



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACION DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

EVALUACIÓN DE LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL
DE *Acacia caven* (Mol.) EN SUSTRATOS DISEÑADOS PARA LA
REHABILITACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES MINEROS

Memoria para optar a Título
Profesional de Ingeniero Forestal

VALENTINA FRANCISCA NAVARRO MIRANDA

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

Santiago, Chile

2020

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

EVALUACIÓN DE LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL
DE *Acacia caven* (Mol.) EN SUSTRATOS DISEÑADOS PARA LA
REHABILITACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES MINEROS

Memoria para optar a Título
Profesional de Ingeniero Forestal

VALENTINA FRANCISCA NAVARRO MIRANDA

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Eduardo Martínez Herrera	6,8
Prof. Consejero Sr. Carlos Magni Díaz	6,8
Prof. Consejero Sr. Juan Ovalle Ortega	6,7

AGRADECIMIENTOS

Para comenzar quiero agradecer a Eduardo Martínez, mi profesor guía principalmente por la paciencia y la confianza que sostuvo sobre mí para el desarrollo de la presente memoria, junto con esto quiero agradecerle por los conocimientos brindados y por el constante apoyo. También quiero agradecer a mis profesores consejeros, Carlos Magni quien estuvo presente a lo largo del desarrollo de la memoria, brindando sus conocimientos y realizando críticas constructivas, y a Juan Ovalle por la facilitación del scanner y también consejos relacionados al tema.

Además, quiero agregar a Iván Grez, Suraj Vaswani, Betsabé Abarca, Nicole Toro y Ángela Faúndez, de quienes recibí constante apoyo y consejos provenientes de sus conocimiento y experiencia, también por su preocupación de que todo resultara bien. A María Julia, por los implementos, paciencia, conocimientos brindados referente a las semillas y también por sus palabras de aliento. Agradezco enormemente al Centro de Semillas y Árboles Forestales (CESAF) por facilitar implementos, espacio y materiales.

A mi pololo Rodrigo Ortiz y amiga Paula González, quienes estuvieron ayudándome, apoyándome y acompañándome a lo largo del proceso (de inicio a fin), tanto como en el establecimiento y monitoreo del ensayo como también en el levantamiento de este. Gracias por su tiempo, sus palabras (de amor y aliento), paciencia y ayuda. Debo destacar que sin ustedes hubiese demorado mucho más el establecimiento y levantamiento del ensayo.

Por último, quiero agradecer a mi amada familia, a mí mamita, a mi tata, a mi mami, al ñoño, hermano grande, cuñada, y también a mi querida amiga Sofía quienes estuvieron presente sin precisamente involucrarse directamente con el tema desarrollado. Gracias por el constante amor y apoyo, por siempre creer en mí y aguantarme en periodos estresantes para mí.

Sin más que decir, vuelvo a agradecer a todos y cada una de las personas mencionadas, por su paciencia, tiempo, y conocimientos brindados. Fueron vitales para mí en este proceso de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Pasivos ambientales	2
1.1.1. Relaves mineros.....	3
1.1.2. Lodos.....	4
1.1.3. Sedimentos	5
1.2. Tecnosuelos	5
1.3. Antecedentes <i>Acacia caven</i>	5
1.3.1. Identificación.....	5
1.3.2. Descripción de sitios donde crece naturalmente.....	6
1.3.3. Ecología de la especie	6
1.3.4. Antecedentes de viverización de la especie	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
2. MATERIAL Y MÉTODO	8
2.1 Material	8
2.1.1. Área de estudio	8
2.1.2. Contenedores	8
2.1.3. Preparación del sustrato	8
2.1.4. Material Vegetal	10
2.1.5. Llenado de contenedores con sustrato	11
2.1.6. Siembra	11
2.1.7. Mantenimiento y monitoreo	11
2.1.8. Levantamiento del ensayo.....	12
2.1.9. Biomasa.....	12
2.2. Método	12
2.2.1. Análisis de los datos.....	13
2.2.2. Índice de calidad de planta.....	15
3.1. Germinación y Emergencia.....	16
3.1.1. Prueba de germinación en laboratorio.	16
3.1.2. Emergencia <i>Acacia caven</i>	16
3.2. Sobrevivencia de individuos <i>Acacia caven</i>	18
3.3.1. Crecimiento de individuos de <i>Acacia caven</i> de la siembra de invierno.	19

3.3.2. Crecimiento de individuos de <i>Acacia caven</i> de la siembra de primavera.....	22
3.3. Análisis de scanner de raíces.....	28
3.3.1 Raíces de los individuos de <i>Acacia caven</i> de la siembra de invierno.....	28
3.3.2 Raíces de individuos de <i>Acacia caven</i> de la siembra de primavera	30
3.4. Calidad inicial de los individuos de <i>Acacia caven</i> en condiciones de invernadero...	33
4. CONCLUSIONES	36
5. BIBLIOGRAFÍA	38
6. ANEXOS Y APÉNDICES.....	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades físicas de los materiales utilizados.....	9
Cuadro 2. Propiedades químicas de los materiales utilizados.....	9
Cuadro 3. 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	9
Cuadro 4. Umbrales de riego para los diferentes sustratos.	12
Cuadro 5. Cuadro con índices de calidad de plantas por tratamiento por siembra. IE = Índice de Esbeltez; T/R = Índice de relación tallo-raíz; IC = Índice de Dickson; S = sedimento; L= lodo; + R = adición de relave.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama global de metodología de la memoria. Se realizaron dos siembras en los mismos contenedores, una de invierno el día 14 de mayo y otra en primavera el 20 de agosto. Al cabo de 29 y 15 semanas respectivamente se realizó el levantamiento del ensayo.....	13
Figura 2. Esquema de la disposición de contenedores del ensayo establecido en invernadero con sus respectivos tratamientos. S = Sedimento; L = lodo; C/R = con relave; S/R = sin relave.	14
Figura 3. Esquema de la disposición de contenedores en invernaderos una vez realizada la rotación. S = Sedimento; L = lodo; C/R = con relave; S/R = sin relave.	14
Figura 4. Porcentaje de germinación en laboratorio con condiciones favorables por 12 días. Para predecir la germinación en el tiempo se ajustó a partir de los datos de una curva de tipo polinomial de tercer grado.....	16
Figura 5. Porcentaje de emergencia de los individuos de espino a lo largo del ensayo sin contar mortalidad. S = sedimento, L = lodo.	17
Figura 6. Porcentaje de plantas sobrevivientes de individuos de <i>Acacia caven</i> al momento de realizar el levantamiento del ensayo.	18
Figura 7. Longitud del tallo y de la raíz. Parámetro medido con regla en centímetros.	20
Figura 8. Crecimiento promedio del diámetro de las plantas por mezcla.	21
Figura 9. Peso seco de la parte aérea y radicular de las plantas.	21
Figura 10. Efecto del relave en el largo de la raíz y tallo de las plantas.	22
Figura 11. DAC promedio para aquellos tratamientos con y sin adición de relave.	23
Figura 12. Peso seco del tallo con y sin aplicación de relave.	23
Figura 13. Efecto de mezclas en el largo del tallo y raíz.	24
Figura 14. Efecto de las mezclas en el DAC de las plantas.	24
Figura 15. Efecto de las mezclas en peso seco del tallo y raíz de las plantas.	25
Figura 16. Crecimiento de longitud de tallo y raíz de plantas por tratamiento.	26
Figura 17. Crecimiento en DAC de las plantas por tratamiento.....	26
Figura 18. Peso seco aéreo y radical de las plantas por tratamiento.....	27
Figura 19. Longitud total de la raíz por tratamiento.	28
Figura 20. Área de las raíces por tratamientos.	29
Figura 21. Volumen de las raíces por tratamiento.....	29
Figura 22. Longitud total de las raíces por tratamiento.	30
Figura 23. Área de las raíces por tratamiento.....	30
Figura 24. Volumen de raíces por tratamiento.	31
Figura 25. Plantas obtenidas en ensayo. Se seleccionó una planta promedio por tratamiento.	32
Figura 26. Índice de esbeltez (IE) por tratamientos por siembra. El recuadro azul muestra el rango óptimo del índice de esbeltez.....	33
Figura 27. Índice tallo-raíz por tratamiento por siembra. La línea muestra el óptimo (1)...	34
Figura 28. Índice de Dickson por tratamiento por siembra.....	34

RESUMEN

La gestión de los residuos en Chile ha generado un gran problema ambiental, debido a que se utilizan grandes superficies de suelo para depositar los desechos, generando de esta manera los pasivos ambientales (PA). Los PA provocan daños al medio ambiente, en especial cuando han sido abandonados sin alguna medida de rehabilitación ambiental. Se propone una solución tecnológica que consiste en la fabricación de suelos antropogénicos, denominados “Tecnosuelos” para ser utilizados en la gestión de planes de cierre de depósitos de relaves mineros (DRM). El objetivo de este estudio fue evaluar la germinación y crecimiento de ejemplares de *Acacia cavendishii* (Mol.) en diferentes sustratos para rehabilitación de DRM. Se realizó un ensayo de invernadero con tres PA siendo estos: a) Relaves mineros espesados b) sedimento de embalses de riego agrícola y c) biosólidos (lodos) provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas (PTAS). 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 la germinación, sobrevivencia y crecimiento del espino en los diferentes sustratos, en dos fechas de siembra: Invierno y primavera. La germinación de la especie en cuestión en condiciones de laboratorio fue de un 79%. El tratamiento 100S-0L con relave tuvo el porcentaje de emergencia mayor (84%), mientras que, 100S-0L sin relave tuvo un 76% y 0S-100L sin relave un 72%. En cuanto a la sobrevivencia en ambas siembras se observó un mayor porcentaje en los tratamientos 100S-0L con y sin adición de relave, con un porcentaje igual al 56% y 36% para la siembra de invierno y 68% y 64% para la siembra de primavera; además, para esta última siembra, los tratamientos 0S-100L con y sin relave alcanzan un valor igual a 60%. En la siembra de invierno las mezclas 100S-0L y 75S-25L presentan un mayor crecimiento en cuanto a longitud de tallo, raíz, DAC, peso seco de tallo y raíz. En la siembra de primavera se pudo observar que el tratamiento 25S-75L sin adición de relave presenta un mayor crecimiento en todas las variables de respuesta. Se debe mencionar que en todos los casos los tratamientos con menor sobrevivencia y crecimiento fueron 50S-50L con y sin adición de relave (0% y 8% para la siembra de invierno y 8% y 16% para la siembra de primavera) y 25S-75L con adición de relave (0% en la siembra de invierno y 16% en la siembra de primavera), posiblemente por el arreglo espacial entre los agregados de lodo, las partículas individuales de sedimento y relave, que dificultan el drenaje del agua en los contenedores. Por último, según los índices de calidad de planta (índice de esbeltez, índice tallo raíz e índice de Dickson), se obtuvo que las plantas de buena calidad se encontraron en el tratamiento 100S-0L sin adición de relave.

Palabras claves: Pasivos ambientales, rehabilitación, espino.

ABSTRACT

Waste management in Chile has generated a major environmental problem, it is because large areas of soil are used to deposit waste, generating environmental liabilities (PA). The PA cause environmental damage, especially when they have been left without any environmental rehabilitation step. It is proposed a technological solution that consist in the manufacture of anthropogenic soils called "Tecnosoles" to be used in the management of mine tailings deposit closure plans (DRM). The objective of this study was the evaluation of the germination and growth of *Acacia caven* (Mol.) specimens in different substrates for DRM rehabilitation. A greenhouse test was made with three PA being these: a) Thickened mining tailings b) sediment from agricultural irrigation reservoirs c) biosolids (sludge) from sewage treatment plants (PTAS). Five types of mixtures were utilized 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, survival and growth of hawthorn were evaluated in the different substrates in two dates of sowing: winter and spring. The species germination of *A. caven* in laboratory conditions was of 79%. The 100S-0L with tailings treatment had the higher emergence (84%), meanwhile, 100S-0L without tailings had a 76% and 0S-100L without tailings a 72%. Regarding the survival of the two sowings it was observed a better percentage in the 100S-0L treatments with and without tailings, with a percentage equal to 56% and 36% to the winter sowing and a 68% and 64% to the spring sowing; also, for the last sowing, the 0S-100L treatments with and without tailings reach a value equal to 60%. In the winter sowing the 100S-0L and 75S-25L mixtures shows a better growing in terms of shoot and root length, DAC, and shoot and root dry weight. In the spring sowing can be observed that the 25S-75L without tailings treatment had a better growth in all the response variables. It must be mention that in all cases the treatments with lower survival and growth were 50S-50L with and without tailings (0% and 8% to the winter sowing and 8% and 16% to the spring sowing) and 25S-75L with tailings (0% in the winter sowing and 16% in the spring sowing), possibly because of a reduction in water drainage caused by the spatial arrangement among the sludge aggregates, the individual particles of sediment and tailings. Lastly, according to the plant quality indexes (slenderness index, shoot/root index and Dickson's index), it was obtained that the good quality plants were found in the 100S-0L without tailings treatment

Key words: Environmental liabilities, rehabilitation, espino.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de los desechos se ha convertido en un gran problema para Chile debido a que no hay una solución sustentable de éstos. Lo anterior ha conllevado a la pérdida de grandes superficies que son destinadas para depósitos de desechos o también denominados Pasivos Ambientales, quedando con una composición físicoquímicas no aptas para la existencia de vegetación. Un ejemplo de pérdida de superficie de suelo son los depósitos de relaves, los que corresponden a desechos dejados por las industrias mineras, los cuales presentan una costosa degradación. A su vez, se encuentran también las plantas depuradoras de aguas servidas que deshabilitan terrenos para poder depositar sus desechos quedando estos desprovistos de vegetación y, por último, la agricultura también presenta un rol importante en esto, porque al utilizar los embalses para el riego se generan depósitos de sedimentos provenientes de la erosión obstruyendo así los mismos canales de riego.

La minería en Chile es una actividad de suma importancia porque genera un gran aporte al Producto Interno Bruto (PIB) alcanzando un 9,8% en el año 2018 (Servicio Nacional de la Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2018), además, es considerado el mayor productor y exportador de cobre. A pesar de esto, es importante mencionar que la cadena productiva de estas conlleva a toneladas de residuos comúnmente conocidos como relaves, los cuales están compuestos por una parte líquida y sólida, siendo esta última aquellos minerales que son descartados por no presentar un valor económico. Según SERNAGEOMIN (2017), los relaves presentan una composición geoquímica que en su mayoría (99%) son inocuos para el medio ambiente y salud humana mientras que el resto podrían no serlo (1% restante). Este residuo es depositado de un sector habilitado en forma de una especie de pulpa compuesta por la parte sólida que es el mineral descartado que se encuentra en pequeñas partículas más una parte líquida que es agua. Al evaporarse el agua de esta mezcla, queda solo la parte sólida que, por su composición puede fácilmente ser transportado por el viento a sectores aledaños pudiendo esto, ser perjudicial para la vida humana. Por otro lado, el sector destinado a este depósito queda seriamente afectado para el establecimiento de plantas.

Los lodos o biosólidos, son los residuos producidos por las plantas de tratamientos de aguas servidas (PTAS), estos son materia orgánica removida a partir de la colecta de sistemas de alcantarillado para ser llevados a plantas de tratamiento, estos pueden ser semisólidos o líquidos. Una de las empresas sanitarias más grandes de Chile es Aguas Andinas. 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 en monorellenos y también la aplicación a suelos que cumplan con algunos requisitos ya que se ha comprobado que puede ayudar al aumento de la productividad del suelo (Quinteiro *et al* 1998; Henríquez 2011).

Adicionalmente, los sedimentos son partículas finas de suelo que son transportadas por una acción fluvial o por otro agente erosivo llegando de esta manera a un lugar diferente al que se originaron (Siancas, 2018). Los embalses se ven altamente afectados por los sedimentos ya que estos últimos se acumulan al fondo del cuerpo de agua reduciendo de esta manera el espacio para la acumulación de agua y tapando también los canales de riego como se mencionó anteriormente (García-Chevesich, 2015).

Una solución a la gestión de estos residuos es la reutilización de estos mediante el concepto de economía circular. La propuesta tecnológica llevada a cabo en el proyecto N°30485870 FIC “Gestión de pasivos ambientales”, por la Universidad de Chile, consiste en la fabricación de Tecnosuelos para cubrir los depósitos de relaves mineros, de manera de simular las condiciones edáficas que permitan el establecimiento y cobertura de plantas para rehabilitar estos pasivos ambientales. Sin embargo, se desconoce qué especies de plantas nativas arbóreas pueden establecerse de manera sostenible en esta nueva condición. De acuerdo con lo observado en los patrones de colonización arbórea de las zonas semiáridas de Chile, se plantea que *Acacia caven* (Mol.), podría cumplir con las características para este propósito.

Acacia caven (Mol.) es una especie arbórea que domina muchas zonas semi-áridas del país. Es conocida por ser la pionera en colonizar suelos que han sido degradados por acción natural o humana caracterizándose así por sobrevivir a condiciones adversas como déficit hídrico en verano o escasas precipitaciones, logrando prosperar en zonas de secano. Se ha observado plantas de espino colonizando naturalmente embalses de relave. Espino ha demostrado presentar beneficios directos al suelo como aumento de materia orgánica, menor densidad aparente, grandes poros, y mayor estabilidad estructural (Soto *et al.*, 2015).

En esta memoria se evaluó la germinación y crecimiento de *Acacia caven* en sustratos fabricados a partir de desechos antrópicos, en este caso de diferentes proporciones de lodo de PTAS y sedimento de embalses de riego, con y sin adición de lamas de relave minero alcalino. Esto se realizaron en condiciones semicontroladas de invernadero para así eliminar problemas logísticos que puedan afectar la respuesta de las plantas y, de esta manera, generar dificultad en determinar la mejor mezcla de sustrato.

