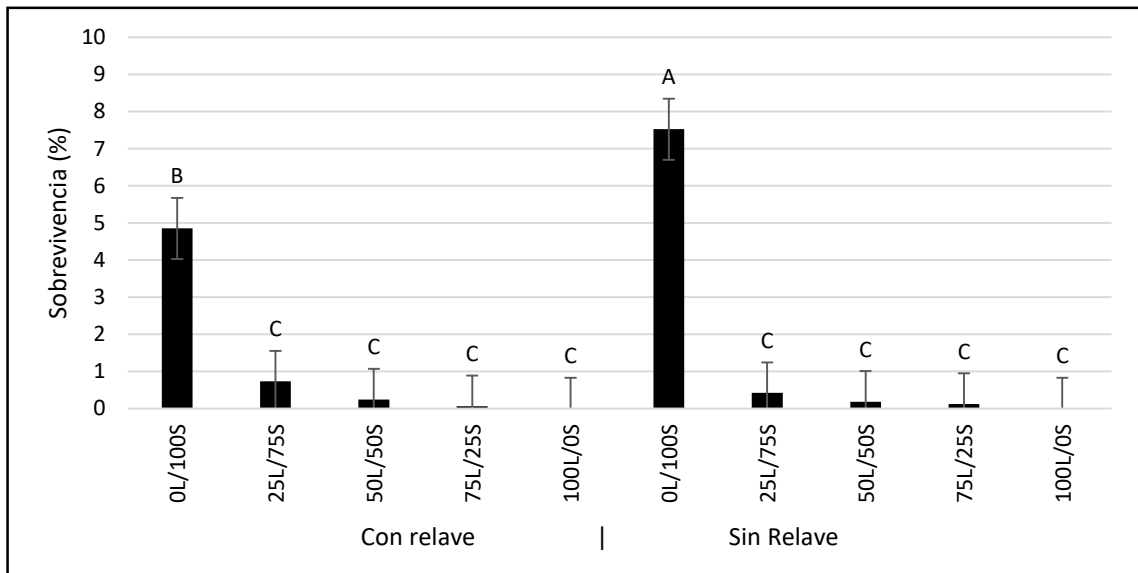


Figura 5. Porcentaje de sobrevivencia final de los individuos de *B. linearis* en ensayos con distintas proporciones de L= lodo y S= sedimento, separados en ensayos con y sin relave.

Con una sobrevivencia final de 233 individuos, se puede apreciar en la Figura 5 que el efecto de la adición de relave no tiene un efecto significativo en la sobrevivencia de los individuos, esto se ve reflejado en la distribución natural de *B. linearis* al considerarse una colonizadora espontanea de relaves mineros (León-lobos *et al*, 2011). Por otro lado, se aprecia que la mayor cantidad de individuos sobrevivientes corresponden al tratamiento de 0% Lodo/ 100% sedimento con y sin relave, obteniendo en el tratamiento sin relave mejores resultados. En el caso de los demás tratamientos, llegan a presentar un máximo de 0,7% de sobrevivencia equivalente a dos individuos, hasta un mínimo de 0%. Se logra observar una disminución en la sobrevivencia de *B. linearis* al aumentar el porcentaje de lodo en el sustrato.

La respuesta de *B. linearis* al aumento de Lodo en los distintos tratamientos se puede explicar por el alto valor de la conductividad eléctrica y la cantidad de nitrógeno que aporta este elemento (ver Cuadro 3) en donde los valores de este componente esta dentro de los rangos que limitan la absorción de nutrientes y, por ende, el crecimiento de las plantas (Gazitua *et al*, 2021). Otro de los factores que es necesario mencionar es la conductividad hidráulica (Figuras 9 y 10) que disminuye al aumentar el porcentaje de lodo en el sustrato. Lo anterior disminuye la capacidad de drenar del sustrato, lo cual puede permitir el crecimiento de cianobacterias a largo plazo favoreciendo la llegada de poblaciones de bacterias, fúngicas, líquenes y musgos, los que conformarían un ensamble denominado costra biológica que facilita el establecimiento de macroindividuos (plantas) permitiendo mejorar la estructura del suelo, reducir la erosión y aumentar la retención de humedad en relaves longevos (Gazitua, 2013). En el caso del ensayo, estas estructuras aún no están formadas por lo que el primer factor mencionado es limitante para la sobrevivencia de la especie.

