



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA EN CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE UN
SUELO RECONSTRUIDO BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS DE
COBERTURA SOBRE UN VERTEDERO DE CENIZAS DE
TERMOELÉCTRICA, CORONEL, CHILE**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniera en Conservación de
Recursos Naturales

POR: Camila Beatriz Chaparro Vera

Profesor Guía: Felipe Aburto

Octubre, 2023

Concepción, Chile

© 2023, Camila Beatriz Chaparro Vera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DE UN
SUELO RECONSTRUIDO BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS DE
COBERTURA SOBRE UN VERTEDERO DE CENIZAS DE
TERMOELÉCTRICA, CORONEL, CHILE

Profesor Guía

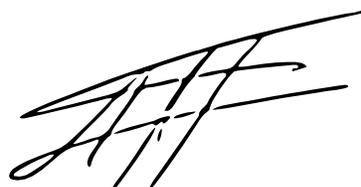


Felipe Aburto

Profesor Colaborador

Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Profesor Guía

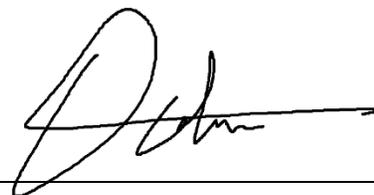


Cristian Echeverría

Profesor titular

Ingeniero Forestal, Ph.D.

Profesor Guía



Oscar Crovo

Profesor Colaborador

Ingeniero en Conservación
de Recursos Naturales, MSc,

DEDICATORIA

A la naturaleza, mi mayor fuente de inspiración y la chispa que inicio este camino.

Que a donde quiera que vaya me acompañe en todas sus manifestaciones.

A mi familia por su apoyo incondicional en todos mis años de estudio y formación.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo y compañía en todo momento. A mis padres, abuela y hermana que sin su soporte nada de esto hubiese ocurrido.

A mis amigos por sus palabras, consejos, mates y gestos de apoyo, desde el inicio de pregrado y en todas las dificultades y felicidades vividas.

A mi perrito quillay por su amor incondicional y compañía en todos los procesos.

A los profesores Felipe Aburto y Cristian Echeverría por su apoyo y conocimiento en el desarrollo de este proyecto de título.

A Oscar Crovo por su ayuda en el proceso de muestreo y análisis de datos. A Francisco Montecinos por su colaboración en la metodología y muestreo. Y a todas las personas que apoyaron de una u otra forma.

A mí misma y todas mis versiones por el camino recorrido.

A las plantas, semillas y animales que acompañan mi camino desde siempre.

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. METODOLOGÍA.....	10
2.1 Descripción área de estudio.....	10
2.2 Relleno vertedero.....	11
2.3 Diseño experimental.....	12
2.4 Datos de campo	16
2.5 Muestreo de lombrices	17
2.6 Muestreo de respiración del suelo	19
2.7 Procesamiento de los datos	22
III. RESULTADOS	24
3.1 Lombrices del suelo.....	24
2.3 Flujo de respiración del suelo	24
3.3 Carbono del suelo:.....	36
IV. DISCUSIÓN.....	40
4.1 Lombrices del suelo:.....	40
4.2 Carbono del suelo:.....	44
4.3 Respiración del suelo:.....	46
4.4 Implicancias del estudio:.....	50
V. CONCLUSIONES.....	52
VI. GLOSARIO.....	53
VII. BIBLIOGRAFÍA	54
VIII. APÉNDICE	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Detalle de los tratamientos de cobertura, sus abreviaciones, tipo de cobertura y funciones.....	13
Tabla 2. Especies incluidas en el plan de revegetación	15
Tabla 3. Parámetros estadísticos de la prueba ANDEVA de medidas repetidas.....	26
Tabla 4. Parámetros de la prueba ANDEVA de medidas repetidas.....	19
Tabla 5. Valores promedio y desviación estándar de flujo de tonCO ₂ ha ⁻¹ año ⁻¹ ponderado por parcelas y tratamiento.....	28
Tabla 6. Parámetros obtenidos en análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías realizado para los horarios de medición y el flujo de CO ₂	30
Tabla 7. Parámetros de la correlación de Spearman realizada entre el flujo CO ₂ y la Temperatura del aire y suelo.....	31
Tabla 8. Parámetros de la correlación de Spearman entre el flujo de CO ₂ y la Humedad del aire, junto con correlación de Pearson entre CO ₂ y Humedad del suelo.....	32
Tabla 9. Parámetros obtenidos de regresión lineal entre Temperatura de suelo (°C) y flujo del CO ₂	34
Tabla 10. Parámetros obtenidos en análisis ANOVA de una vía realizado para los tratamientos y el flujo de CO ₂	34