1.1 Pasivos ambientales

Los pasivos ambientales son la suma de daños producidos por una industria al medio ambiente que no han sido compensados o de alguna manera reparados. En América Latina hay una discusión de los pasivos ambientales de empresas mineras, químicas petroleras y otros (Russi y Martínez, 2002).

En Chile las faenas mineras generan grandes cantidades de residuos los cuales son denominados relaves, éstos, al encontrarse abandonados o paralizados, además de ser un riesgo para la salud de las personas y medio ambiente, son denominados Pasivos Ambientales Mineros (PAM); se debe mencionar que esta definición fue entregada por el SERNAGEOMIN (Biblioteca del Congreso Nacional (BCN), 2012, Oblasser, 2016). En el año 2007 SERNAGEOMIN realizó un catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas en donde se consideró el tipo de faena, es decir, si este era mina (rajo abierto, subterránea o superficial), plantas en procesos o depósitos de residuos (BCN,2012).

Por otro lado, los lodos y sedimentos también son considerados como pasivos ambientales, esto es debido a que superficies de suelo son utilizadas para el depósito de dichos residuos, además, presentan algún problema para el medio ambiente o comunidades aledañas. Aguas Andinas reconoce diversos riesgos de contaminación hacia el medio ambiente y uno de estos podría ser debido a la saturación de los vertederos en los que se depositan los lodos que provienen de las plantas de tratamiento de aguas servidas y también por la emanación de los

olores de dichas plantas (Aguas Andinas, 2018). En cuanto a los sedimentos, son un problema para las comunidades ya que, al acumularse, tapan los canales de riego evitando el paso del agua según la Asociación de Canalistas del Embalse de Recoleta.

1.1.1. Relaves mineros

La minería es una actividad en donde se extraen diferentes minerales que se encuentran en la superficie o en diversas capas del suelo o subsuelo, y son extraídos de dependiendo del objetivo de la faena. Según el Ministerio de Minería (2018), hay extracción de minerales metálicos que se clasifican en cuatro tipos, básicos, ferrosos, preciosos o radioactivos y, por otro lado, existe la extracción de minerales no metálicos los cuales son clasificados en 4 grupos (del I al IV).

El desarrollo de la minería ha generado impactos positivos en Chile por su aporte al Producto Interno Bruto (PIB), a los ingresos fiscales exportaciones, empleo y el efecto de las inversiones, se debe mencionar que históricamente el desarrollo nacional en la minería está basada en la producción de minerales metálicos como el cobre y molibdeno mientras que los minerales no metálicos son transformados y pueden ser utilizados por industrias y en la agricultura como por ejemplo, el salitre, yeso, entre otros (Betancour y Maldonado, 2013; Ministerio de Minería, 2018), sin embargo, esta actividad presenta impactos negativos al medio ambiente, tanto en los procesos de exploración, operación y disposición final de sus residuos, como son los depósitos de relaves mineros.

Los relaves mineros son la parte mineral descartada por no tener valor económico, está compuesta por una cantidad superior al 95% de del mineral procesado. Se debe mencionar que se desecha en forma de “pulpa” conformada por partículas sólidas muy finas (parte solido) con agua (parte líquida). Existen diferentes proporciones de sólido y agua, dependiendo de estas, la mezcla puede ser más espesa o acuosa (Servicio Nacional de Geología y de Minería (SERNAGEOMIN), 2014). Si la parte sólida es menor al 50% de la mezcla, entonces esta será más líquida, si por el contrario, la parte sólida es mayor o igual al 55%, entonces la mezcla será más espesa. Se debe destacar que, al pasar los años, el agua se evapora quedando solo las partículas sólidas livianas que puede ser levantadas y transportadas por el viento (Ramírez, 2007).

Hay lugares específicos a donde son dirigidos los relaves, estos pueden ser embalses o tranques de depósito. Estos son ubicados en sectores donde idealmente, se puede construir un muro de contención quedando los relaves soportados principalmente por muros naturales, el suelo es resistente e impermeable, se encuentra alejado zonas urbanas o pobladas (aguas abajo) y caminos, cursos de agua (permanentes o esporádicos o cuerpos de aguas subterráneas) (SERAGEOMIN, 2014).

Según un catastro realizado por SERNAGEOMIN (2018), en Chile hay un total 740 depósitos de relave que se encuentran desde la Región de Arica y Parinacota hasta de Región de Aysén, concentrándose aproximadamente un 52,1% del total de dichos depósitos en la Región de Coquimbo.

La Planta Delta de ENAMI tiene un depósito de relave ubicado en la comuna de Ovalle de la Región de Coquimbo, este presenta una capacidad máxima autorizada de 10.000.000 de toneladas de relaves. Según el catastro realizado por SERNAGEOMIN en abril del año 2019, el depósito presentaba 5.281.642 de toneladas de relave.

1.1.1.3 Ley del cierre minero

La Ley N° 20.551, es la ley que regula el cierre de las faenas e instalaciones mineras. En esta ley se establece que las mineras para poder llevar a cabo su cierre deben guiarse por esta y deben obligadamente, cumplir con su plan de cierre de sus faenas mineras que haya sido elaborado acorde a la resolución de la calificación ambiental (RCA) relacionada a la ley 19.300 (Artículo 6°). Además, se debe procurar cumplir con las actividades contempladas en dicho documento dentro del plazo y de la manera estipulada (Artículo 7°). En la presente ley, además se establecen procedimientos para llevar a cabo la aprobación del plan de cierre minero y se indican los requisitos de este, entre otros. En el artículo 18° se menciona que se deben realizar seguimientos al plan de cierre cada cinco años para certificar el cumplimiento de las actividades promovidas en el plan de cierre. Por último, los planes de cierre que sean sometidos a la aprobación del servicio que tendrá un carácter público y deben regirse por la ley 20.285 “Ley de acceso a la información pública”.

1.1.2. Lodos

Los lodos estabilizados o biosólidos son materia orgánica contenida en agua residuales colectadas en sistemas de alcantarillado. Para poder realizar la extracción de dicha materia orgánica de las aguas residuales se debe realizar un proceso con numerosas tecnologías, el proceso se divide en diferentes etapas. La primera etapa es de pretratamiento, luego tratamiento primario, secundario, desinfección y tratamiento de lodos. Se debe destacar que el tratamiento secundario es el más importante ya que es la parte donde a través de los microorganismos se remueve la materia orgánica que se encuentra en el agua residual (Rámila y Rojas, 2008). Según la Superintendencia del Medio Ambiente (2014), una vez terminado el tratamiento se obtiene biosólidos con una humedad del 75% y para optimizar su manejo posterior, se debe reducir dicho contenido de humedad.

Es importante mencionar que los biosólidos deben ser tratados ya que presentan metales como, zinc, cobre, níquel, entre otros, y contaminantes orgánicos como plaguicidas, disolventes industriales u otros componentes que presentan baja solubilidad en agua. También la materia orgánica puede ser considerada contaminante ya que puede ayudar a la eutrofización de las algas en aguas subterráneas o superficiales (Vélez, 2007).

Un 49% del total de biosólidos producidos diariamente en las biofactorias de Aguas Andinas es destinado para secar al sol en “El Rutal”, esta una planta de gestión integral de biosólidos perteneciente a Aguas Andinas que se encuentra ubicado en la comuna de Til Til a 54 kilómetros de Santiago (Aguas Andinas, 2018).

1.1.3. Sedimentos

El agua es uno de los principales agentes atmosféricos que destruyen y transforman rocas. Al quedar estas en la superficie o, dicho de otra forma, intemperizadas. Estas pueden sufrir desintegración, quedando estas como suelos residuales o transportados. El material transportado es depositado en otra zona. Según la FAO la agricultura es una actividad antrópica que contribuye a la formación de sedimentos producto de los riegos realizados y también del arado.

El Embalse de Recoleta, está ubicado al noroeste de la ciudad de Ovalle, situado sobre el Río Hurtado que se encuentra influenciado por el Río Grande, posee una capacidad máxima de 100.000.000 de m³ (Morales y Rojas, 2010). Este es uno de los tres embalses que influye en el transporte de sedimentos los cuales tiende de acumularse en zonas de baja energía del río (Astudillo, 2011). Los sedimentos acumulados en los embalses de riego constituyen un problema por cuanto disminuyen la capacidad de almacenamiento de agua para riego, tapan válvulas del sistema de evacuación y afectan la calidad del agua de riego. Se debe mencionar que el sedimento presenta partículas finas las cuales son menores a 180 µm (Astudillo, 2011).

1.2. Tecnosuelos

Según la “World reference base for soil resources” (WRB, 2014), se denominan Tecnosoles a aquellos suelos que contienen materiales modificados por el ser humano (Bolaños, 2014), es decir los Tecnosuelos son materiales similares a los componentes de los suelos, que son derivados de actividades antropogénicas, y pueden ser utilizados para restauración de sectores degradados. Para su elaboración se deben incorporar residuos en cantidades idóneas según los objetivos, se debe tener en consideración que dicho sustrato fabricado debe ser fértil (para el desarrollo de la vegetación), debe cumplir con las funciones principales del suelo y, por último, debe ser apto para la solución de problemas ambientales del sector degradado (Martin *et al*, 2014). Una de las mezclas utilizadas para generar Tecnosuelos son los lodos y sedimentos que fueron descritos en los puntos anteriores.

1.3. Antecedentes *Acacia caven*

1.3.1. Identificación

Acacia caven, comúnmente conocido como espino o espinillo, es considerado como un árbol espinoso (FAO, 1997). Presenta un tronco tortuoso, de corteza gruesa y agrietada, tiene una raíz pivotante y de rápido crecimiento (Benedetti, 2012), por su profundo sistema radicular es utilizado para conservación de suelos y control de la erosión (FAO, 1997). Sus ramas son flexibles y nudosas, presenta espinas estipuláceas, delgadas y de tamaño variable. Tiene hojas caducas, compuestas y bipinadas con foliolos pares. Sus inflorescencias son amarillas, las cuales destacan a distancia. Sus frutos son llamados quirincas los cuales son de una tonalidad café oscuro muy duras, miden aproximadamente cinco centímetros de largo y presenta numerosas semillas en su interior (Alvarado *et al*, 2013). Si el individuo proviene de semillas, este será monofustal sin embargo si el se realiza alguna intervención, este presentará una estructura de monte bajo (Olivares, 2016).

1.3.2. Descripción de sitios donde crece naturalmente

Acacia caven es una especie distribuida en una gran superficie de Chile, dominando muchas zonas semiáridas. Se distribuye en las laderas orientales de la Cordillera de la Costa, abarcando el llano central hasta la precordillera andina, desde Copiapó (Región de Atacama), hasta Los Sauces (Región del Bio Bio) a una altitud de 60 a 1200 msnm (INFOR, 2012, Alvarado *et al*, 2013). La población del espino ha ido decreciendo lentamente por la habilitación de nuevos terrenos agrícolas y por la intensiva explotación. Se debe destacar que espino es una especie que crece en suelos nutricionalmente pobres con baja disponibilidad de agua durante el verano (Donoso *et al*. 2015). Espino ha demostrado ser benéfico para el suelo ya que según Soto *et al*. (2015) observaron un aumento de materia orgánica, menor densidad aparente, mayor proporción de poros gruesos y además la cobertura de la especie promueve menor resistencia mecánica y mayor estabilidad estructural. Además, según indica Ginocchio (2008), *Acacia caven* es uno de los colonizadores espontáneos de depósitos de relaves abandonados y es una de las especies nativas que presenta un alto potencial para ser utilizada en programas de fitoestabilización de relaves mineros.

Por último, se debe mencionar que *Acacia caven* presenta una distribución natural mediante animales rumiantes, por lo que se puede percibir alto número de individuos de espino en lugares donde existe presencia de vacunos u ovinos ya que estos consumen los frutos de la especie y mediante su tracto digestivo se logra escarificar las semillas (Olivares, 2017)

1.3.3. Ecología de la especie

El espino es una especie perteneciente al tipo forestal esclerófilo, específicamente de la asociación, sabana de espino, además, las formaciones vegetales de las cuales participa dicha especie es un subtipo espinal o estepa de *Acacia caven*, presenta la capacidad de regenerar vegetativamente a partir de cepas y tocones (FAO, 1997, Benedetti, 2012). La floración ocurre entre agosto y diciembre dependiendo de su ubicación geográfica (INFOR, 2012).

1.3.4. Antecedentes de viverización de la especie

Según INFOR (2012), para la producción de la especie no hay mayores problemas mientras se haga un tratamiento a la semilla con ácido sulfúrico y se protejan las plántulas del sol. Debe ser realizada en primavera con un sustrato de arena y tierra (1:3), también se puede utilizar un sustrato compuesto de dos partes de arena, una de compost y una de tierra de jardín. Luego se debe repicar (de almacigueras) a contenedores individuales, cuando los individuos presenten de 2 a 4 hojas verdaderas. Finalmente, la siembra debe ser realizada en octubre.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar germinación y crecimiento de ejemplares de *Acacia caven* (Mol.) en diferentes sustratos para rehabilitación de depósitos de relaves mineros.

1.4.2 Objetivos específicos

Evaluar la germinación y emergencia de *Acacia caven* en los diferentes sustratos utilizados.

Evaluar la sobrevivencia, crecimiento y calidad inicial de plantas de *Acacia caven* cultivadas en distintas mezclas de sustratos.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material

2.1.1. Área de estudio

El ensayo se realizó en el invernadero de las dependencias del vivero Antumapu del Campus sur, administrado por el Departamento de Silvicultura de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile.

2.1.2. Contenedores

Se fabricaron con 50 tubos PVC sanitarios de 110 mm de diámetro por 300 mm de largo. Con un taladro se realizaron los orificios para determinar contenido de humedad. Se cubrió la base de cada contenedor con una malla porosa para contener el sustrato y favorecer el drenaje. Para monitorear la humedad de los sustratos, se realizaron orificios de 5 mm con taladro, cada 1,5 cm, de tal forma de obtener tres secciones (alta, media y de fondo) para poder acceder con la sonda TDR GS3 (Decagon Devices inc.) y registrar contenido de humedad del sustrato con el registrador portátil Procheck (Decagon Devices inc.).

2.1.3. Preparación del sustrato

2.1.3.1 Lodo estabilizado o biosólidos con baja humedad proveniente de la planta de tratamiento de aguas servidas del Rutil (km 59), de Aguas Andinas en la Comuna de Til Til, Región Metropolitana).

2.1.3.2 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.

2.1.3.3 Relave minero, proveniente 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.

En el Cuadro 1 se muestran las propiedades físicas de los materiales utilizados mientras que en el Cuadro 2 y 3 se muestran propiedades químicas de estos. Se debe mencionar que los datos fueron brindados por el proyecto de gestión de pasivos ambientales del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional.

Cuadro 1. Propiedades físicas de los materiales utilizados

Pasivo ambiental	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	Densidad aparente ($D_b = \text{g cm}^{-3}$)	Conductividad hidráulica saturada ($K_{\text{sat}} = \text{cm h}^{-1}$)
Lodo	72,30	18,22	9,49	Fa	0,69	0,89
Sedimento	81,97	8,70	9,32	af/Fa	1,39	4,88
Relave	64,12	21,6	14,3	Fa	1,48	4,14

Cuadro 2. 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	4,07	13,8	40,6	1848	631	751	30,9	7,1	1,5	167	30,6	217	29	120
Sedimento	8	1,01	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: Manganeso; Zn: Cinc; B: Boro y Cu: Cobre.

Cuadro 3. 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	1	0,01	97,5	327	16189	575	0	0,03	11,6	21,9	0,02	393
50S 50L	1	0,01	104	334	16057	500	0	0,02	12,5	22,4	0,02	418
25S 75L	1	0,117	202	469	17010	450	0,38	7,75	18,9	35,6	0,02	577

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

Por último, para la mezcla de lodo y sedimento se utilizó una mezcladora tipo betonera de volteo lateral con capacidad de 130 litros, palas, sacos escombreros para almacenamiento y transporte de las mezclas y una carretilla.

Se prepararon cinco mezclas de sustratos, las cuales fueron formados por lodo (L) y sedimento (S) en diferentes proporciones, estas son las siguientes:

- 100% S, 0% L.
- 75% S, 25% L.
- 50% S 50% L.
- 25% S, 75% L.
- 0% S, 100 % L.

Las mezclas fueron proporcionadas a través unidades de medida estándar de carácter operacional. Para tal efecto se utilizaron el de número de palas, estas contenían la misma cantidad de sustrato utilizado.

El sustrato se consideró fabricado, luego de cinco minutos en la betonera, tiempo en el cual se observó una efectiva mezcla de los distintos materiales. Posteriormente, las mezclas se emplearon para llenar 25 contenedores, 5 repeticiones de cada sustrato, correspondiente a la mitad del ensayo. Para la otra mitad, se utilizó el sustrato restante, pero este se mezcló con 200 g de relave (R) por tratamiento.

De esta manera se obtuvieron 10 tratamientos los cuales consisten en las diferentes mezclas fabricadas a partir de sedimento y lodo, más la aplicación de relave como se puede observar en el cuadro 1.

2.1.4. Material Vegetal

2.1.4.1 Preparación de semillas

Se utilizaron 250 semillas de *Acacia caven* de procedencia “Antumapu” colectadas de árboles adultos del Campus Sur de la Universidad de Chile. Para poder obtener las semillas y romper fácilmente el fruto (quirinca) y así optimizar el tiempo, los frutos fueron pisados por la rueda de un vehículo. Además, se utilizó también un ventilador para apartar las impurezas. Por último, se utilizó ácido sulfúrico, vaso precipitado, una varilla de agitación, una campana (para dejar las semillas mientras fueron escarificadas con ácido), un colador para limpiar las semillas una vez escarificadas y un recipiente con agua para su humectación.