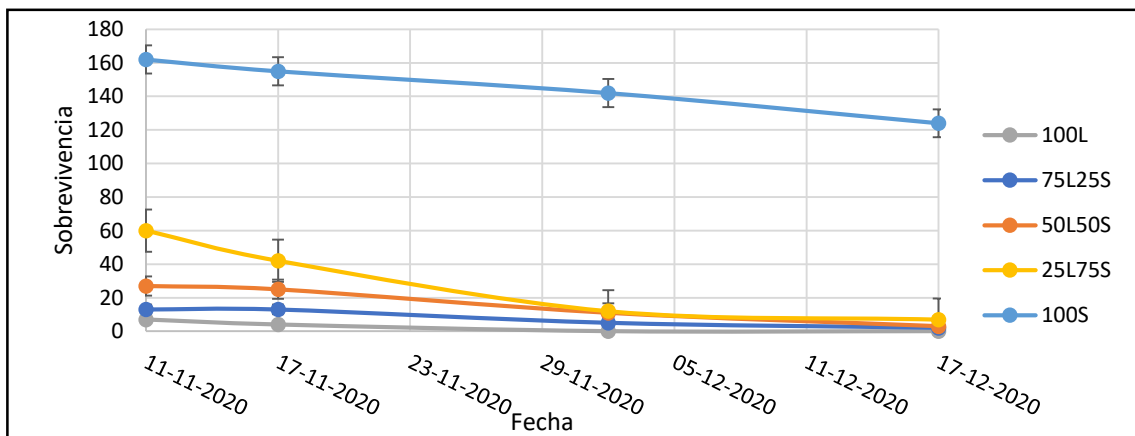


Figura 6. Temporalidad de la sobrevivencia de *B. linearis* en distintos sustratos compuestos por L= lodo y S= sedimento.

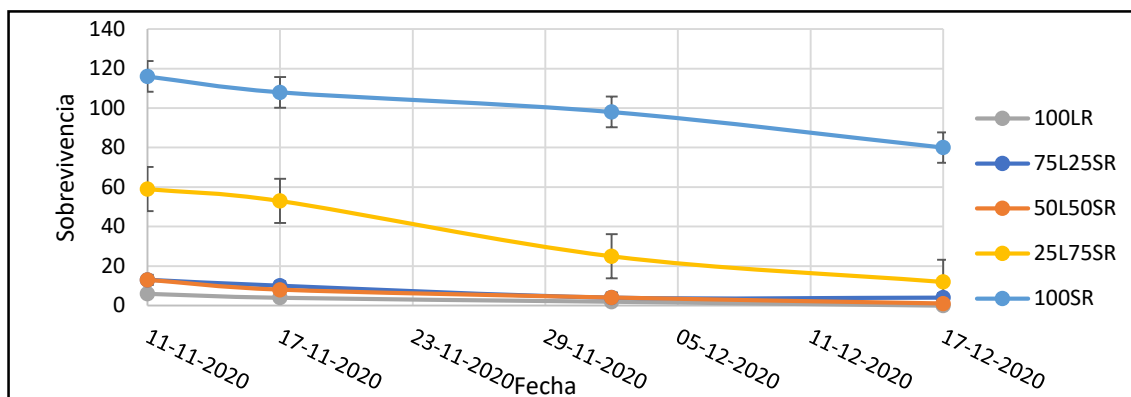


Figura 7. Temporalidad de la sobrevivencia de *B. linearis* en distintos sustratos compuestos por L= lodo, S= sedimento y R= relave.

El periodo de sobrevivencia se evaluó durante cuatro semanas como se observa en la Figura 6 para los ensayos sin relave y la Figura 7 para los ensayos con relave. Con la información recopilada se construyó finalmente el cuadro 7, en donde se observa que la mortalidad disminuye de acuerdo aumenta el porcentaje de sedimento en el sustrato y disminuye la proporción de lodo en la mezcla.