Tabla 11. Parámetros obtenidos a la correlación entre flujo de CO ₂ y Carbono del suelo (%).....	37
Tabla 12. Indicador del balance de CO ₂ (producción vs. reservorio) en hectárea y año por tratamiento.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital del proyecto de revegetación. Detallando los límites y el área del plan piloto. (Fuente: Google Earth Pro, 15/04/2023.....	11
Figura 2. Detalle de las capas sobre el depósito de cenizas. (a) Gravas (b) Geotextil (c) Membrana aislante (d) Relleno de suelo mineral (e) Capa de compost.....	12
Figura 3. Esquema del plan piloto, incluyendo parcelas, nivel de riego y tratamientos.....	16
Figura 4. a) remoción de la cobertura vegetal por unidad de muestreo. B) Localización de los marcos de metal dentro un tratamiento de suelo (en este caso Testigo).....	14
Figura 5. (a) muestreo del flujo de CO ₂ con el equipo LICOR acoplado al tubo previamente instalado. (b) medición de la temperatura y humedad del suelo.....	21
Figura 6. Flujo diario de CO ₂ por fecha de medición y tratamiento.....	25
Figura 7. Flujos de g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹ por Hora del día y tratamientos.....	29
Figura 8. Análisis de Varianza de medidas repetidas (ANDEVA) por horario de medición y su flujo de CO ₂ promedio.....	30

Figura 9. Relación entre flujo de CO ₂ y a) temperatura del suelo. b) temperatura del aire. c) humedad del suelo. d) humedad del aire.....	33
Figura 10. Análisis de Varianza (ANOVA), por tratamiento y su valor de CO ₂ anual.....	35
Figura 11. Carbono presente en el suelo (%) por tratamiento.....	36
Figura 12. Relación entre el carbono del suelo y el flujo de CO ₂	38
Figura 13. Modelo exponencial y lineal de datos de flujo de CO ₂ , en SOILFLUX pro.....	53
Figura 14. Detalle lombrices extraídas en el pre-muestreo.....	54

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en la evaluación de la rehabilitación de un material de cubierta sobre un relleno de cenizas derivado de la actividad termoeléctrica en la ciudad de Coronel, Chile. El objetivo del proyecto fue comparar la efectividad de recuperación de funciones edáficas de diferentes tratamientos de cobertura de suelos complementarias a las acciones la plantación de especies leñosas nativas. Lo anterior se realizó mediante el análisis de indicadores biológicos como la respiración del suelo, carbono (%) y presencia de lombrices. Los resultados revelan que la adición de coberturas y semillas de pastos permite una sucesión superior al proceso espontáneo en el ecosistema, acelerando la recuperación de la funcionalidad edáfica y la calidad del suelo. Se identificaron diversos procesos asociados al suelo que generan beneficios tanto para el ecosistema como para la comunidad humana. En conclusión, este estudio demuestra que la combinación del sellado, relleno, plantación de especies leñosas nativas y tratamientos de cobertura de suelo es una estrategia efectiva para la rehabilitación de suelos degradados por la actividad termoeléctrica. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para futuros esfuerzos de procesos de investigación y actividades de restauración ecológica en áreas similares, promoviendo la recuperación de los ecosistemas boscosos y el bienestar de la comunidad que los rodea.