2.1.4.1.1. Limpieza y preparación de las semillas

Los frutos colectados de *A. caven* (quirincas) se dispusieron en sacos plásticos (tipo escombrero), para poder romper los frutos y posteriormente, se realizó una limpieza manual para separar las semillas de los restos de los frutos. Una vez obtenidas las semillas puras, se separaron aquellas con evidentes signos de daños como semillas vacías, con ataque de insectos entre otros daños. Por último, se seleccionaron 500 semillas, las cuales fueron llevadas a un tratamiento con ácido sulfúrico durante una hora para escarificarlas y posteriormente se remojaron en agua potable por 24 horas (Acuña 2001).

2.1.4.1.2. Ensayo de germinación de *Acacia caven* en condiciones controladas

En laboratorio se realizó una prueba de germinación de la especie. Se comenzó con el tratamiento pregerminativo de 100 semillas (escarificación con ácido y humectación de 24 horas) posteriormente, se dividieron en 4 placas de Petri quedando así en cada una de estas 25 semillas que fueron sometidas a condiciones controladas a una temperatura de 25°C. Se debe mencionar que cada placa contenía papel filtro y agua destilada y además se monitorearon por 7 días obteniendo así un porcentaje de semillas germinadas en laboratorio. Se consideraron semillas germinadas aquellas que presentaban una radícula de aproximadamente 2 mm.

2.1.5. Llenado de contenedores con sustrato

Para este punto, solo se llenaron los contenedores a tope y posteriormente se le aplicó una preconsolidación mediante tres golpes del contenedor a este contra una superficie en concreto para generar un asentamiento de las partículas del sustrato (Seguel,2002), de esta manera el sustrato quedó aproximadamente a unos 27 centímetros, equivalente a un volumen de 0.0025 metros cúbicos.

2.1.6. Siembra

Los contenedores llenos con las mezclas se saturaron mediante inmersión en cajas de plástico de 120 litros, la humectación se realizó aplicando agua a las cajas de plástico de manera tal que el ingreso de agua a los contenedores proviniera desde el fondo del contenedor, hacia arriba. De esta forma se evitó la humectación heterogénea y la presencia de burbujas de aire en los sustratos. Luego de esto, se sembraron 5 semillas por contenedor, a una profundidad de un centímetro aproximadamente. Finalmente, se aplicó una mezcla de insecticida y fungicida comercial (Pradosan) en polvo, que contiene Carbaryl y oxiclóruo de cobre como agentes activos en una dosis de aplicación recomendada por el fabricante en una proporción de 500 gramos por cada 50 metros cuadrados.

Se probaron dos fechas de siembra en los mismos contenedores (mayo y agosto de 2019) con el propósito de conocer las implicancias que puede presentar la temporada de siembra en la germinación de las plantas de *Acacia caven*.

Para evaluar la emergencia de las plántulas en el ensayo establecido en invernadero, se realizó un monitoreo semanal en donde se observó las semillas que lograron emerger del sustrato en el que se encontraban.

2.1.7. Mantención y monitoreo

Se realizó un monitoreo semanal durante tres meses. En este monitoreo se midió el contenido de humedad entre los 15 y 20 centímetros superficiales del contenedor ya que es la parte que más rápido pierde humedad por evaporación. Para la fase de germinación, se calculó un umbral de riego a partir del contenido de humedad, que se obtiene a capacidad de contenedor menos una pérdida del 25% del contenido volumétrico de agua de la sección superior del contenedor (Cuadro 2). Si el contenido de humedad es inferior al umbral, entonces se procedió a regar con 200 ml de agua. Además de esto se observó y registró la emergencia de las plantas semanalmente.

Cuadro 4. Umbrales de riego para los diferentes sustratos.

Tratamiento	Contenido de agua (m ³ /m ³)	
	Con relave	Sin relave
100% Lodo	0,29	0,29
75% Lodo; 25% Sedimento	0,26	0,26
50% Lodo; 50% Sedimento	0,34	0,35
25% Lodo; 75% Sedimento	0,22	0,26
100% Sedimento	0,26	0,23

2.1.8. Levantamiento del ensayo

Se realizó el levantamiento del ensayo en el mes de diciembre del 2019 y en esta etapa se determinó la biomasa aérea y radical de las plantas resultantes. Las variables que se midieron fueron diámetro a altura de cuello (DAC), peso seco, peso húmedo, longitud aérea y radicular también se obtuvo el volumen de raíces para evaluar estas dos últimas variables se utilizó un scanner de raíces utilizando el programa Winrhizo. Se debe tener en consideración que al sacar la planta del contenedor se realizaron las mediciones del peso húmedo, longitud aérea, longitud radicular y posteriormente, secarlas en estufa a aire forzado a 65°C hasta alcanzar masa constante para la obtención del peso seco (Fuschlocher, 1991).

2.1.9. Biomasa

Para este punto se utilizó una regla graduada (cm), una balanza de tres decimales para la obtención de los pesos secos y húmedos, formulario, para escanear raíces se utilizó el scanner EPSON v700 photo y por último se contó con una estufa de aire forzado para poder secar las plantas.

2.2. Método

Una vez confeccionados de los contenedores, se prepararon las mezclas de sustrato y se acondicionaron las semillas. Posteriormente, se procedió a llenar los contenedores (tubos de PVC sanitario de 110 mm de diámetro x 300 mm de largo) con el sustrato, luego se humectaron con agua potable hasta saturación durante aproximadamente 6 horas, mediante inmersión en cajas de PVC, llenadas de tal forma que el agua ascendiera lentamente (para evitar bolsas de aire), desde la base hasta la superficie de los contenedores. Una vez saturados los contenedores, se dejaron drenando una hora, por último, se sembraron con cinco semillas pretratadas en cada contenedor y fueron dejados en invernadero, una vez ahí se monitoreó semanalmente germinación, emergencia y/o crecimiento de plantas, temperatura y humedad de los contenedores. El riego se realizó verificando el contenido de humedad superficial de las plantas desde un comienzo. En la Figura 1 se muestra un diagrama resumen de la metodología.

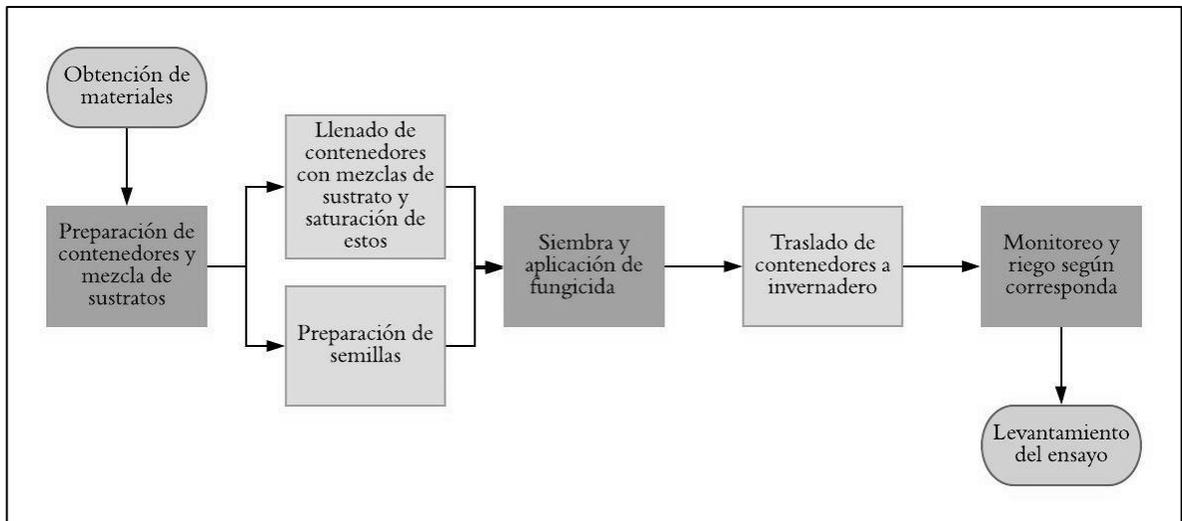


Figura 1. Diagrama global de metodología de la memoria. Se realizaron dos siembras en los mismos contenedores, una de invierno el día 14 de mayo y otra en primavera el 20 de agosto. Al cabo de 29 y 15 semanas respectivamente se realizó el levantamiento del ensayo.

2.2.1. Análisis de los datos

Originalmente se propuso un análisis de varianzas 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. En el caso de no cumplir ante los dos supuestos, se realizó una corrección para así obtener datos paramétricos y en el caso de no lograr cumplir con los supuestos se procedió a utilizar la prueba de Kruskal Wallis.

Una vez teniendo datos paramétricos, se utilizó análisis de varianza de dos vías. 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. Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar el efecto de los factores y su interacción. El nivel de confianza fue de $\alpha = 0,05$.

Se instalaron los 50 contenedores en un total de diez bandejas, es decir, cinco contenedores del mismo tratamiento por bandeja como se observa en la Figura 2. Para evitar efecto de bloque, se rotaron cada dos semanas los contenedores de bandeja sus respectivas bandejas (como se puede observar de la Figura 2 a la Figura 3) debido a que existían condiciones lumínicas variables para las plantas.

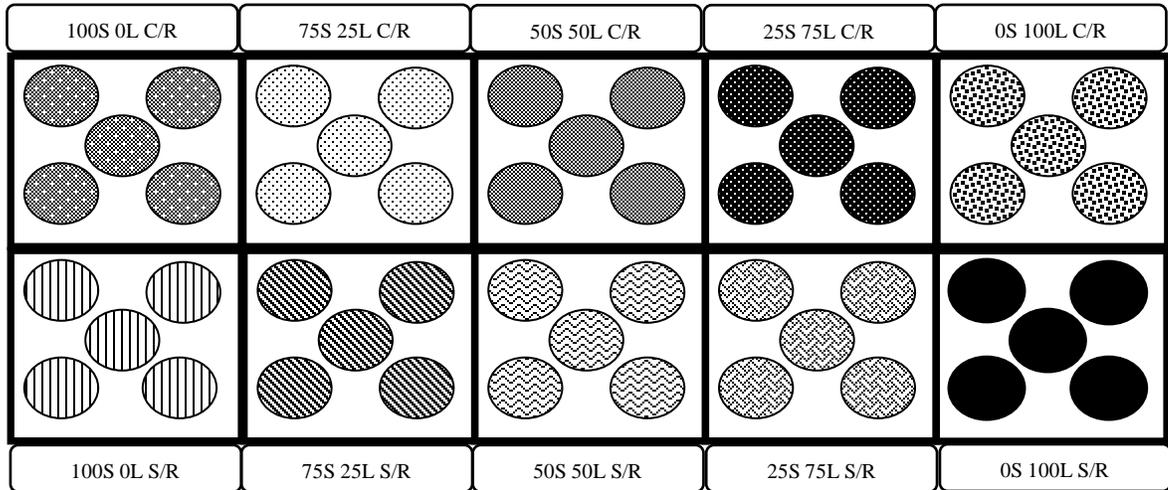


Figura 2. Esquema de la disposición de contenedores del ensayo establecido en invernadero con sus respectivos tratamientos. S = Sedimento; L = lodo; C/R = con relave; S/R = sin relave.

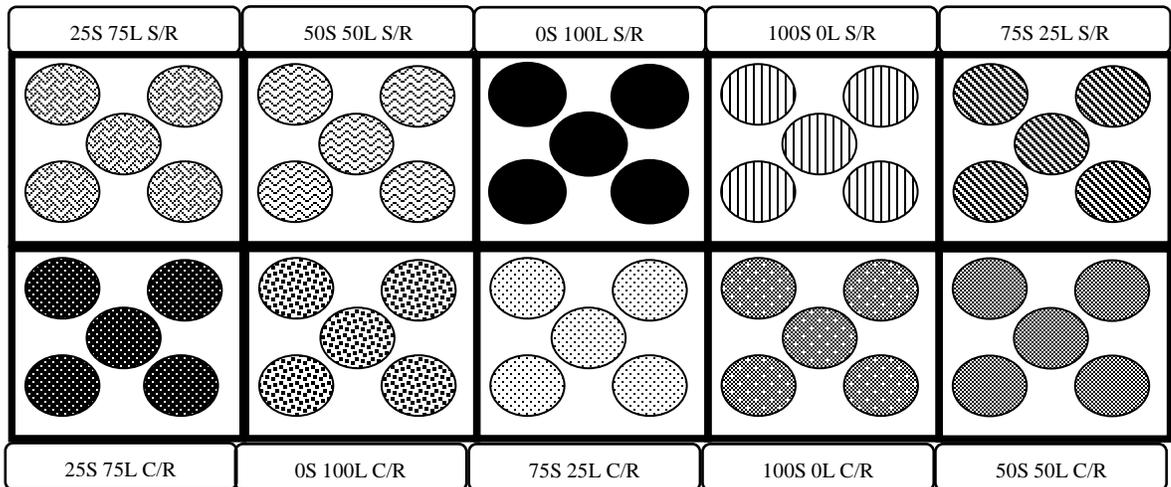


Figura 3. Esquema de la disposición de contenedores en invernaderos una vez realizada la rotación. S = Sedimento; L = lodo; C/R = con relave; S/R = sin relave.

Se puede observar en la figura 3 el primer recuadro de la primera columna, que anteriormente (ver figura 2) se encontraban los cinco contenedores pertenecientes al tratamiento 100S-0L C/R, siendo estos movidos a la cuarta columna de la segunda fila, quedando en su posición los contenedores del tratamiento 25S-75L S/R. De la misma manera, se cambió el resto de los tratamientos en forma aleatoria.

2.2.2 Índice de calidad de planta

Para evaluar la calidad de plantas se utilizará el índice de Esbeltez (IE, ecuación 1), índice tallo/raíz (T/R, ecuación 2) y por último el índice de Dickson (IC, ecuación 3) según lo establecido por Quiroz *et al*, 2009.

$$\bullet \quad IE = \frac{\text{Longitud del tallo}}{DAC} \quad (1)$$

El IE es un índice que se calcula a partir de la razón de la longitud de tallo y el DAC, los parámetros que se recomiendan como óptimos son aquellos que se encuentran entre cinco y diez porque si es menor a cinco, indicaría una planta muy baja para su DAC y si este mayor a diez, la planta sería muy alta con respecto a su DAC.

$$\bullet \quad T/R = \frac{\text{Masa seca aérea}}{\text{Masa seca radicular}} \quad (2)$$

el índice tallo/raíz, es el cociente entre la masa seca de la parte aérea y la masa seca de la parte radical, se espera que este índice se acerque a 1 pues, lo ideal es que la masa aérea y radical sean similares.

$$\bullet \quad IC = \frac{\text{Masa seca total de la planta}}{(IE+(T/R))} \quad (3)$$

el IC es aquel índice que incluye los dos índices anteriores, es la masa seca total de la planta, dividida en la relación longitud aérea y DAC más la relación masa seca aérea y radical.

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

3.1. Germinación y Emergencia

3.1.1 Prueba de germinación en laboratorio.

A partir de los datos encontrados en el ensayo de laboratorio, con el fin de evaluar la germinación de *Acacia caven* en condiciones óptimas, se obtuvo que al cabo de 7 días un 79% del total de semillas logró germinar lo cual se consideró como el máximo de referencia para este estudio.

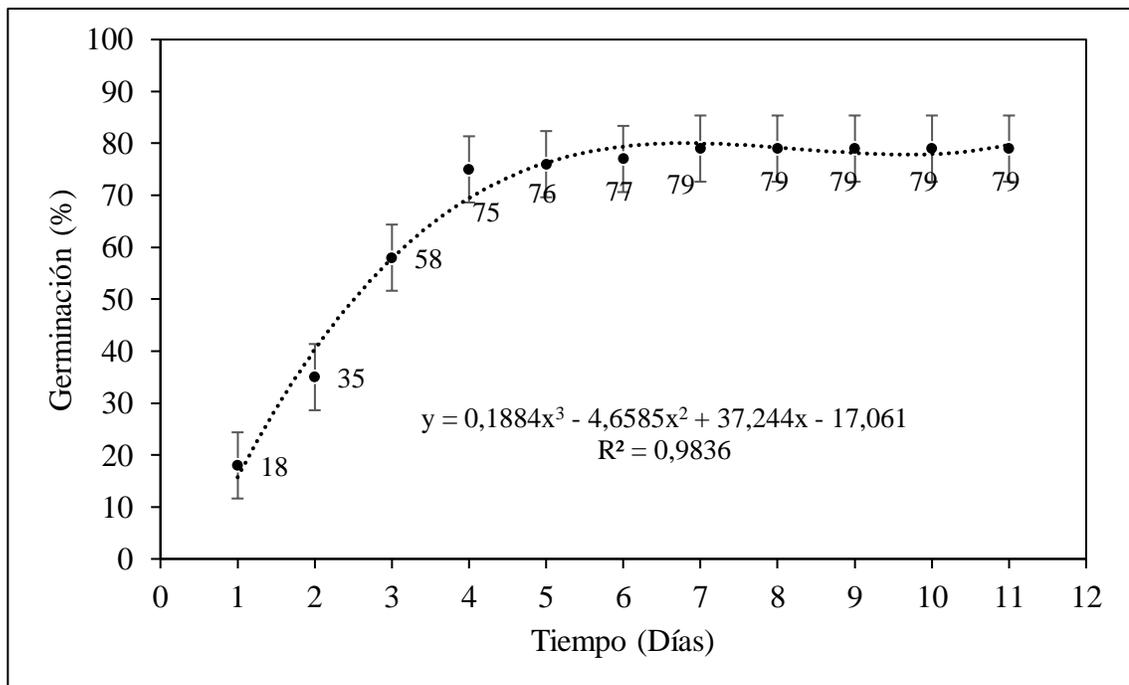


Figura 4. Porcentaje de germinación en laboratorio con condiciones favorables por 12 días. Para predecir la germinación en el tiempo se ajustó a partir de los datos de una curva de tipo polinomial de tercer grado.