Cuadro 7. Porcentaje de mortalidad por ensayo durante la evaluación de la sobrevivencia.

| Tratamiento | Ensayo | Sobrevivencia (%) | Mortalidad (%) |
|-------------|----------|-------------------|----------------|
| T1 | 100L | 0 | 100 |
| T2 | 75L25S | 15,4 | 84,6 |
| T3 | 50L50S | 11,1 | 88,9 |
| T4 | 25L75S | 11,7 | 88,3 |
| T5 | 100S | 76,5 | 23,5 |
| T6 | 100L+R | 0 | 100 |
| T7 | 75L25S+R | 30,8 | 69,2 |
| T8 | 50L50S+R | 7,7 | 92,3 |
| T9 | 25L75S+R | 20,3 | 79,7 |
| T10 | 100S+R | 69 | 31 |

En el cuadro 7 se observa que los mejores resultados los obtuvo los tratamientos T5 y T10, correspondientes a los ensayos con 100% Sedimentos sin relave y con relave, en donde se obtuvo un 76,5% y 69% de sobrevivencia respectivamente. El tratamiento con mejores resultados que sigue a los mencionados es el tratamiento T7 correspondiente al ensayo 75% lodo y 25% sedimento con adición de relave obteniéndose un 30,8% de sobrevivencia. También, hay que mencionar que la menor sobrevivencia se obtuvo en los tratamientos T1 y T6 correspondientes a los ensayos 100% Lodo sin relave y con relave respectivamente en donde se produjo un 0% de sobrevivencia de los individuos. Seguido por el tratamiento T8 correspondiente al tratamiento 50% Lodo y 50% Sedimento con adición de relave con un 7,7% de sobrevivencia de los individuos.

3.3 Contenido de humedad

Se midió el contenido de humedad de los ensayos en lapsos de tres días, considerando importante la obtención de los datos antes y después del riego en los diferentes ensayos, con el fin de analizar el comportamiento de las distintas proporciones entre lodo y sedimento respecto a la capacidad de retención y drenaje de agua.

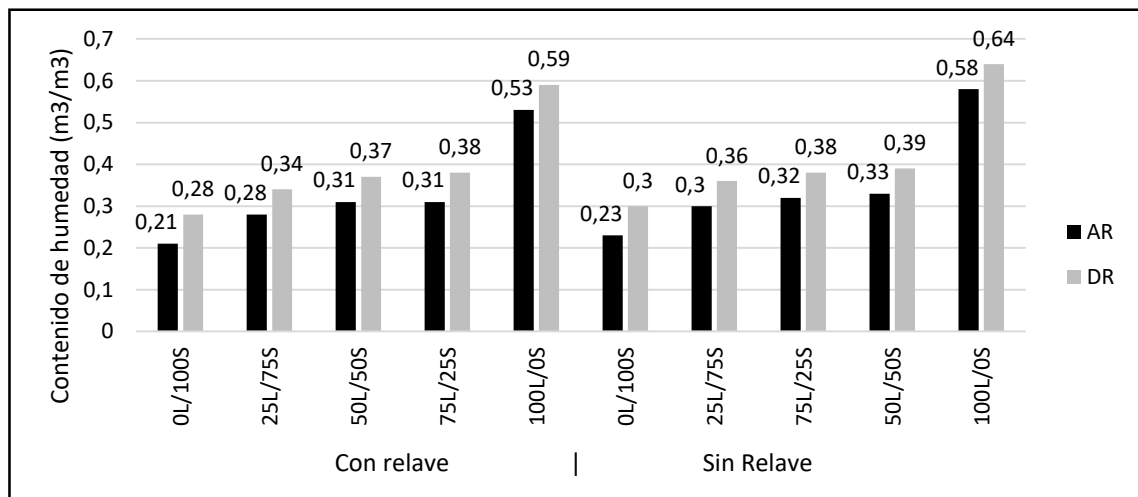


Figura 8. Contenido de humedad promedio de los ensayos realizados con *B. linearis*, separados por proporción de L = lodo y S = sedimento, y por tratamiento con y sin relave. AR = Antes del riego y DR = Después del riego.

En la Figura 8 se puede apreciar cómo se comporta el agua en los distintos sustratos, teniendo un drenaje de 0,06-0,07 m³/m³ cada tres días en todos los ensayos, también se observa que en los ensayos sin relaves la retención es levemente mayor que los respectivos ensayos con relave, por lo que pareciera que el Relave afecta la retención de agua en el sustrato.