ABSTRACT

This research focuses on the evaluation of the rehabilitation of a cover material on an ash fill derived from thermoelectric activity in the city of Coronel, Chile. The objective of the project was to compare the effectiveness of recovery of edaphic functions of different soil cover treatments complementary to the actions of planting native woody species. This was done by analyzing biological indicators such as soil respiration, carbon (%) and earthworm presence. The results reveal that the addition of grass cover and seeds allows a succession superior to the spontaneous process in the ecosystem, accelerating the recovery of edaphic functionality and soil quality. Several soil-associated processes were identified that generate benefits for both the ecosystem and the human community. In conclusion, this study demonstrates that the combination of sealing, backfilling, planting of native woody species and ground cover treatments is an effective strategy for the rehabilitation of soils degraded by thermoelectric activity. These findings provide a solid basis for future research process efforts and ecological restoration activities in similar areas, promoting the recovery of forest ecosystems and the surrounding community's well-being.

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2020 Chile entrega su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) que tiene como objetivo ser un país carbono neutral para el año 2050 (Gob, 2020). En el marco de este compromiso se aprobó el Plan de descarbonización que busca para el año 2040 mitigar la liberación de gases de efecto invernadero en la matriz de generación de energía eléctrica, cerrando las termoeléctricas que operan en el país. En este contexto en la ciudad de Coronel, región del Biobío la central Bocamina I cesó su actividad el año 2020, mientras que el año 2022 terminó su funcionamiento la segunda y última central Bocamina II. A su vez, el cese de la actividad termoeléctrica implica el cierre y rehabilitación de vertederos de cenizas, las cuales son producidas como desechos de la actividad termoeléctrica. En el caso de Coronel, estas se depositaron en un vertedero ubicado en las cercanías de las centrales, el cual comenzó su operación en 1999, para ser cerrado a finales del 2022.

La actividad industrial y de termoeléctricas en la zona en conjunto al depósito de cenizas ha generado gran preocupación en la población de Coronel incentivada por la potencial contaminación por metales pesados y la generación de material particulado en suspensión. Lo anterior ha derivado en varios estudios ambientales y epidemiológicos (Dep. de Salud Pública, 2022; Romo, 2019), y ha sido reportado ampliamente en la prensa. A su vez la operación de vertederos de

cenizas presenta representan un problema ambiental por la pérdida de espacios naturales convertidos a lugares inertes, pérdida de servicios ecosistémicos y contaminación latente. Por lo que su adecuado cierre y rehabilitación es un tema relevante y poco explorado en Chile y el mundo.

En este contexto y cuando se busca la reparación de ecosistemas, la restauración ecológica emerge como disciplina para recuperar ecosistemas que han sido destruidos, dañados o degradados producto de las actividades humanas (Gann et al., 2019). La restauración ecológica busca mejorar la composición, estructura y función de los ecosistemas (SER, 2004). A su vez forma parte de un continuo recuperativo donde se consideran distintas aproximaciones según los objetivos de recuperación y grado de degradación de los ecosistemas, distinguiéndose entre: remediación, rehabilitación (también considerada como revegetación) y restauración ecológica (McDonald et al., 2016).

La rehabilitación de suelos y posterior revegetación tienen como objetivo principal recuperar las funciones del ecosistema degradado y aumentar su capacidad de proveer bienes y servicios ecosistémicos (McDonald et al., 2016). Al rehabilitar el suelo busca recuperar los procesos ecológicos y funciones del ecosistema asociados a este que permitan el establecimiento de comunidades vegetales (Hansen & Gibson, 2014). Este enfoque se utiliza especialmente cuando el grado

de degradación del suelo es alto, por lo que se prioriza recuperar inicialmente su funcionalidad.

El suelo es la base para los procesos de restauración o rehabilitación, ya que soportan las comunidades vegetales y animales (Aguilar-Garavito et al., 2015) proveyendo hábitat para los mismos a través de sus interacciones con el agua y la vegetación (Larson & Pierce, 1991). Sus procesos sustentan el funcionamiento de los ecosistemas naturales (Doran, 2002) (Arshad & Martin, 2002) los cuales pueden ser vulnerables a disturbios, pudiendo tomar un largo tiempo en recuperarse (Bentham et al., 1992). Cuando estas funciones benefician directamente al ser humano se consideran servicios ecosistémicos (Comerford et al., 2013).