En la Figura 4 se puede observar que el mayor porcentaje de germinación se concentra entre los primeros 4 días con un 75% del total de germinación de las semillas. Por esto se infiere que, en condiciones ideales, las semillas deberían germinar la primera semana posterior a la siembra para este caso. No obstante, la FAO (1997) y Quiroz *et al*, (2009) indican que si se realiza el tratamiento pregerminativo con algún material abrasivo o ácido sulfúrico su porcentaje de germinación podría llegar incluso al 96%. Por otro lado, Ginocchio (2008), obtuvo entre un 90-92% de germinación de espino utilizando ácido para la escarificación de sus semillas.

3.1.2 Emergencia *Acacia caven*.

La figura 5, muestra el porcentaje de emergencia de *A. caven* en los distintos sustratos elaborados con pasivos ambientales con y sin adición de relave para ambas fechas de siembra.

No hay efecto combinado de las mezclas y relave, sin embargo, se incluye para tener un mayor detalle de la emergencia.

La siembra de invierno en general, independiente del tratamiento y la presencia de relave presenta porcentajes menores variando en un rango del 8 al 64% de germinación en relación con la siembra de primavera que varió entre un 20 y 84% de germinación. La siembra de espino se realiza normalmente en la temporada de primavera, para evitar muerte de las plántulas por las heladas (Olivares, 2016). Sin embargo, se planteó la posibilidad de realizar una siembra invernal, ya que, en la zona norte, las posibilidades de heladas severas son menores y se desea utilizar las lluvias invernales en el proceso de germinación y crecimiento de espino.

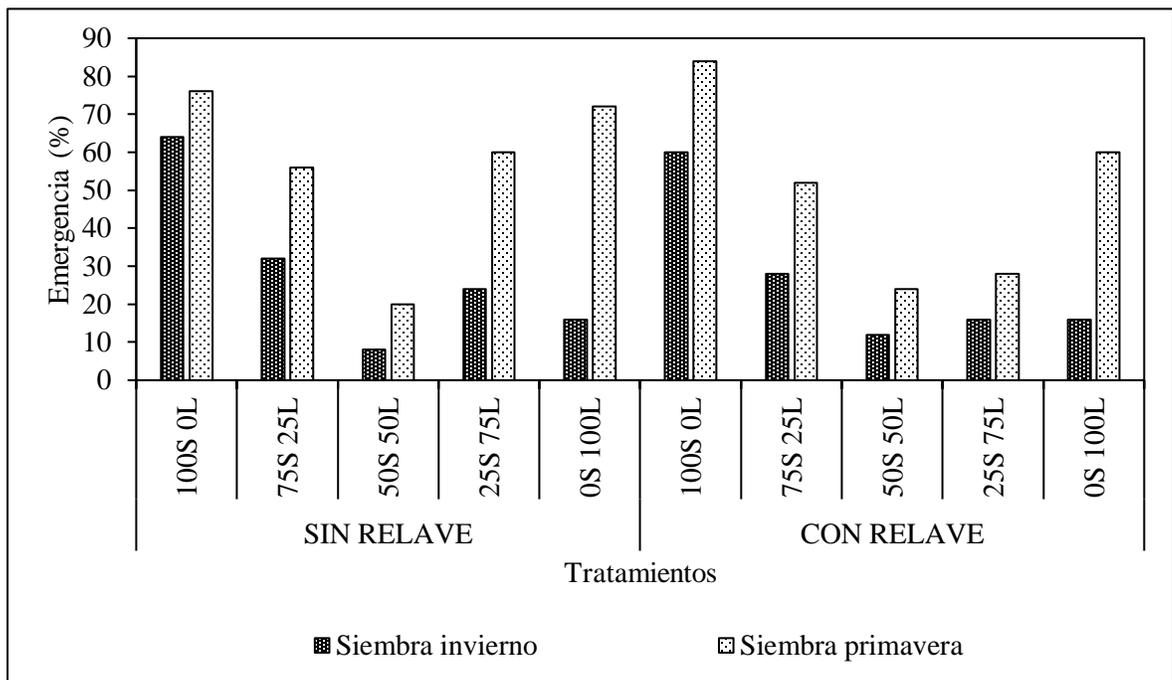


Figura 5. Porcentaje de emergencia de los individuos de espino a lo largo del ensayo sin contar mortalidad. S = sedimento, L = lodo.

Como se puede observar en la figura 5, el menor porcentaje de plantas emergidas en ambas siembras fue en la mezcla 50% sedimento y 50% lodo. Esto puede ser debido al arreglo espacial de los agregados y partículas individuales de los diferentes materiales, sometidos a los ciclos de humectación y secado (Seguel y Horn, 2006). Por un lado, los agregados de lodo son considerablemente más grandes y estables (Cuevas *et al*, 2006) que los observados en los sedimentos, así es que se espera una mayor porosidad gruesa que el sedimento (Antipa *et al*, 2017), lo cual permitiría que en la mezcla las partículas del sedimento se alojen de preferencia en los poros del lodo y de esta manera, se bloquea el paso de aire y raíces dentro de este sustrato fabricado (50S-50L). Por otro lado, los mejores resultados se obtuvieron en 100S-0L con y sin adición de relave con una germinación igual a 76% y 84% respectivamente, también en el tratamiento 0S-100L sin adición de relave con un 72% de germinación, todos estos, para la siembra de primavera, siendo estos valores semejantes e incluso mejores (en el caso de 84%) que en condiciones de laboratorio (Figura 4) por lo que

no se aprecia un efecto físico o químico sobre las plántulas de *Acacia caven* para su emergencia. El sedimento corresponde a un sustrato de textura gruesa (franco arenoso), que favorece la aireación y conductividad térmica, que se traduce en una mejor germinación de las plantas (Moreno-Cassola *et al* 2007). Lo anterior concuerda con lo informado por la FAO (1997) y Benedetti (2012), quienes indican que espinos crece en condiciones edáficas variables como el suelo de textura franco-arenoso, suelos derivados de materiales sedimentarios, entre otros, y se debe mencionar que incluso puede crecer en suelos pobres en materia orgánica. Además, se debe agregar que según González (2005), Castro *et al* (2007) y Henríquez (2011), la adición de lodos al suelo favorece la fertilidad de este aumentando su productividad, no obstante, también indican que podría tener un efecto negativo por su contenido de metales pesados. Ginocchio (2008) comprueba que *A. caven* es altamente tolerante a la presencia de cobre, es decir puede sobrevivir en un contenido de este metal mayor a 500 mg L⁻¹.

3.2. Supervivencia de individuos *Acacia caven*.

Al momento de levantar el ensayo, después de 29 semanas en el caso de la siembra de invierno y 15 semanas para la siembra de primavera, se pudo observar un total de 152 plantas que lograron sobrevivir; 42 de estas pertenecieron a la siembra de invierno y 102 a la siembra de primavera.

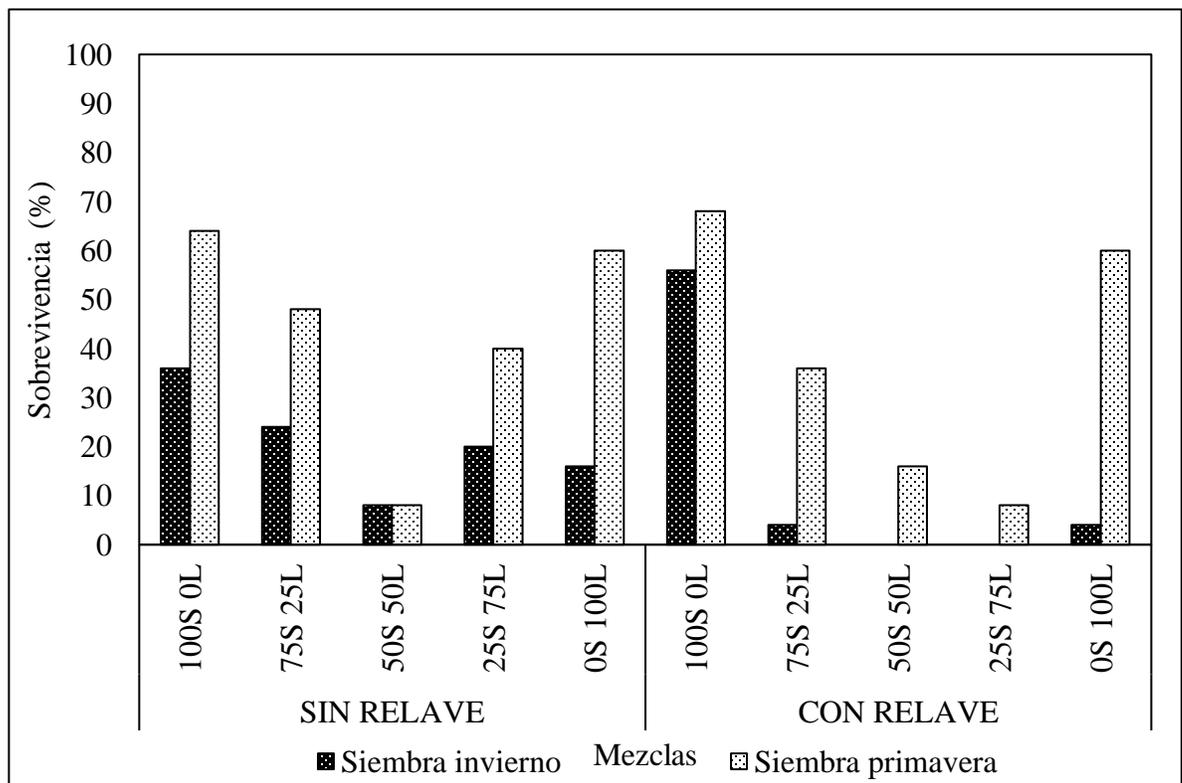


Figura 6. Porcentaje de plantas sobrevivientes de individuos de *Acacia caven* al momento de realizar el levantamiento del ensayo.

La Figura 6 presenta el porcentaje de sobrevivientes por tratamiento por siembra. Es importante mencionar que no existe significancia en la aplicación de relave, sin embargo, se prefirió desplegar los resultados incluyéndolo. Nuevamente, se puede observar que los tratamientos con mayor cantidad de individuos son 100S-0L con y sin aplicación relave y 0S-100L sin aplicación relave, manteniendo su sobrevivencia sobre el 50% de individuos, mientras que los tratamientos 50S-50L con y sin adición de relave y 25S 75L con adición de relave son los que menor porcentaje de sobrevivientes tienen. Esto coincide con lo obtenido en el ensayo realizado en verano de 2019 para el proyecto de gestión de pasivos ambientales del Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (datos no publicados), en donde los tres tratamientos antes mencionados presentaron la emergencia y sobrevivencia más baja en contraste con el resto de los tratamientos con valores establecidos en un rango de 8% a 22% y 2% a 14% respectivamente. Por otro lado, se puede observar un aumento considerable de individuos en la siembra de primavera con respecto a la siembra de invierno, esto ha ocurrido en todos los tratamientos excepto en 50S-50L sin aplicación de relave en donde el porcentaje de sobrevivencia en ambas siembras fue el mismo, es decir 8%. Lo anterior puede estar dado ya que como se mencionó antes, espino normalmente es sembrado en época primaveral (INFOR, 2012).

3.3.1. Crecimiento de individuos de *Acacia caven* de la siembra de invierno.

Se realizaron las pruebas de Levene y Shapiro Wilks para probar homogeneidad de las varianzas y normalidad de los residuos de las variables de respuesta. En ambos casos se rechazó la hipótesis nula por lo que se debió corregir los datos para poder realizar el análisis de varianza, no obstante, no se logró tener datos paramétricos por lo que finalmente se procedió a realizar prueba de datos no paramétricos con la prueba de Kruskal Wallis. Se debe mencionar que las variables de respuesta son DAC, longitud aérea y radicular, también el peso seco y peso húmedo de la parte aérea y radicular de las plantas. La adición de relave no tiene efecto significativo sobre las variables de respuesta, esto quiere decir que no hay diferencia del crecimiento de las plántulas, al aplicar o no relave a las mezclas. No obstante, según el análisis realizado, las distintas proporciones de mezclas de lodo y sedimento si presentan significancia en el crecimiento inicial de las plantas, es decir, influyen en el DAC, Longitud de tallo, longitud de raíz, peso seco del tallo y peso seco de la raíz.

En las figuras 7, 8 y 9 se muestra el efecto que presentan las mezclas sobre el crecimiento promedio de las plántulas. Es de suma importancia mencionar que, para calcular el promedio de los crecimientos se incluyeron las plantas pertenecientes a la misma mezcla independiente de la aplicación de relave.

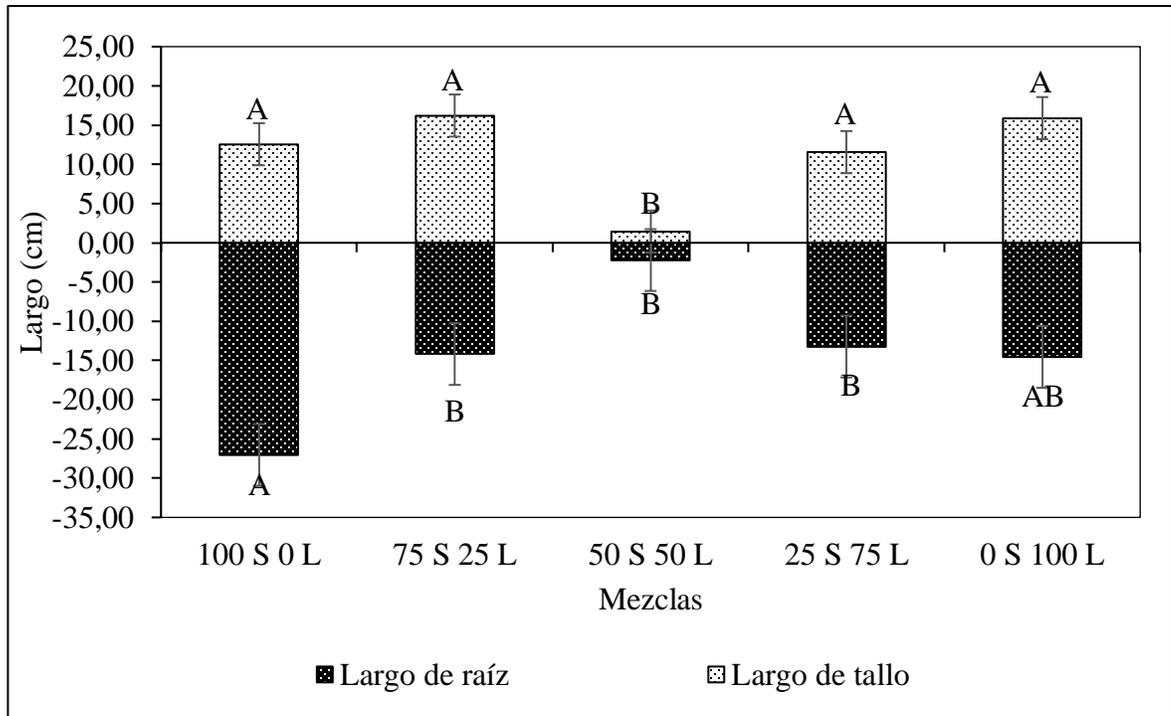


Figura 7. Longitud del tallo y de la raíz. Parámetro medido con regla en centímetros.

En la Figura 7 se observa que el largo promedio del tallo de la mezcla 50S-50L es de 1,43 cm mientras que el promedio del resto de las plantas, oscila entre 11,55 cm y 16,21 cm, encontrándose en el límite superior el tratamiento 75S-25L, esto coincide con Mascaró (2016) quien indica que la aplicación de lodo entre el 10% y 20% es beneficiosa para el aumento en longitud en tallo de las plantas siempre y cuando estas no presenten déficit hídrico ya que en ese caso, el crecimiento sería menor, esto mismo es indicado también por Donoso *et al* (2015). Por otro lado, para la raíz el mismo tratamiento (50S-50L) tiene un largo de 2,20 cm mientras que el resto varía entre el rango de 13,22 cm y 27,04 en promedio.

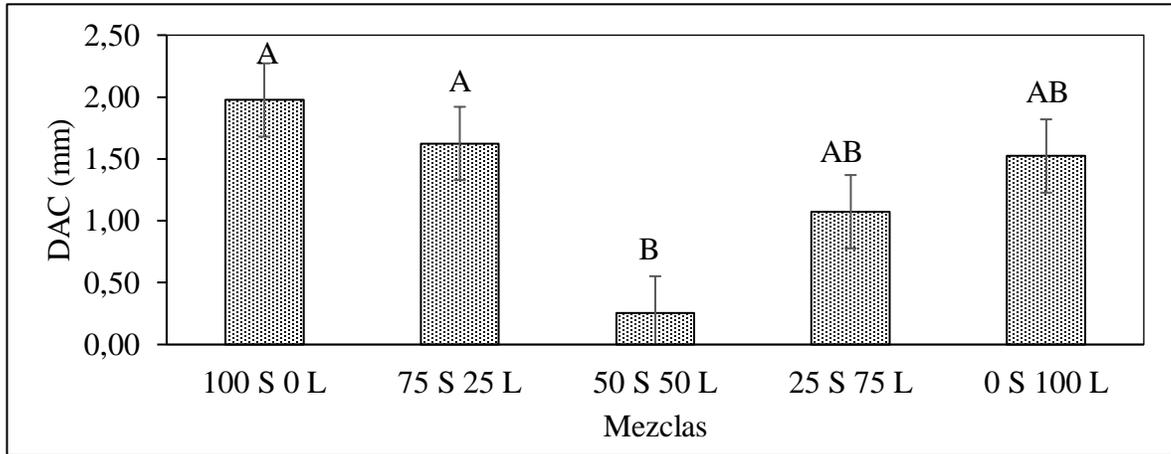


Figura 8. Crecimiento promedio del diámetro de las plantas por mezcla.