Por otro lado, en la Figura 8 se obtuvo mayor retención de agua en sustratos con mayor contenido de lodo, por ende, en el ensayo 100% lodo con relave se obtuvo una retención de agua de 0,53 m³/m³ antes del riego y 0,58 m³/m³ después del riego, en el caso del ensayo sin relave se obtuvo 0,58 m³/m³ antes del riego y 0,64 después del riego, siendo estos los valores máximos. En el caso del ensayo 100% sedimento se obtuvo como resultado 0,21 m³/m³ y 0,28 m³/m³ para los ensayos con relave y 0,23 m³/m³ y 0,3 m³/m³ para los ensayos sin relave, antes y después del riego respectivamente, para los casos de retención mínima de agua en los ensayos.

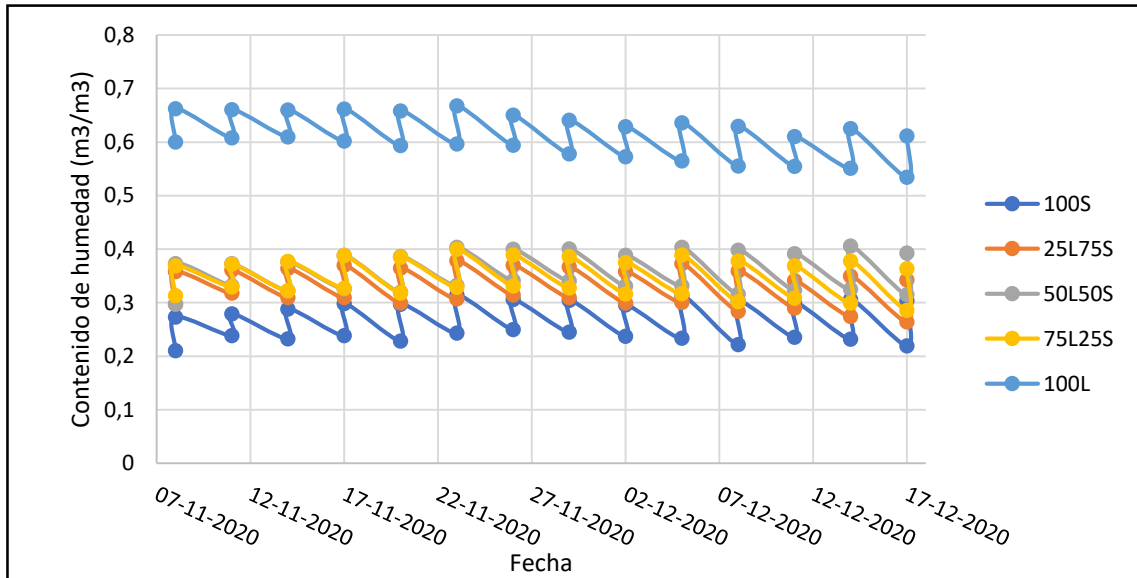


Figura 9. Temporalidad del contenido de humedad en los distintos sustratos compuestos por L= lodo y S= sedimento.