El suelo aporta con valiosas funciones y servicios ecosistémicos, los cuales se clasifican en cuatro grandes grupos: servicios de soporte, los cuales son esenciales para los demás y proveer hábitat; servicios de provisión donde se incluyen los productos obtenidos directamente desde los ecosistemas; servicios de regulación, los cuales controlan y mantienen como control de la erosión, secuestro de carbono; y los servicios culturales los cuales son beneficios no materiales (Comerford et al., 2013).

En cuanto al concepto calidad del suelo, este está fuertemente definido por las funciones ecosistémicas del mismo, en conjunto con las propiedades físicas, químicas y biológicas (Doran & Parkin, 1994; Larson & Pierce, 1991). En este sentido se puede entender la pérdida de funciones y servicios como algún grado de degradación del suelo, siendo a su vez una medida para evaluar el progreso de recuperación luego de aplicar acciones de rehabilitación en una zona (Aguilar-Garavito et al., 2015)

Para evaluar la calidad del suelo como medida del progreso de un proyecto de restauración es necesario monitorear diversos atributos y procesos claves, a través de una recolección sistemática y repetida en el tiempo (Vos et al., 2000). El monitoreo de indicadores asociados a procesos reduce los costos en los futuros proyectos de restauración ecológica (Ribeiro et al., 2013) ya que entrega valiosa información que puede ser extrapolada a otras iniciativas (Gann et al., 2019). Se deben definir indicadores de recuperación con el objetivo de evaluar el progreso a través del tiempo, los cuales deben ser sensibles a los cambios ocurridos en los ecosistemas (Gann et al., 2019).. El valor de los indicadores se denominan cuantificadores, que corresponde a la medida y unidad específica. Es relevante que estos indicadores abarquen los procesos ecosistémicos del suelo, además de relacionarse con funciones esenciales del mismo como el ciclo del Carbono (C) o Nitrógeno (N) (Doran & Parkin, 1994).

Para monitorear la recuperación del suelo se suelen utilizar indicadores relacionados con las propiedades físicas, químicas o biológicas (Gatica-Saavedra et al., 2023), dentro de las cuales existe una amplia gama de parámetros de medición. Dentro del monitoreo de procesos de restauración los parámetros biológicos han tomado relevancia ya que indican de forma dinámica cómo el suelo responde a los disturbios, ya que su actividad es de relevancia para los procesos y estructuración del suelo (Harris, 2003). Además, la capacidad del suelo de sostener la actividad biológica y el crecimiento de plantas dependen de las propiedades del suelo (Doran & Parkin, 1994).

El estudio de la fauna del suelo ha demostrado ser un importante indicador biológico sobre la calidad de los suelos (Gatica-Saavedra et al., 2023), principalmente a través de su diversidad, composición, densidad y actividad (Velásquez, 2004), ya que cumple con procesos relevante para el suelo, La fauna edáfica se define como los organismos que pasan alguna parte de su vida al interior del suelo (Brown et al., 2001). El grupo más reconocido y utilizado como indicador biológico son las lombrices, las cuales cumplen un rol como ingenieras de ecosistemas (Lavelle et al., 1997) ya que generan un impacto importante en el suelo. Las lombrices modifican y contribuyen a funciones y servicios ecosistémicos, principalmente formación de suelo y ciclaje de nutrientes (Blouin et al., 2013).

Estos animales desempeñan funciones de gran relevancia para el suelo, mezcla de material orgánico; aceleran la descomposición de materia orgánica, mineralización del nitrógeno (Otero et al., 2002). Participan en el ciclaje de nutrientes, secuestro carbono y por lo tanto regulación climática (Blouin et al., 2013). Se ha comprobado que tienen importancia en las propiedades físicas del suelo ya que crean canales y poros los cuales aumentan la capacidad de retención de agua, favorecen el drenaje y aireación (Brown et al., 2001), participan en procesos como formación suelo, regulación hídrica, control de erosión y producción primaria.