Se puede observar en la Figura 8 que la mezcla con mayor DAC son o con un valor igual a 1,98 y 1,62 respectivamente. Por otro lado, el menor DAC está dado para la mezcla 50S-50L con un valor igual a 0,26 mm, esto se contradice con lo establecido por Varela y Martínez, (2013), quienes encontraron un incremento de DAC al realizar la aplicación del 50% de biosólidos a *Nothofagus alpina*, no obstante, esto puede ser debido a la diferencia del material utilizado para el otro 50% del sustrato. Se debe destacar que *N. alpina* y *A. caven* tienen requerimientos diferentes, por lo podrían diferir los resultados.

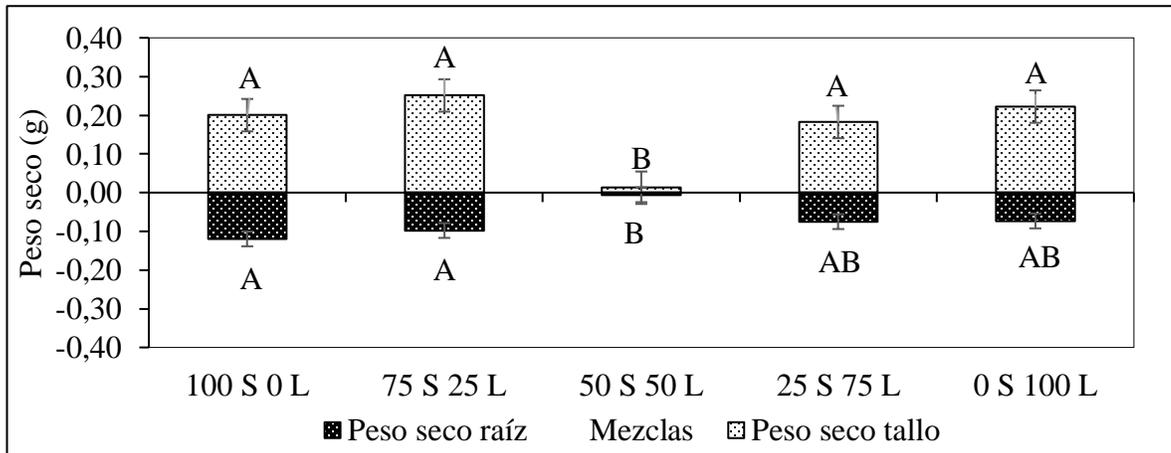


Figura 9. Peso seco de la parte aérea y radicular de las plantas.

La Figura 9 muestra los pesos secos tanto aéreos como radicales. Se puede ver que la mezcla 50S-50L presenta la misma masa seca aérea y radicular, mientras que para el resto de las mezclas, la masa seca radicular es menor que la aérea. Para la mezclas 50S-50L el peso seco aéreo y radicular es 0,01 gramos, mientras que para el resto de las mezclas la masa seca aérea fluctúa entre los 0,18 y 0,25 gramos y la masa seca radicular varía entre 0,07 y 0,12 gramos. Esto nuevamente se difiere con lo obtenido en el ensayo de *Nothofagus alpina*, en donde se añade el 50% de biosólido al sustrato y se obtiene un incremento significativo en la biomasa

de la raíz al igual que en la biomasa del tallo, sin embargo esto puede ser debido a que la densidad aparente de ambos materiales es similar siendo menores a 1 (g/cm³) (Grez *et al*, 1994; Chávez *et al*, 2017) por lo que se mantiene la porosidad de ambos materiales permitiendo así el crecimiento de las raíces (Ingaramo *et al*, 2003) a diferencia del lodo con una densidad aparente de 0,69 (g/cm³) y sedimento con 1,39 (g/cm³) (cuadro 1). Al igual como se mencionó antes, *N. alpina* y *A. caven* no tienen los mismos requerimientos, por lo podrían diferir los resultados.

3.3.2. Crecimiento de individuos de *Acacia caven* de la siembra de primavera.

En esta siembra se obtuvo que la incorporación del relave a los sustratos influye en el crecimiento de las plantas, tanto en longitud aérea, radicular, como en el DAC y en la masa seca del tallo (ver Figuras 10, 11 y 12). Se aprecia que para todas las variables de respuesta el efecto del relave es negativo.

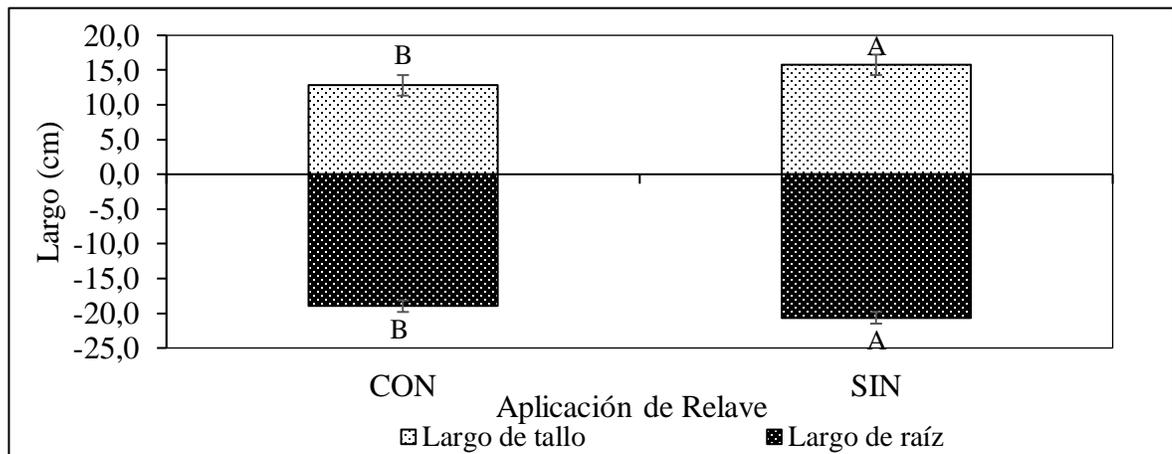


Figura 10. Efecto del relave en el largo de la raíz y tallo de las plantas.

En la Figura 10 se puede observar que existe un largo promedio de 15,75cm para la parte aérea y 20,65 cm para la parte radicular de aquellas plantas de tratamientos que no presentan aplicación de relave, mientras que para aquellos tratamientos que si se les aplicó relave presentan un largo de tallo promedio de 12,8 cm y de 18,98 cm para la parte radicular.

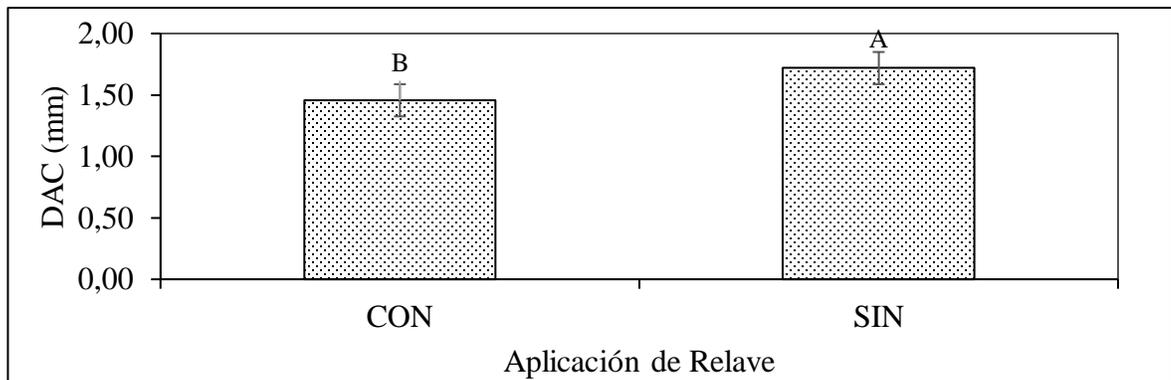


Figura 11. DAC promedio para aquellos tratamientos con y sin adición de relave.

Se puede ver en la Figura 11 que al aplicar relave las plantas disminuyen su DAC promedio con respecto a aquellas plantas que no se les ha aplicado relave.

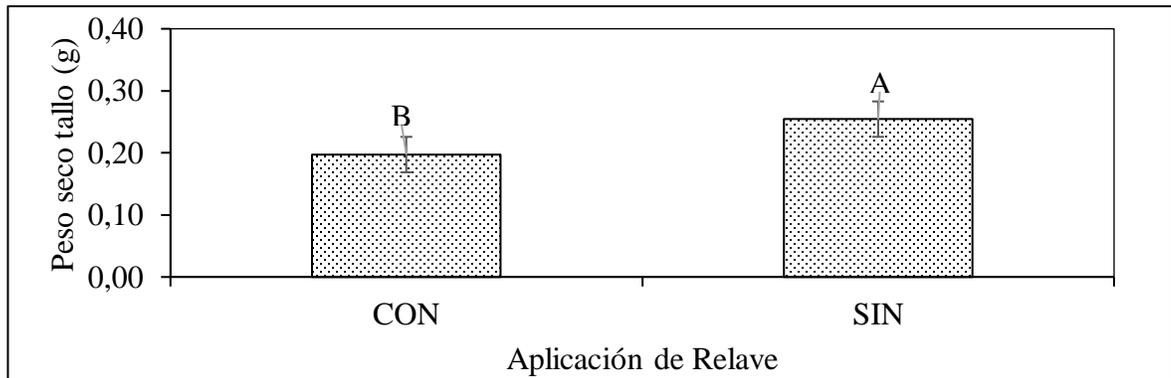


Figura 12. Peso seco del tallo con y sin aplicación de relave.

Se puede observar que las plantas de los tratamientos que se les aplicó relave presentan un peso seco del tallo menor que aquellas plantas provenientes de los tratamientos que no se les aplicó relave.

Según indica Ginocchio (2008), *Acacia caven* es denominada como una especie colonizadora espontánea de depósitos de relaves abandonados y de mineralización de relaves sin embargo se observa que en cuatro variables de respuesta tiene un efecto negativo, puede ser debido al déficit nutritivo que este presenta o bien a los metales. Se debe mencionar que a pesar de presentar un efecto negativo en el crecimiento de las plantas, este no es impedimento para que la especie pudiese sobrevivir.

Por otro lado, también se encontró significancia en el efecto que presentan las mezclas sobre las variables de respuesta (DAC, Largo aéreo, radical, peso seco aéreo y radical). Al igual que en la siembra anterior, es importante mencionar que el crecimiento promedio por mezcla incluye las plantas pertenecientes a los tratamientos con y sin adición de relave.

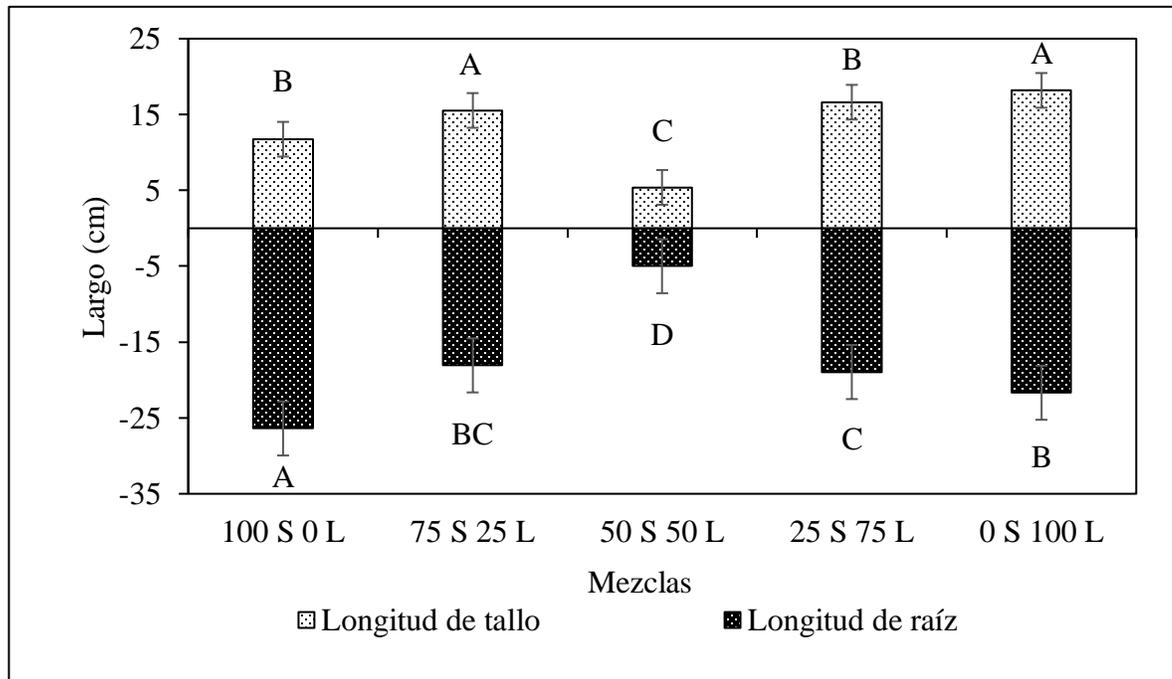


Figura 13. Efecto de mezclas en el largo del tallo y raíz.

El efecto que tienen las mezclas sobre el largo del tallo y de la raíz se puede observar en la Figura 13. Las mezclas que presentan un largo de tallo mayor son 75S-25L y 0S-100L con 15,54 y 18,18 cm respectivamente, mientras que la mezcla 50S y 50L presenta el largo menor con un valor igual a 5,39 cm con una raíz de 4,99 cm. La mezcla 100S-0L presenta una raíz promedio de 26,39 cm siendo esta la más larga para esta siembra.

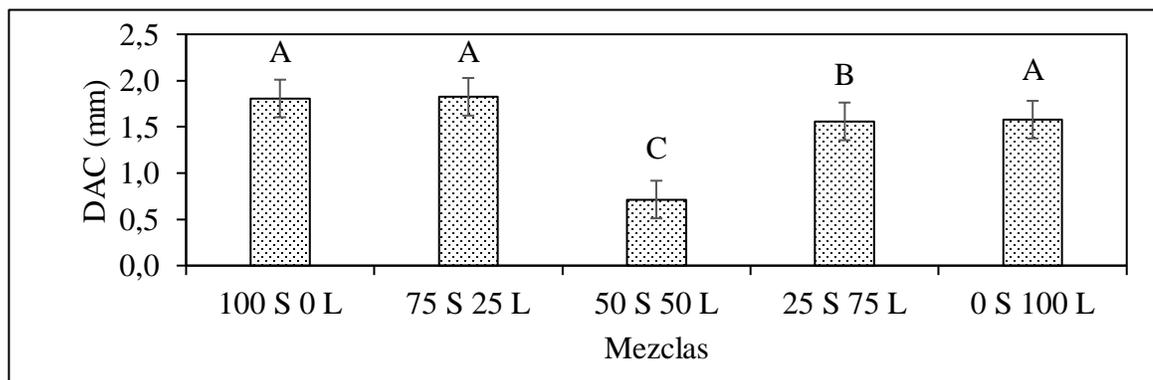


Figura 14. Efecto de las mezclas en el DAC de las plantas.

Se puede observar en la Figura 14 que la mezcla 50S-50L es aquella que presenta un DAC menor con un valor de 0,71 mm mientras que el resto de las mezclas varía con un DAC promedio que se encuentran definido por el rango 1,56 y 1,82 mm.

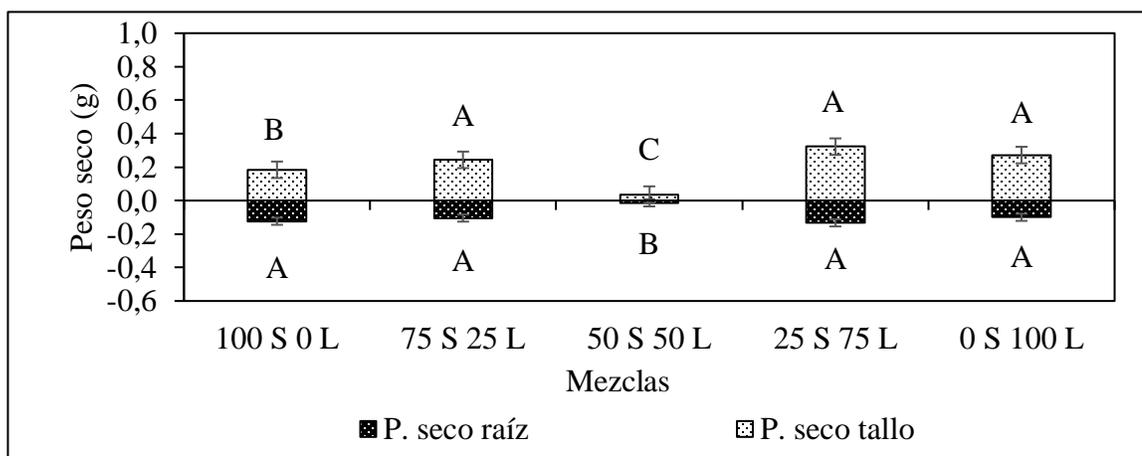


Figura 15. Efecto de las mezclas en peso seco del tallo y raíz de las plantas.