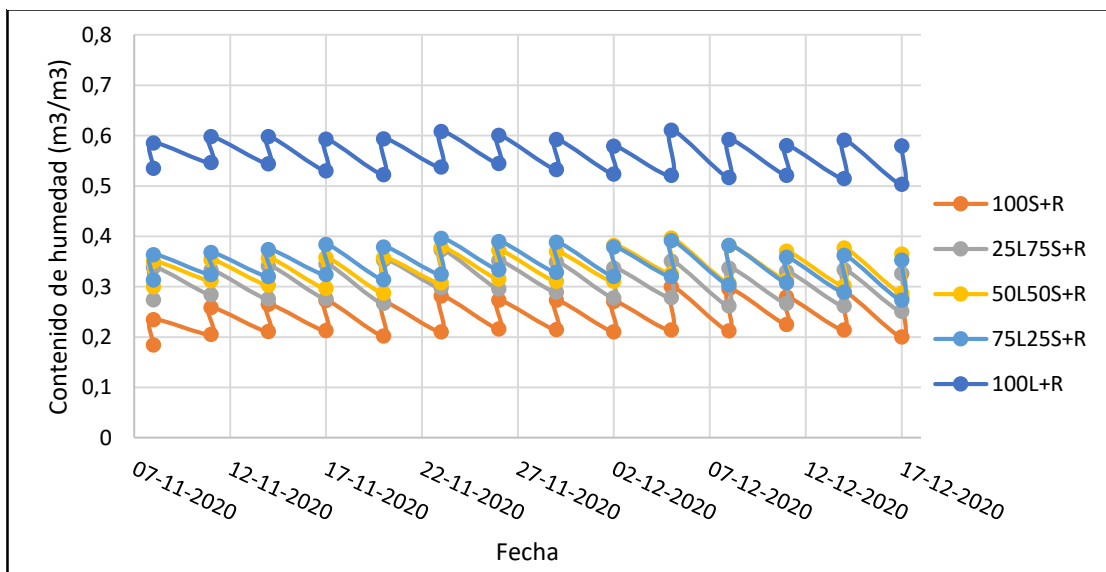


Figura 10. Temporalidad del contenido de humedad en distintos sustratos compuestos por L= lodo, S= sedimento y R= relave.

Se observa en la Figuras 9 y 10 que el contenido de humedad se mantuvo constante, sin pérdidas de agua o disminución significativa de humedad en los sustratos referentes a los ensayos sin relave y con relave respectivamente.

4. CONCLUSIONES

Después de contabilizar la germinación y sobrevivencia en los ensayos con distintos sustratos se obtuvo la mayor cantidad de individuos vivos en la mezcla de 100S/0L sin relave, seguido por el ensayo de 100S/0L con relave con un 7,5% y un 4,8% de individuos vivos respectivamente, considerando un promedio de 25 individuos finales por 0,1g de semillas.

La adición de relave en los tratamientos fue significativa en el caso de la germinación debido a la composición química del lodo y no fue significativa en el caso de la sobrevivencia debido a que *B. linearis* crece y se desarrolla naturalmente en relaves mineros.

De acuerdo con el comportamiento de los sustratos y sus diferentes porcentajes entre lodo, sedimentos y la adición de relave se puede concluir que al aumentar el porcentaje de lodo en el sustrato este retiene mayor cantidad de agua y al adicionar relave a la mezcla este se diluye y dificulta la capacidad de retención de agua del lodo.

La disposición adecuada de realizar la aplicación en terreno es la de generar capas del sustrato seleccionado sobre el relave, debido que se obtuvo mayor cantidad de semillas germinadas en los ensayos sin relave, por ende, no se recomienda una mezcla de estos componentes para su aplicación en terreno en el caso de realizar siembra. En el caso de realizar plantaciones de *B. linearis* se puede efectuar la mezcla de los componentes, pero se recomienda realizar mas estudios para asegurar el éxito de establecimiento de los individuos, ya que este método requiere una mayor inversión económica.

La utilización de los porcentajes 50/50 y 75/25 de Lodo/Sedimento no se recomiendan para el desarrollo de esta especie, ya que la germinación y sobrevivencia son especialmente bajas. Respecto a la mezcla de 100L/0S se concluye como el ensayo que tiene menor afinidad respecto a la germinación y la sobrevivencia de los individuos de *Baccharis linearis*, pero se recomienda realizar pruebas con especies con mayor afinidad con; altas cantidades de nitrógeno y capaz de establecerse en suelos con gran capacidad de retener humedad.

Las semillas de *Baccharis linearis* utilizadas en este ensayo presentaron una baja germinación en comparación a estudios previamente hechos, teniendo un 14% contra un 26% reportado en otros ensayos, esto se debe al tiempo de almacenamiento de las semillas y la calidad de las plantas de las cuales se obtuvieron, se recomienda realizar otros tratamientos y asegurar el estudio con una buena calidad de semillas cosechadas el mismo año del ensayo.

5. BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, V. 2018. Propuesta de fitoestabilización del tranque de relaves de la minera los maitenes en la comuna de Puchuncavi. Universidad Técnica Federico Santa María. Viña del Mar. Chile. 39 p.

AGUAS ANDINAS. 2019. Reporte integrado. Santiago. 322 p

ASTABURUAGA G., R. 2004. El agua en las zonas áridas de Chile. ARQ. Santiago. N°57, pp.68-73. [en línea] <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962004005700018&lng=es&nrm=iso>. [Consultado: 05-02-2021]

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE (BCN). 2012. Pasivos Ambientales Mineros en Chile. Santiago.18 p.