Se ha demostrado que la macrofauna decrece cuando aumenta la perturbación de los suelos (Velásquez, 2004), mientras se ha estudiado que su recolonización posterior a un disturbio tiende a ser a corto plazo (1 a 3 años) (Aguilar-Garavito et al., 2015).

La respiración del suelo (R_s) corresponde a la medición del flujo de la respiración heterótrofa producida por la actividad microbiana que descomponen materia orgánica y de los exudados de las raíces; así como de la respiración autótrofa producida por las raíces y micorrizas asociadas (Díaz Vasconcellos, 2018; Hanson et al., 2000). El flujo de CO_2 desde el suelo a la atmósfera es el indicador más usado para medir la respiración del suelo (Maier et al., 2011). Se le considera una medida importante de la actividad biológica del suelo y del metabolismo del

ecosistema (Ryan & Law, 2005). La respiración del suelo es un proceso regulado por las interacciones entre factores bióticos como tipo de vegetación, y abióticos como temperatura, humedad, textura del suelo, materia orgánica, pH (Ryan & Law, 2005), por lo que su variabilidad espacial y temporal es alta. La respiración del suelo es usada en el monitoreo de proyectos de restauración (Aguilar-Garavito et al., 2015), ya que permite interpretar las dinámicas de los procesos biológicos que están ocurriendo en el suelo (Abril, 2003; Filip, 2002).

Los flujos de Carbono del suelo forman parte del ciclo de carbono, de los depósitos o sumideros (Wang et al., 2016), por lo cual están directamente relacionados con funciones del suelo como secuestro de carbono y regulación climática (Comerford et al., 2013). Se ha estudiado que el cambio de uso de uso o distintas coberturas y vegetación alteran lo ciclos biogeoquímicos y por consiguiente la respiración del suelo, siendo las magnitudes aún inciertas (Wang et al., 2016)

En la rehabilitación de vertederos de cenizas se suelen cubrir las cenizas con suelo para aislar componentes nocivos para el ambiente y salud humana (Espinosa Llorens et al., 2010), además de plantar especies que cumplan con funciones de estabilización de suelos evitando la liberación de contaminantes, mejorar su calidad, aumentar la biodiversidad, y además de aportar con servicios ecosistémicos (Gajić et al., 2019). Para proteger el suelo en proyectos de

rehabilitación o restauración se pueden usar coberturas, ya que supone diversos beneficios en control de erosión en las primeras etapas, protección de la radiación solar, control de la humedad y aporte de materia orgánica en algunos casos (Simmons, 1999). Esto mientras la vegetación plantada crece y sea capaz de cubrir y estabilizar el suelo por sí misma.

En el marco del proyecto de revegetación del ex vertedero de cenizas de la central Termoeléctrica Bocamina en la ciudad de Coronel, Chile, se busca estudiar la recuperación temprana de la funcionalidad edáfica mediante parámetros biológicos de calidad de suelos, usando como indicadores lombrices, carbono del suelo y respiración. La pregunta de investigación para este estudio es: ¿Cómo varía la actividad biológica de un suelo reconstruido según la cobertura de suelo? En el presente estudio, se plantea la siguiente hipótesis: la actividad biológica de un suelo reconstruido varía significativamente según la solución de tipo de cobertura utilizada, esperándose que las coberturas vegetales herbáceas promuevan una mayor actividad biológica en comparación con aquellas sin cobertura vegetales. Lo anterior basado en el principio de que una mayor diversidad y aumento de la productividad primaria promoverían la disponibilidad de nutrientes, procesos de estructuración física del suelo y la presencia de organismos beneficiosos, lo cual a su vez estimularía y promovería la recuperación de la actividad biológica del suelo. Para probar esta hipótesis, se llevará a cabo un estudio comparativo en distintos tratamientos, donde se

evaluará la actividad biológica y se analizará la relación con la cobertura de suelo presente.