Por último, para las mezclas nuevamente se puede observar en la Figura 15 que la mezcla 50S-50L es aquella que presenta menor masa seca tanto como para el tallo como para la raíz. Por otro lado, se observa que la mezcla 75S-25L es aquella que presenta una mayor masa seca aérea.

Lo anterior, continúa mostrando el mismo patrón observado en la siembra de invierno, en donde las plantas provenientes de la mezcla 50S-50L presentan un menor crecimiento tanto para el DAC como para el largo de tallo, largo de raíz, peso seco aéreo y radicular. Para esto, se tiene la misma explicación anterior, el lodo se distribuye como agregados formando de esta manera poros de un mayor tamaño, mientras que el sedimento se presenta en partículas individuales por lo que le podría distribuirse entre los poros dejados por el lodo, disminuyendo de esta manera la aireación del sustrato (Seguel y Horn, 2006; Antipa *et al*, 2017) siendo esto una limitante para el crecimiento de las raíces (Ingaramo *et al*, 2003) y por ende para el crecimiento de la planta.

En cuanto al efecto combinado de las mezclas con y sin adición de relave para esta siembra, arrojó ser significativo, es decir, tiene efecto en el crecimiento de las plantas en DAC, largo aéreo, radical, peso seco parte aérea y peso seco parte radicular.

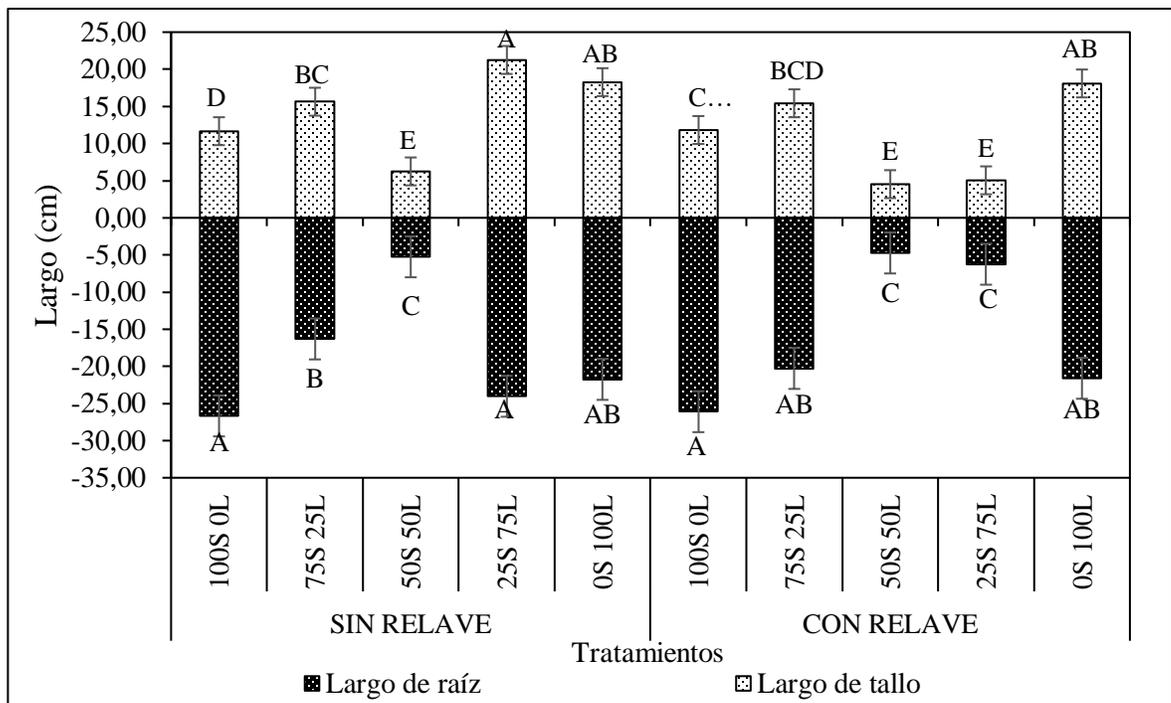


Figura 16. Crecimiento de longitud de tallo y raíz de plantas por tratamiento.

Se puede observar en la Figura 16 que los tratamientos 50S-50L con y sin aplicación de relave y 25S-75L sin aplicación de relave presentan los valores más bajos para el largo de raíz y tallo. Por otro lado, se debe destacar el tratamiento 25S-75L sin aplicación de relave ya que presenta un largo promedio de raíz más alto con un valor igual a 24,03 cm y el promedio de largo de tallo más alto con un valor igual a 21,25 cm.

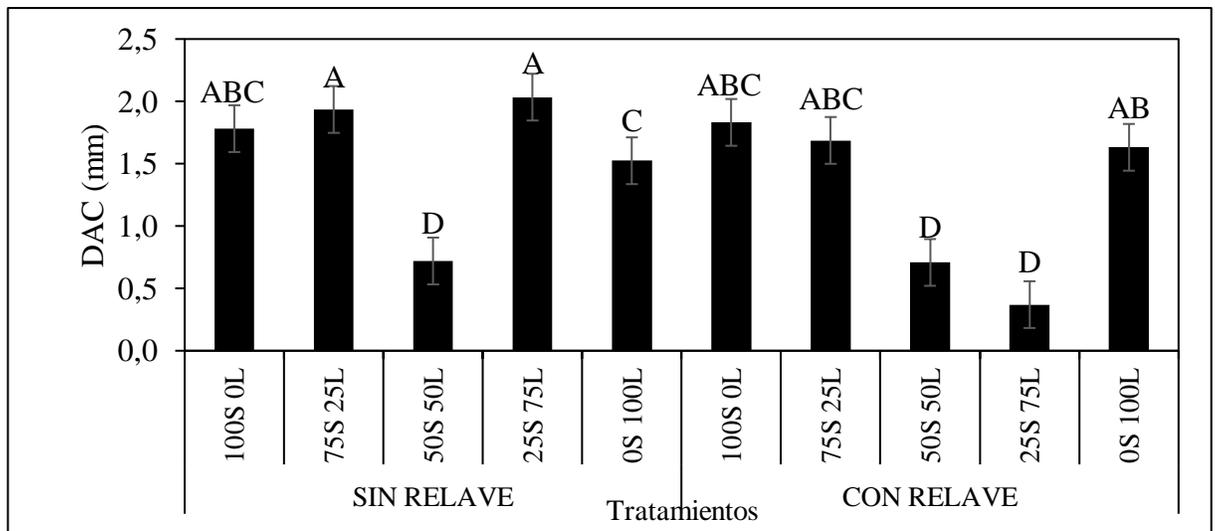


Figura 17. Crecimiento en DAC de las plantas por tratamiento.

Se puede observar (Figura 17) que las plantas que presentan un mayor DAC son aquellas que se encuentran en los tratamientos 75S-25L y 25S-75L para ambos casos sin adición de relave. Por otro lado, el tratamiento con el menor DAC es 25S-75L con adición de relave.

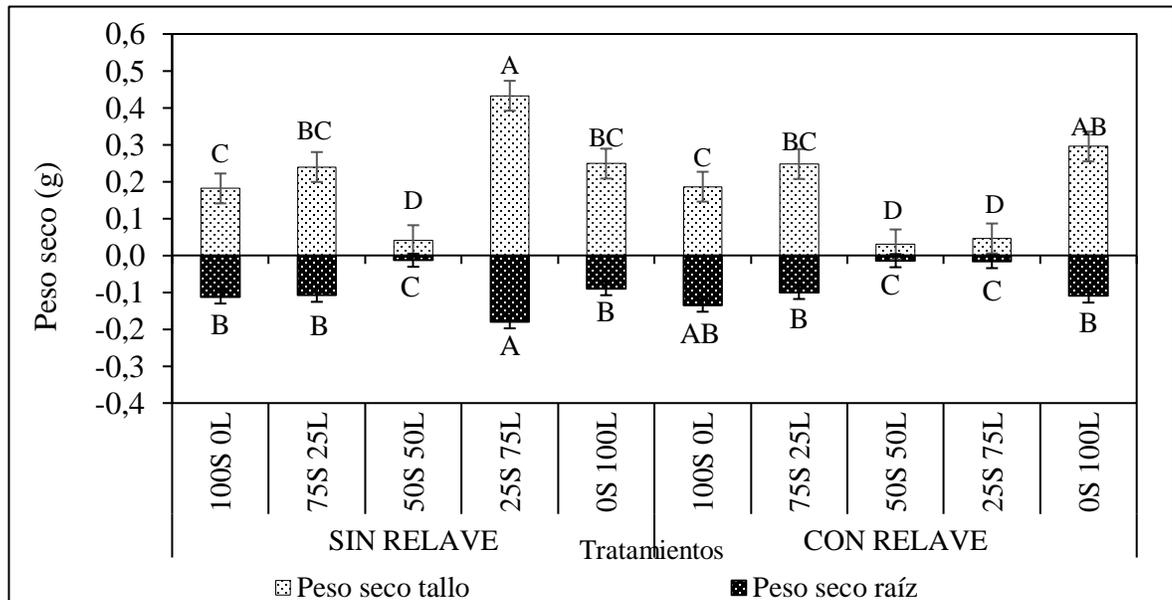


Figura 18. Peso seco aéreo y radical de las plantas por tratamiento.

Nuevamente se puede observar (Figura 18) el mismo patrón visto anteriormente en donde los tratamientos con los valores menores son 50S-50L con y sin aplicación de relave y 25S-75L sin adición de relave.

Los resultados antes vistos pueden ser debido a como se explicó antes para el caso de la mezcla 50S-50L. El tratamiento 25S-75L con aplicación de relave debe presentar una estructura similar a la mezcla 50S-50L ya que el sedimento y relave presentan el mismo comportamiento. Estos se distribuyen en partículas individuales mientras que el lodo se presenta en agregados, es por esto, que se piensa que el sedimento y relave se alojan entre los agregados de lodo reduciendo de esta manera la porosidad en el sustrato lo cual impide el crecimiento radicular y junto con esto el crecimiento de la parte aérea. Lo anterior coincide con lo mencionado en Ingaramo *et al*, (2003) y Angella *et al* (2016) quienes indican que una de las propiedades físicas de suelo más importante para el crecimiento de plantas es la porosidad de este ya que ahí es donde se almacena agua y también es de donde las raíces obtienen oxígeno.

Se puede observar también en la Figura 16, 17 y 18, que el tratamiento 25S-75L sin adición de relave, es el que presenta promedios más altos en todas las variables de respuesta por lo que podría considerarse un buen sustrato para *A.caven*.

3.3. Análisis de scanner de raíces

3.3.1 Raíces de los individuos de *Acacia cavendishii* de la siembra de invierno.

El efecto combinado de las mezclas más la adición de relave fue significativo para las raíces, esto indica que presente efecto en el crecimiento tanto en la longitud total, como área y volumen de las raíces según su tratamiento. Se debe mencionar que la longitud total de las raíces es la suma de la longitud de las raíces primarias y secundarias de cada planta.

En las Figuras 19, 20 y 21 se puede ver el mismo patrón visto anteriormente, en donde 50S-50L presentan los valores más bajos e inclusive no sobrevivieron plantas en este con aplicación de relave.

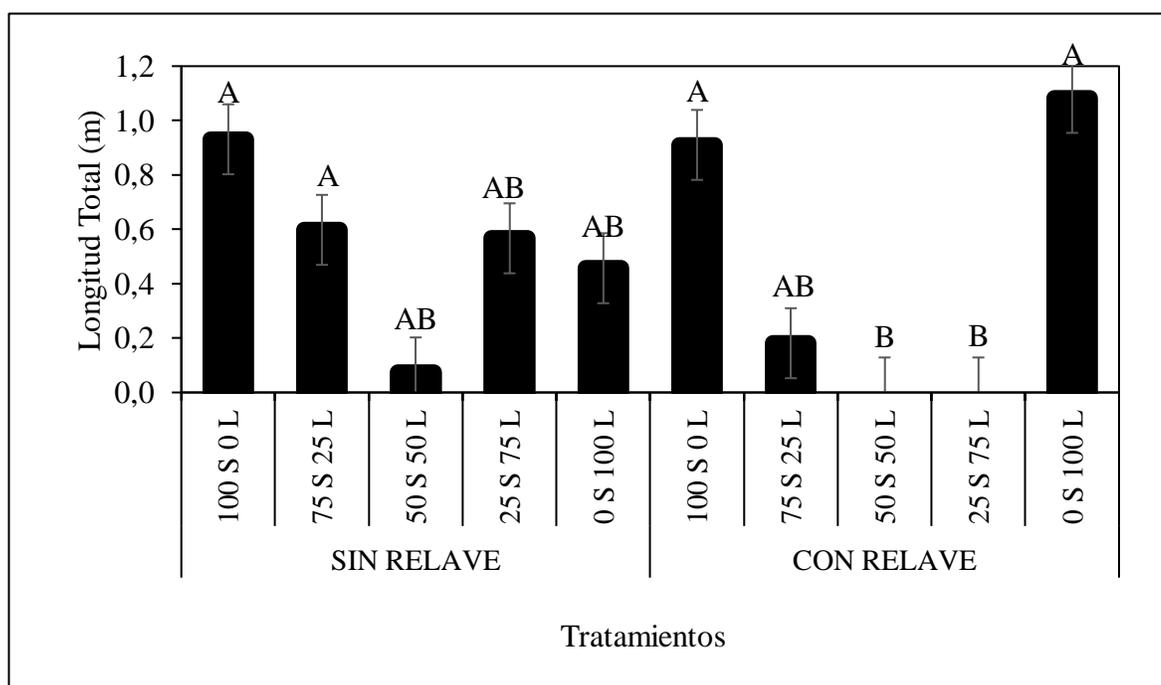


Figura 19. Longitud total de la raíz por tratamiento.

Para la figura 19 se puede observar que 100S-0L con y sin aplicación de relave y 0S-100L con aplicación de relave presentan una mayor longitud total de raíz con respecto al resto de tratamientos.

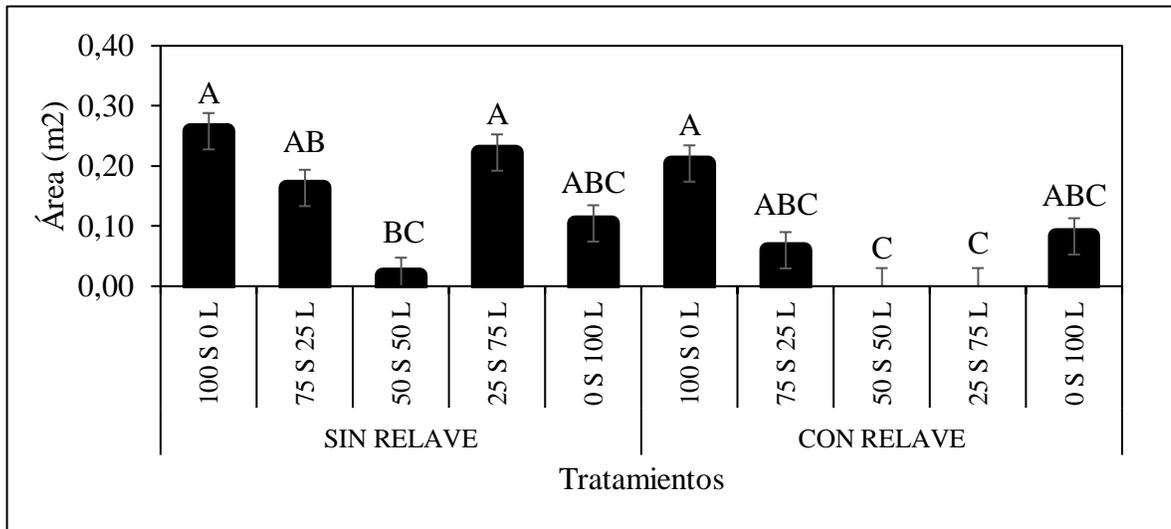


Figura 20. Área de las raíces por tratamientos.

Se puede observar en la Figura 20 que el tratamiento que presenta un área de raíz mayor es 100S-0L con un valor igual a 0,26 m², seguida por el tratamiento 75S-25L con un área igual a 0,22 m².

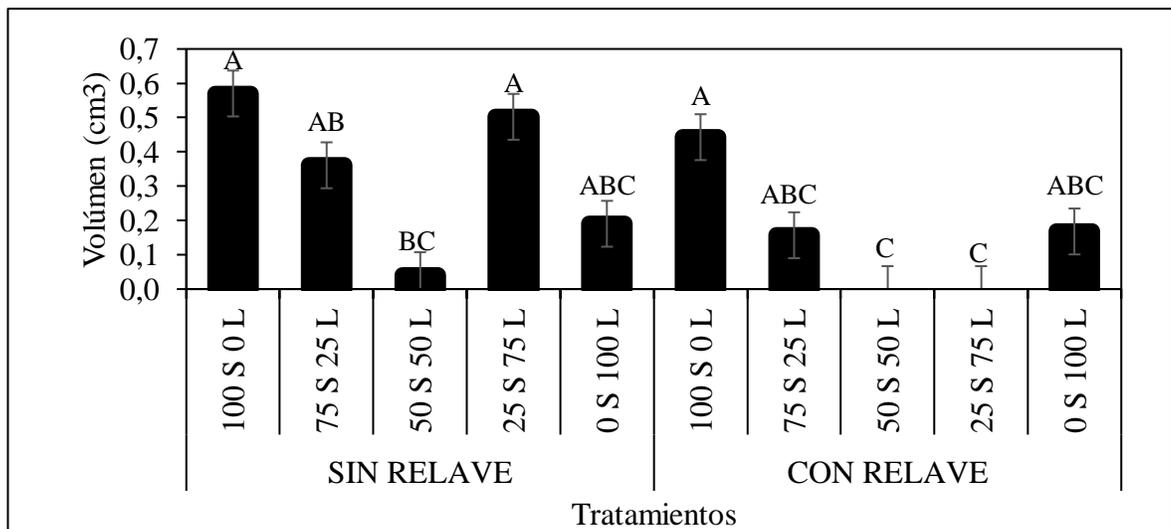


Figura 21. Volumen de las raíces por tratamiento

En la Figura 21 se pueden observar que los tratamientos 100S-0L con y sin aplicación de relave y 25S-75L sin aplicación de relave presentan los valores mayores de volumen de raíz.