BOLAÑO G., D. 2015. Aplicación de Tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectados por actividades de obras civiles, urbanas y minería. España, Santiago de Compostela, Facultad de Biología. 8 p.

BOLAÑOS G., D., VERDE V., R. y MACIAS G., F. [s.a]. Diseño y empleo de tecnosoles "a la carta" para la recuperación de la calidad del agua. At Lisboa, Portugal. 12° Congreso da Agua y 16° Encuentro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENASB). 6 p.

BURGOS C., J.P., 2018. Plan de negocios para emprendimiento basado en economía circular. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 7 p.

CASTRO, C.P., HENRÍQUEZ, O. y FRERES, R. 2007. Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Revista de geografía Norte Grande*, (37) 35-45 p.

CHILE. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 2009. Decreto 4: Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.

CHILE. Ministerio de Salud. 2004. Decreto 148: Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.

CHILE. Ministerio de minería. 2011. Ley 20551: Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras.

CHILE. Ministerio de minería. 2012. Decreto 41: Aprueba reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras.

CHILE. Ministerio de minería. 2007. Decreto Supremo 248: Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves.

CUEVAS, J., SEGUEL, O., ELLIES, A., y DÖRNER, J. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de

lodos urbanos. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. vol.6, n.2 pp.1-12. [En línea] <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912006000200001&lng=es&nrm=iso>. [Consultado: 02-05-2021]

Di Castri, F. y Hajek, E. R. 1976. Bioclimatología de Chile.

DI RIENZO JA, CASANOVES F, BALZARINI MG, GONZALEZ L, TABLADA M, ROBLEDO CW. 2011. Infostat. Versión 2020.

DONOSO G., L. 2007. Propuesta de Intervención Silvícola con fines de Conservación para la Formación Boscosa de *Nothofagus macrocarpa*. 20-36 p.

DONOSO C., S., PEÑA R., K., GALDAMES P., E., PACHECO F., C., DURÁN A., S., y GANGAS F., R. 2016. Evaluación de la aplicación de biosólidos en plantaciones de *Eucalyptus globulus*, en Chile central. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, vol. 48, no 2, p. 107-119., 48(2).

ESPINACE, R., PALMA, J., VALENZUELA, P., JARAMILLO, I., MIRANDA, A., SALINAS, R., y BIALOSTOKI, J. 2006. Evaluación del efecto eólico en tranques de relave. En XVIII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG). Universidad Nacional de San Juan, Facultades de Ingeniería y de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. San Juan, Argentina. pp. 25.

FERNÁNDEZ A, S. I. 2015. Tratamiento y disposición de aguas residuales en plantas de tratamientos de agua potable en Chile.

FLORES M, C. 2010. Análisis del manejo operacional para escenarios críticos del embalse la paloma. Tesis Doctoral. Universidad de la Serena.

FREDES V., M. y DOLL, Ú. 2007. Efectos de distintos tratamientos pregerminativo sobre la germinación de las especies: *Baccharis linearis* (R. et P.), *Proustia cuneifolia* (D. Don) y *Trevoa quinquenervia* (Gill. et Hook.) Johnst. Tesis Doctoral. Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingeniería Forestal.

FUENTES N., A. P. 2018. Evaluación de alternativas de reducción del volumen para almacenamiento de sedimentos aportantes a embalses de riego mayores. Aplicación a un caso en Chile. pp. 92.

FUNDACIÓN CHILE. 2018. Avances y retos para la gestión de los depósitos de relaves en Chile. Programa Tranque. 16 p.

GAZITUA-ZAVALA, M. C. 2013. Participación de la comunidad microbiana rizosférica en el crecimiento de *Baccharis linearis* sobre relaves de cobre. Pontificia Universidad Católica de Chile.

GAZITÚA, M. C., MORGANTE, V., POUPIN, M. J., LEDGER, T., RODRÍGUEZ-VALDECANTOS, G., HERRERA, C., GONZÁLEZ-CHÁVEZ M. C., GINOCCHIO R. Y GONZÁLEZ, B. 2021. The microbial community from the early-plant colonizer

(*Baccharis linearis*) is required for plant establishment on copper mine tailings. *Scientific reports*, 11(1), 1-16.