3.3.2 Raíces de individuos de *Acacia caven* de la siembra de primavera

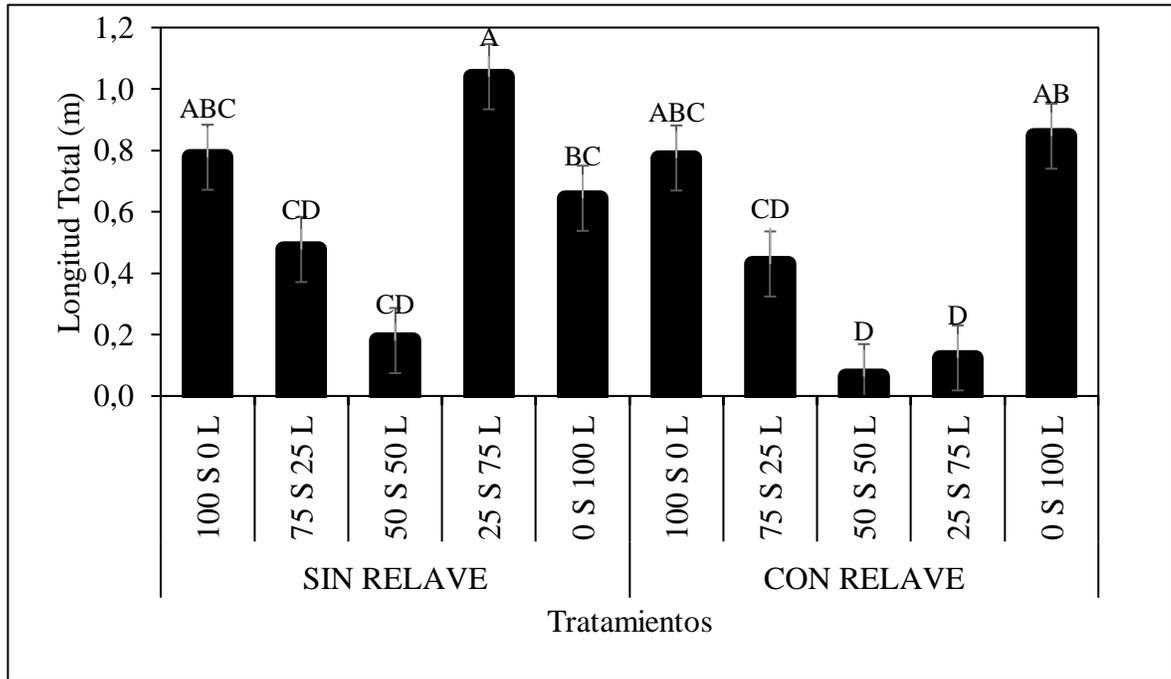


Figura 22. Longitud total de las raíces por tratamiento.

Para esta siembra en la Figura 22 se puede observar que el tratamiento 25S-75L sin adición de relave, presenta una longitud total mayor que el resto con un valor igual 1,04 metros.

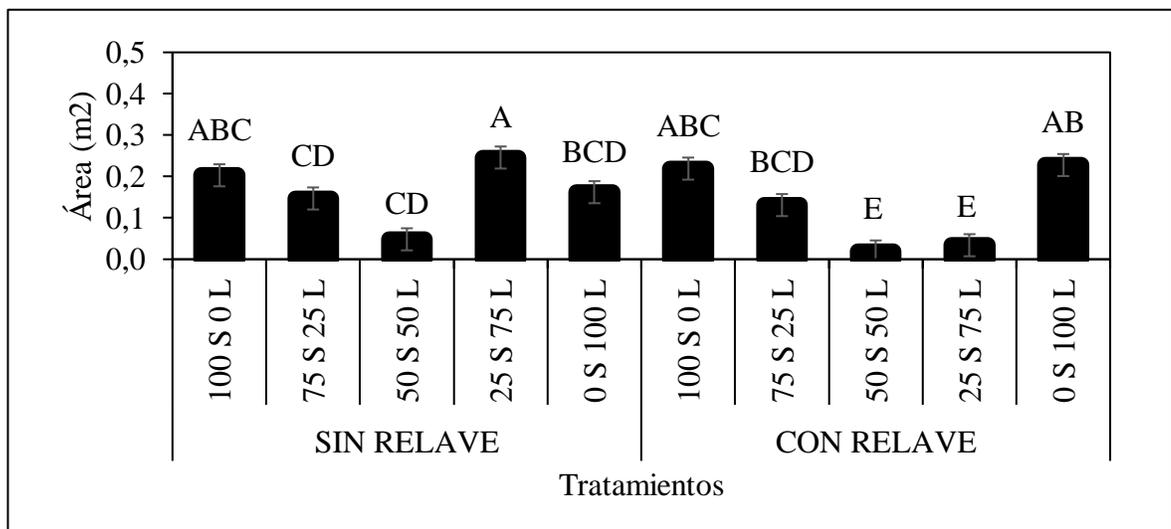


Figura 23. Área de las raíces por tratamiento.

En la Figura 23 se observa que el tratamiento que presenta mayor área de raíces es 25S-75L sin aplicación de relave, mientras que esta misma mezcla con aplicación de relave presenta los valores más bajos.

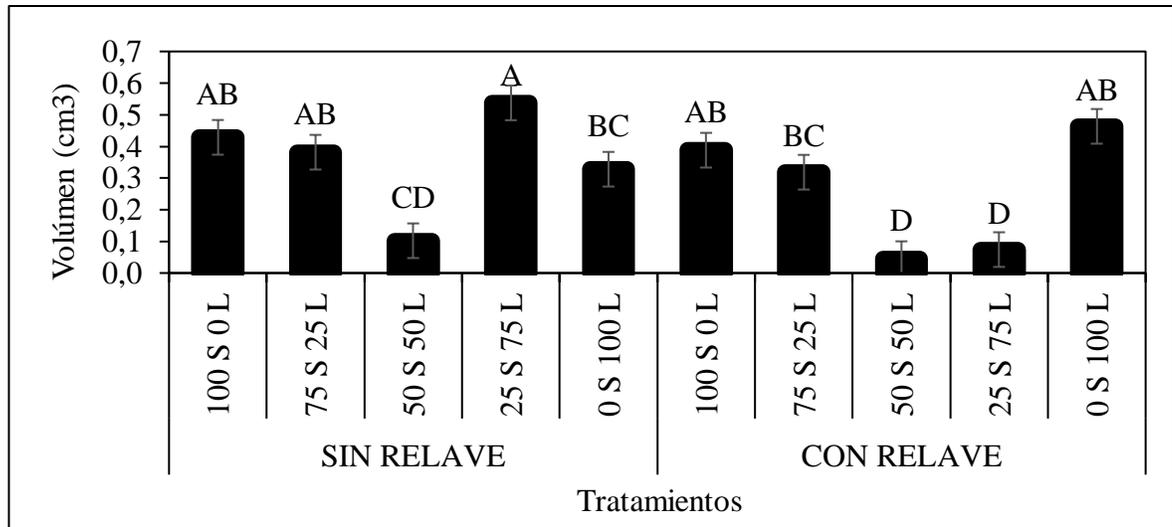


Figura 24. Volumen de raíces por tratamiento.

En la Figura 24 se observa que el tratamiento que presenta un mayor volumen de raíces es 25S-75L sin adición de relave.

En la siembra de invierno se obtuvo que los tratamientos con mejores resultados, es decir mayor crecimiento en longitud total, área y volumen de las raíces fueron 100S-0L, con y sin aplicación de relave, 0S-100L con aplicación de relave y 25S-75L sin aplicación de relave mientras que para la siembra de primavera el tratamiento 25S-75L presentó los valores más altos en todas las variables de respuesta, esto puede ser ya que presenta una proporción justa de materiales siendo el lodo quien aporta la materia orgánica y el sedimento quien mantiene la humedad del sustrato sin inhibir los poros de las plantas ya que presenta una baja porción de este.

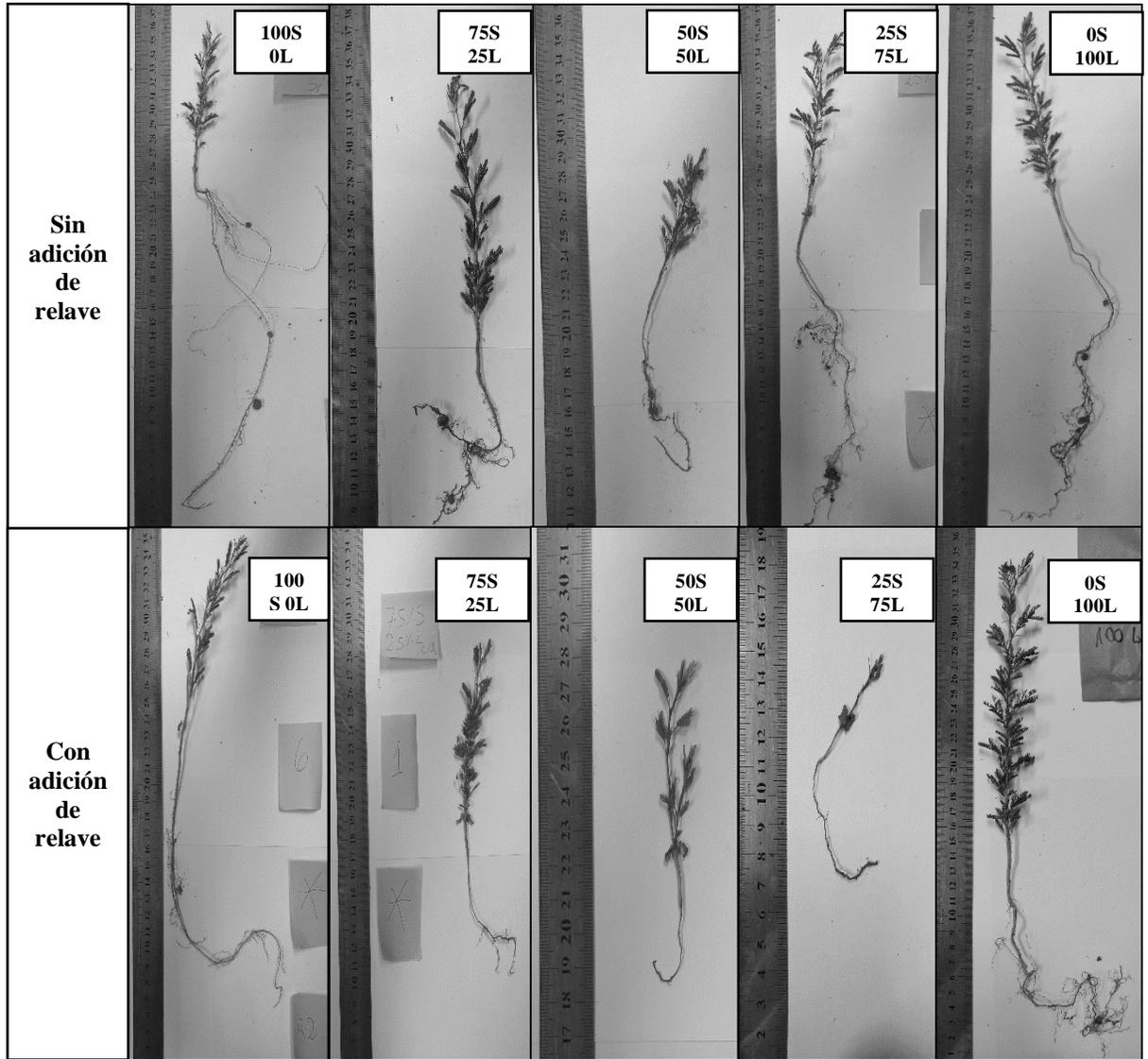


Figura 25. Plantas obtenidas en ensayo. Se seleccionó una planta promedio por tratamiento.

3.4. Calidad inicial de los individuos de *Acacia caven* en condiciones de invernadero.

Para definir la calidad de las plantas, mediante el análisis estadístico se obtuvo que existe efecto combinado de las mezclas y la aplicación de relave en el índice de esbeltez (IE) solo para la siembra de invierno, mientras que para la siembra de primavera solo existe efecto de las mezclas. Por otro lado, para el índice tallo raíz (ITR) existe un efecto combinado de las mezclas y la aplicación de relave para la siembra de primavera, mientras que para la siembra de invierno solo existe efecto significativo en las mezclas. Por último, se evidenció que existe efecto significativo en el efecto combinado de las mezclas y relave para el índice de Dickson (IC).

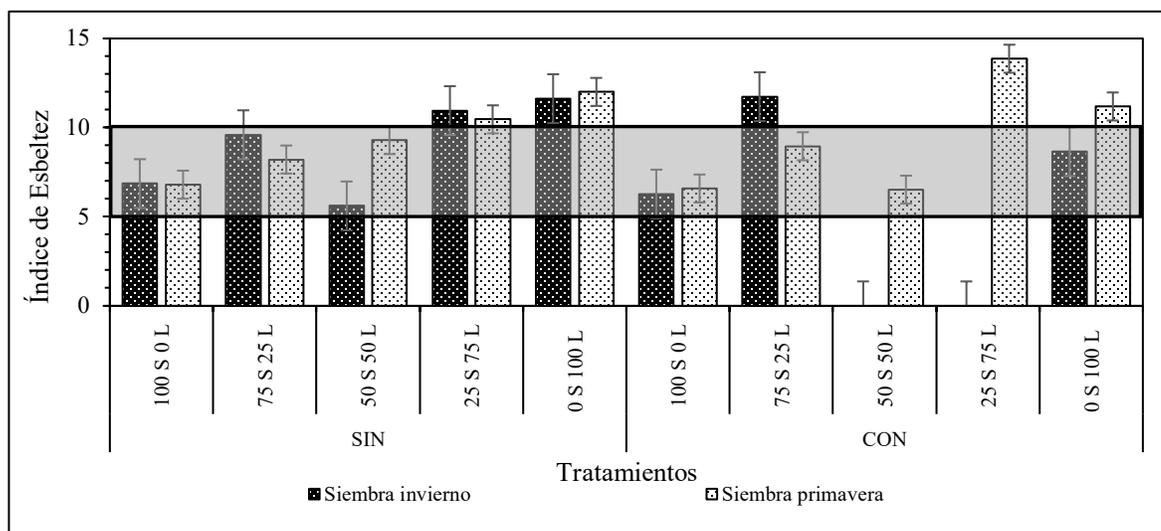


Figura 26. Índice de esbeltez (IE) por tratamientos por siembra. El recuadro muestra el rango óptimo del índice de esbeltez.

En la figura 26 se presentan los índices de esbeltez por tratamientos por siembra. Según indica Quiroz *et al* (2009) el óptimo para una planta de buena calidad debe encontrarse en un rango de IE de 5-10; Utilizando el este rango (5-10) para la siembra de invierno, se puede observar que los tratamientos 100S-0L, 75S-25L, 50S-50L sin adición de relave y 100S-0L, 0S-100L con adición de relave presentan un buen IE, es decir se encuentra dentro del rango establecido mientras que, para la siembra de primavera se puede observar que los tratamientos con buen IE (IE = 5 a 10) son 100S-0L, 75S-25L y 50S-50L con y sin adición de relave. Por otro lado, García y Hernández (2015) mencionan que una planta de buena calidad debe presentar un IE menor a 6, de calidad media un IE entre 6-8 y, de baja calidad un IE mayor a 8. Dentro del criterio recién mencionado, con buena calidad solo podrían presentarse las plantas que se encuentran en el tratamiento 50S 50L de la siembra de invierno mientras que de calidad media se puede observar los tratamientos 100S-0L con y sin adición de relave para ambas siembras.

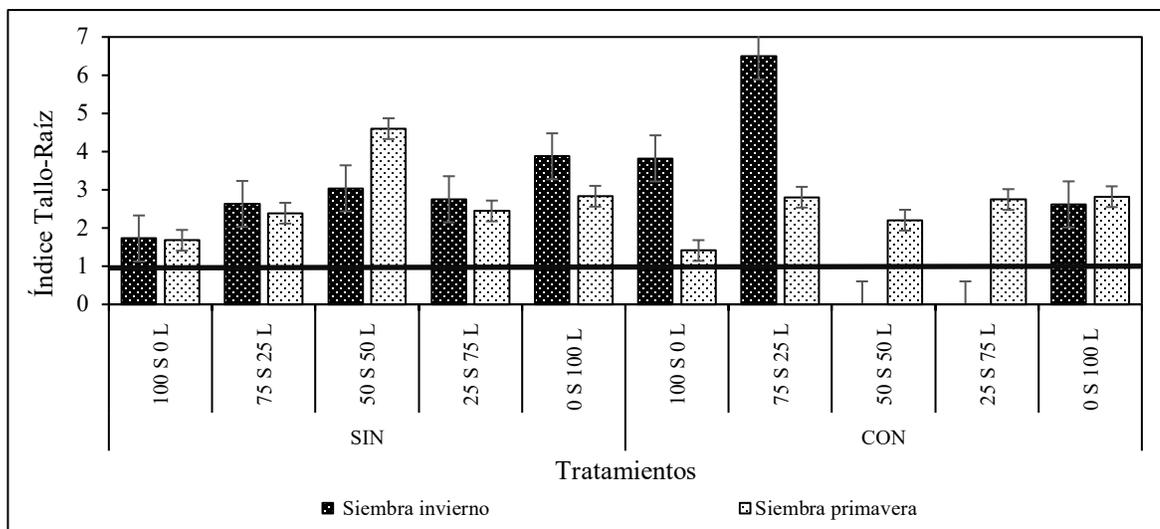


Figura 27. Índice tallo-raíz por tratamiento por siembra. La línea muestra el óptimo (1).

En la Figura 27, se puede observar que los tratamientos que más se acercan a la línea que indica el valor óptimo del índice tallo-raíz son 100S-0L sin adición de relave para la siembra de invierno y 100S-0L con y sin adición de relave para la siembra de primavera. Este índice de calidad de planta es de relevancia ya que indica el balance hídrico de la planta como lo indica Bernier *et al*, (1995) quien afirma que una superficie foliar que transpira requiere de una cantidad de raíz que pueda absorber el agua que se elimina, por lo que es importante que no exista gran diferencia entre la biomasa de la raíz y la biomasa del tallo (Quiroz *et al*, 2009).

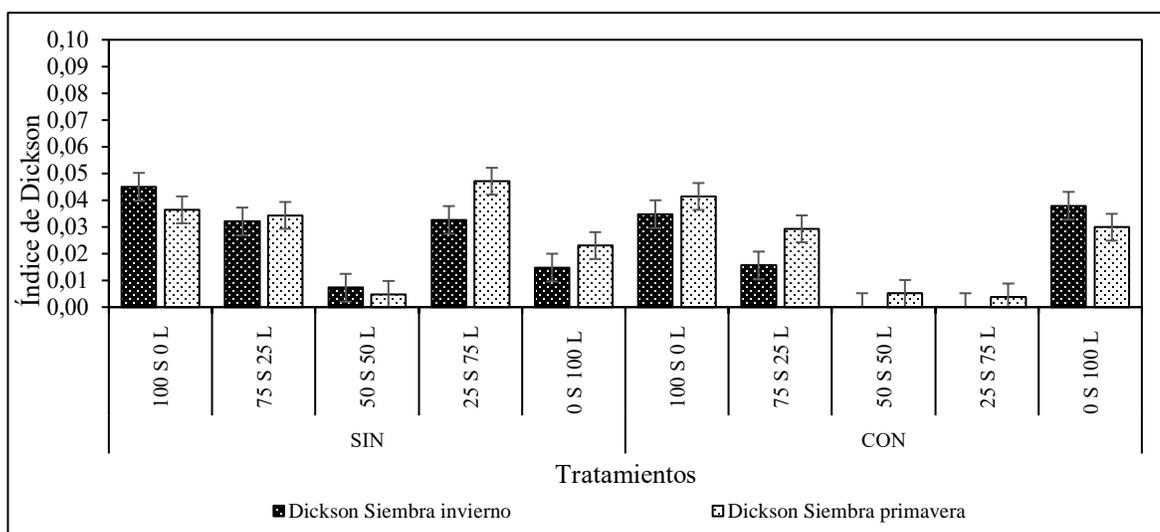


Figura 28. Índice de Dickson por tratamiento por siembra.

En la Figura 28 se observa que los valores más alto del índice de Dickson son los tratamientos 100S-0L sin relave para la siembra de invierno y 25S-75L sin relave para la siembra de primavera, sin embargo, ninguna cumple con el valor mínimo (0,2) que define una planta de buena calidad (Quiroz *et al*, 2009; Quiroz *et al*, 2011; García y Hernández, 2015).

Por lo anterior se podría determinar que el tratamiento que presentó plantas de mejor calidad fue 100S-0L sin aplicación de relave, esto es considerando los rangos establecidos por Quiroz *et al* (2009).

4. CONCLUSIONES

Acacia caven habitualmente presenta un alto porcentaje de germinación si se realizan los tratamientos pregerminativos adecuados, sin embargo, esto depende también de la calidad de semillas obtenidas. Mediante el ensayo realizado en laboratorio, se obtuvo un porcentaje mucho más bajo que el establecido por otros ensayos 79% versus 96% respectivamente.

El máximo de plantas que sobrevivieron en el ensayo establecido fue encontrado en los materiales por sí solos, es decir 100S-0L y 100L-0S con un 66% y 60% respectivamente. Adicionalmente, el máximo de las plantas que emergieron durante el ensayo sin contar la mortalidad fue encontrado nuevamente en aquellas mezclas en donde estaban los materiales sin mezclar, en este caso el porcentaje fue levemente mayor en 100S-0L y 100L-0S con un 80% y 66%, es por esto que se puede inferir que tanto el lodo como sedimento por sí solos, pueden ser buen sustrato para espino. Por otro lado, se debe mencionar que la mezcla 50S-50L no fue un buen sustrato para dicha especie, ya que el valor de emergencia y sobrevivencia fueron los más bajos del experimento. Se obtuvo una emergencia de 12% y 8% para la siembra de invierno con y sin aplicación de relave respectivamente y para la siembra de primavera, un 24% y 20% con y sin aplicación de relave respectivamente. Por otro lado, para la misma mezcla sin aplicación de relave la sobrevivencia fue de un 8% para ambas siembras y con aplicación de relave la sobrevivencia fue un 0% para la siembra de invierno y de un 16% para la siembra de primavera.

El tratamiento 25S-75L sin relave de la siembra de primavera presenta buen crecimiento para las variables de respuestas analizadas, incluyendo el análisis de raíces. Por lo que se considera este un buen tratamiento para la siembra de individuos de *Acacia caven*. Además, se debe mencionar que esto ayudaría también con la reducción de los desechos sanitarios dándole un uso para la rehabilitación de relaves mineros. También se debe mencionar que los materiales por sí solos (lodo y sedimento) mostraron buenos resultados.

Por último, evaluando los índices de calidad de planta la mezcla 100S-0L da resultado plantas de buena calidad, sin embargo, se busca utilizar también los biosólidos por lo que podría tomarse en consideración el tratamiento antes mencionado 25S-75L sin adición de relave debido a que presenta uno de los índices de Dickson más altos dentro de los valores obtenidos y se encuentra en calidad media considerando el índice tallo raíz.

Se debe mencionar que, se observó una mezcla (25S-75L) que se vio afectada notablemente por la adición de relave ya que disminuyó tanto el número de sobrevivientes como en crecimiento de las plantas que lograron sobrevivir. No obstante, para el resto de los tratamientos y tomando como referencia la siembra de primavera, espino demostró no presentar problemas para sobrevivir ante la incorporación de relave.

Se recomienda utilizar el tratamiento 25S-75L sin aplicación de relave para utilizar ambos materiales en la rehabilitación del depósito de relaves mineros. Es importante mencionar que en campo, este sustrato debe disponerse sobre el depósito de relave, es decir, no se le debe incorporar el relave ya sea con arado u otra herramienta ya que de esta manera el crecimiento de plantas se podría ver afectado como se vio en la siembra de primavera del ensayo

realizado. Por lo anterior, sería interesante tener conocimiento de la respuesta de las raíces de las plantas una vez llegando al relave.

5. BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA, M. 2001. Formulación de un protocolo de trabajo para el análisis de semillas de especies leñosas nativas. Memoria Ingeniería Forestal. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de ciencias forestales. 87p

AGUAS ANDINAS. 2018. Reporte integrado. Santiago. 322p.

ASTUDILLO, F. 2011. Controles Determinantes en la geoquímica y mineralogía de los sedimentos fluviales activos en la cuenca del Río Limarí – IV Región de Coquimbo, Chile. Memoria Geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 164p.

ALVARADO, A.; BALDINI, A., y GUAJARDO, F. 2013. Árboles Urbanos de Chile. [En línea]. <http://www.conaf.cl/cms/editorweb/institucional/Arboles_urbanos_de_Chile-2da_edicion.pdf>. [Consulta: 27 mayo 2019]

ANTIPA, Z.; NIELSEN J.; CLUNES, J., y DÖRNER, J. 2017. Efecto de la aplicación de lodo de salmón en la calidad estructural de un Ultisol. Agro Sur 45(2): 73-82.

BENEDETTI, S. 2012. Monografía de Espino “*Acacia caven* (Mol.) Mol. Santiago, Instituto Forestal. 71p.

BETANCOUR, M., y MALDONADO, P. 2013. Minería en Chile: Impacto en regiones y desafíos para su desarrollo. 257p.

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

BOLAÑOS, D. 2014. Aplicación de tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectados por actividades de obras civiles, urbanas y minería. Tesis de doctorado en Medio Ambiente y Recursos Naturales. Santiago de Compostela, Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Biología. 482p.

CASTRO, C.; HENRÍQUEZ, O., y FREDES, 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.

CHÁVEZ, A.; VELÁZQUEZ, Y., y CASALLAS, N. 2017. Características físico-químicas de humus obtenido de biosólidos provenientes de procesos de tratamientos de aguas residuales. Revista Informador Técnico 81(2): 122-130.

CUEVAS, J.; SEGUEL, O.; ELLIES, A., y DÖRNER, J. 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 6(2): 1-12.

DONOSO, S.; PEÑA-ROJAS, K.; PACHECO, C.; DURÁN, S.; SANTELICES, R., y MASCARÓ C. 2015. The physiological and growth response of *Acacia caven* under wáter stress and the aplication of different levels of biosolids. *Ciencia e Investigación Agraria* 42(2):273-283.

ESVAL. [s.a]. Aguas Servidas. [En línea]. <<http://portal.esval.cl/educacion/el-agua/aguas-servidas/>>. [Consulta: 24 mayo 2019]

FUCHSLOCHER, R. 1991. Apuntes curso Laboratorio Producción Animal. Instituto de Producción Animal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 13 p.

GARCÍA, J., y HERNÁNDEZ, J. 2015. Calidad de planta en el vivero forestal La Dieta, Municipio Zitácuro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(27):72-89.

GARCÍA-CHEVESICH, P. 2015. Manejo de sedimentos en embalses. En: Control de la Erosión y Recuperación de Suelos degradados. Estados Unidos, Editorial Outskirts Press. pp. 421-432

GINOCCHIO, R. 2008. Uso de Recursos Fitogenéticos Nativos para la Fitoestabilización de Relaves Mineros en la Región de Coquimbo. [En línea]. <http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/3150/04CR9IXD-01_ITF.pdf?sequence=1>. [Consulta: 28 mayo 2019]

GONZÁLEZ, S. 2005. Conclusiones del Proyecto “Valorización de Lodos como Fertilizantes”. En: Seminario: GONZÁLEZ, S.; TAPIA, F., y RUIZ R.(Eds). Uso benéfico de lodos. Proyecto: Valorización de lodos como fertilizantes. Serie Actas INIA 27. Santiago, Chile. 85-90 pp

GREZ, R.; GERDING, V., y MOYA, J. 1994. Sustratos de pumicita y de suelo trumao con humus de corteza: Una alternativa para el reciclaje de un residuo industrial. *Revista Bosque* 15(2): 19-24.

HENRÍQUEZ, O. 2011. Análisis y criterios mínimos para la aplicación de lodos tratados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas en agrosistemas de la provincia de Melipilla, Región Metropolitana, Chile. Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. 154p.

INGARAMO, O.; PAZ-GONZÁLEZ, A., y DUGO-PATON, M. 2003. Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo en el NO de la Península Ibérica. 5p.

INSTITUTO FORESTAL DE CHILE (INFOR). 2012. Espino *Acacia caven*. [En línea]. <http://transparencia.minagri.gob.cl/descargas/2012/medios/INFOR/ficha_Acacia_Metodo_de_propagacion.pdf>. [Consulta: 22 mayo 2019]

MARTIN, M.; CASTRO, M.; SEMA, T., y RODRIGUEZ, E. 2014. Tecnosuelos a partir de lodos edar para la recuperación de suelos degradados. [En línea]. <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/Paneles/1896711957_panel.pdf>. [Consulta: 22 mayo 2019].

MASCARÓ, C. 2016. Evaluación de la interacción de diferentes niveles de déficit hídrico y aplicación de biosólidos sobre respuestas fisiológicas y de crecimiento en *Acacia caven* (Mol.) Mol. Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. 50p.

MINISTERIO DE MINERÍA. 2018. Tipos de minerales. [En línea]. <<http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/tipos-de-minerales/>>. [Consulta: 31 octubre 2019].

MORALES, C., y ROJAS, R. 2010. Análisis del manejo operacional para escenarios críticos del embalse La Paloma. Memoria de Ingeniero Civil. La Serena, Universidad de la Serena, Facultad de Ingeniería. 198 p.

MORENO-CASSOLA, P.; INFANTE MATTA, D. y MADERO-VEGA, C. 2007. Germination and survival of two species of acahual tropical dry forest to restor coastal dunes. *Revista Mexicana de las Ciencias del Suelo* 2(6): 16-36.

OBLASSER, A. 2016. Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras. Santiago, Naciones Unidas. 107p.

OLIVARES, A. 2016. El espinal: Manejo silvopastoril de un recurso ignorado. Santiago, Universitaria, S.A. 184p.

ORGANIZACIONES DE LAS NACIONAS UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). 1997. Especies Arbóreas y Arbustivas para las Zonas Áridas y Semiáridas de América latina. [En línea]. <http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/redes/sisag/arboles/default.htm#Chile>. [Consulta: 27 mayo 2019]

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (FAO). [s.a]. Contaminación provocada por los sedimentos. [En línea]. <<http://www.fao.org/3/W2598S/w2598s04.htm>>. [Consulta: 27 mayo 2019]

QUINTEIRO, M.; ANDRADE, M., y DE BLAS, E. 1998. Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: Experiencias de campo. *Revista de Edafología España*. (5): 1-10.

QUIROZ, I.; GARCÍA, E.; GONZÁLEZ, M.; CHUNG, P., y SOTO, H. 2009. Vivero Forestal: Producción de plantas nativas a raíz descubierta. Concepción, INFOR. 128p.

RÁMILA, J., y ROJAS, S. 2008. Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua. Seminario Ingeniero Comercial. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Economía y Negocio. 166p.

RAMIREZ, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. 41p.

RUSSI, D., y MARTÍNEZ, A. 2002. Los Pasivos Ambientales. Revista de Ciencias Sociales. 15; 123-131.

SEGUEL, O.; ELLIES, A.; MACDONALD R., y RAMÍREZ, C. 2002. Propiedades mecánicas en suelos sometidos a distintos usos. Revista de la Ciencia de Suelo y Nutrición Vegetal 2(2): 54-61.

SEGUEL, O., y HORN R. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting-drying cycles. Journal Plant Nutrition Soil Science, 169:221-232.

SERVICIO NACIONAL DE LA GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2014. Guías de operación para la pequeña minería, Guía 06: Manejo de mineral y residuos. 1° ed. 16p.

SERVICIO NACIONAL DE LA GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2017. Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile. 10p.

SERVICIO NACIONAL DE LA GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2018. Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos. 13p.

SERVICIO NACIONAL DE LA GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2018. Anuario de la minería de Chile. 271p.

SIANCAS, Y. 2018. Estudio del comportamiento de sedimentos en bifurcaciones para bocatomas, mediante modelación numérica. Tesis de ingeniero civil. Piura, Universidad de Piura, Facultad de ingeniería. 217p.

SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE (SMA). (2014). Informe de fiscalización ambiental, Inspección ambiental, Centro de gestión ambiental de biosólidos El Rutil. 23p.

SOTO, L.; LEIVA, E.; MONTOYA, F.; SEGUEL, O.; DELPIANO, C.; BECERRA, P.; VÁSQUEZ, I.; MIRANDA, A., y SMITH-RAMÍREZ, C. (2015). Efecto del espino (*Acacia caven* (Mol.)) sobre las propiedades físicas del suelo en exclusiones de pastoreo. Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia, 31(3): 211-222p.

VARELA, S., y MARTÍNEZ, A. 2013. Uso del compost de biosólidos en la formulación de sustratos para la producción industrial de *Nothofagus alpina*. Revista Bosque 34(3):281-289.

VÉLEZ, J. 2007. Los Biosólidos: ¿Una solución o un problema?. Revista Producción + Limpia 2(2):57-71.

WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES (WRB). 2015. Internacional soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO. 203p.

6. ANEXOS Y APÉNDICES

Cuadro 5. Cuadro con índices de calidad de plantas por tratamiento por siembra. IE = Índice de Esbeltez; T/R = Índice de relación tallo-raíz; IC = Índice de Dickson; S = sedimento; L= lodo; + R = adición de relave.

Etiqueta	Tratamiento	Siembra Invierno			Siembra Primavera		
		IE	T/R	Dickson	IE	T/R	Dickson
T1	100 S 0 L + R	6,27	3,82	0,035	6,58	1,41	0,041
T2	75 S 25 L + R	11,73	6,49	0,016	8,96	2,81	0,029
T3	50 S 50 L + R	0,00	0,00	0,000	6,52	2,20	0,005
T4	25 S 75 L + R	0,00	0,00	0,000	13,86	2,75	0,004
T5	0 S 100 L + R	8,65	2,62	0,038	11,19	2,82	0,030
T6	100 S 0 L	6,86	1,73	0,045	6,80	1,68	0,036
T7	75 S 25 L	9,60	2,63	0,032	8,21	2,39	0,034
T8	50 S 50 L	5,61	3,04	0,007	9,30	4,60	0,005
T9	25 S 75 L	10,95	2,75	0,033	10,46	2,45	0,047
T10	0 S 100 L	11,62	3,88	0,015	12,00	2,83	0,023