GINOCCHIO, R. BROWN, S. y SANTIBAÑEZ, C. 2011. Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile Guía N° 2: Aplicación Sustentable de Acondicionadores. Centro de Investigaciones Minera y Metalúrgica, CIMM. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Chile.

GINOCCHIO, R., DE LA FUENTE, L. M., ORREGO, F., DÍAZ, M. J., BÁEZ, J., y OVALLE, J. F. 2021. A novel fast-vegetative propagation technique of the pioneer shrub *Baccharis linearis* on mine tailings by adding compost. *International Journal of Phytoremediation*, 1-9. [En Línea] < <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1882383> >

GIL-LOAIZA, J., FIELD, J. P., WHITE, S. A., CSAVINA, J., FELIX, O., BETTERTON, E. A., SAEZ, A. E. y MAIER, R. M. 2018. Phytoremediation reduces dust emissions from metal(loid)-contaminated mine tailings. *Environ Sci Technol.* 52(10), 5851-5858 [En Línea] <10.1021/acs.est.7b05730> [Fecha de consulta: 21 de julio 2021]

IUSS Working Group WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, primera actualización 2007. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO, Rome.

IUSS WORKING GROUP WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, actualizado en 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*, 177p.

LEÓN-LOBOS, P., GINOCCHIO, R. Y BAKER, A.J. 2011. Fitoestabilización de depósitos de relaves en Chile. Guía N°3: Flora y vegetación asociada a relaves mineros abandonados. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, CIMM. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Andros Impresores.

MONTES C, M. E. 2008 Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis Doctoral. Caminos.

MORENO, H. A., DROPELMANN, C. V., y VERDEJO, M. E. 2006. Evaluación de carbón activado producido a partir de lodo generado en una planta de tratamiento de aguas servidas. *Información tecnológica*, 17(3), 9-14p.

RÁMILA G., J. y ROJAS B., S. 2008. Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua. Seminario para optar al Título Ingeniero Comercial Mención Administración. Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

REYES M., M. 2011. Evaluación de la factibilidad técnica y económica de distintos tratamientos de biosólidos generados por la Empresa Agroindustrial Invertec S. A. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Agronómicas. [En línea] < <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112363> > [Fecha consulta: 10 de julio 2021]

RIEDEMANN, P. y ALDUNATE, G. 2001. Flora Nativa de Valor Ornamental Zona Centro de Chile. Editorial Andrés Bello, Chile. p. 186-187 p.

ROMERO, A. y FLORES, L. 2010. Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial data*, vol. 13, no 2, p. 75-82.

RUSSI, D. y MARTÍNEZ, A. 2003. Los pasivos ambientales. Íconos, Revista de Ciencias Sociales, N°15, p. 123-133.

SALINAS E. y HERNÁNDEZ L. 2014 Escenarios ambientales y sociales de la minería a cielo abierto. *Inventio*, la génesis de la cultura universitaria en Morelos, no 20, p. 27-34.

SANDOVAL, V., JACA, C., y ORMAZABAL, M. 2017. Economía circular. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, Universidad de Navarra, España. 85-95 p.

SANTIBÁÑEZ, C., FAUNDEZ, P., VERNERO, M. Y CONTRERAS, P. 2004. Actividad Microbiana en Suelos Forestales y Arenas de Relaves de un Tranques Forestado Acondicionados con Lodos Frescos y Comportados. *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*.

SMITH-RAMIREZ, C., PLISCOFF, P., TEILLER, S., y BARRERA, E. 2005. Patrones de riqueza y distribución de la flora vascular en la Cordillera de la Costa de Valdivia, Osorno y Llanquihue, Chile.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA (SERNAGEOMIN). 2018. Servicio Nacional Geología y Minería. Análisis de catastro de depósitos de relaves en Chile y guía de estructura de datos. Chile.

TIZNADO, JM. 2003. Lodos residuales como alternativa para la recuperación de suelos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, México.

WCED. 1987. "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Acronyms and Note on Terminology Chairman's Foreword,". Oxford University Press, Brundtland. EEUU. (Fragmento: www.un-documents.net/ocf-03.htm)