El objetivo del presente estudio es evaluar la recuperación temprana de indicadores biológicos de funcionalidad de suelos de diferentes tratamientos de cobertura de suelos en un suelo reconstruido sobre un vertedero de cenizas. En particular se busca evaluar el contenido de carbono y el flujo de CO₂ diario y anual de un suelo reconstruido sobre un ex vertedero de cenizas bajo diferentes tipos de cobertura, y evaluar la recuperación temprana de fauna edáfica a través del monitoreo de lombrices como indicador biológico.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción área de estudio

El área de estudio se emplaza en el vertedero de cenizas de la Central Termoeléctrica Bocamina, ubicado en la comuna de Coronel, Región del Biobío, Chile. Esta zona presenta clima Mediterráneo-Pluvial-Oceánico (Luebert & Pliscoff, 2006) con una temperatura media anual promedio de 12,7°C y precipitaciones anuales que llegan a los 573,1 mm ((CR)², 2021)

Este sitio se caracteriza por ser un ecosistema reconstruido a partir de un proceso de relleno geotécnico con materiales minerales (saprolito de rocas sedimentarias marinas) y orgánicos. Estos últimos fueron utilizados como suelo antrópico transportado (reconstruido) que cubre el depósito de desechos de cenizas de termoeléctrica. La mezcla del sustrato mineral y orgánico y la aislación de las cenizas resulta en un mejor medio de crecimiento para las plantas y contribuye a facilitar el proceso de recuperación.

Posterior al relleno, en el año 2019, se estableció un plan piloto de revegetación en un área aproximada de 0,64 hectáreas. La revegetación se realizó con especies arbustivas nativas en base a un diseño experimental de bloques. Los objetivos de este experimento fueron evaluar la factibilidad de una revegetación en un suelo reconstruido, así como comparar diferentes tratamientos de cobertura para el control de la erosión y la recuperación de funciones edáficas.



Figura 1. Imagen satelital del proyecto de revegetación. Detallando los límites y el área del plan piloto. (Fuente: Google Earth Pro, 15/04/2023).

2.2 Relleno vertedero

Las cenizas presentes en el vertedero fueron tratadas a través de un proceso de aislación y relleno. La finalidad de este proceso fue evitar que las cenizas sean liberadas al ambiente, o entren en contacto con aguas subterráneas o el sistema radicular de las plantas. Se aplicaron capas aislantes en el siguiente orden: geoceldas con gravas, cubiertas por una geomembrana y un geotextil (Torres, 2021). Sobre las capas aislantes se incorporó un metro de suelo mineral (de

texturas franco arcilloso ha arenoso) originario de lomajes provenientes de terrazas marinas antiguas provenientes de un predio colindante. Estas son descritas en la bibliografía como un material constituido por arenas y/o areniscas ricas en cuarzo (Casanova et al., 2013). Posterior al depósito de este material en el vertedero se le añadió en su superficie 20 cm de compost de corteza de pino Clase A el cual fue posteriormente mezclado con el suelo mineral en sus primeros 30 cm (Torres, 2021).



Figura 2. Detalle de las capas sobre el depósito de cenizas. (a) Gravas (b) Geotextil (c) Membrana aislante (d) Relleno de suelo mineral (e) Capa de compost. Extraído de Torres 2021

2.3 Diseño experimental

Como primera etapa del plan de revegetación del vertedero se consideró la implementación de un área piloto experimental, la cual está constituida por siete

parcelas, en las que cada parcela incluye cinco hileras de plantas nativas leñosas con los diversos tratamientos de suelo y tres niveles de riego. Solo una parcela por bloque cuenta con el tratamiento Testigo (T) que no posee plantas.

Los tratamientos de cobertura de suelo corresponden a la cobertura que ha sido aplicada sobre este, distinguiéndose: Control (CO), Geomanto (GM), Hidrosiembra (HS), Siembra Directa (SD) y Testigo (T).

Tabla 1. Detalle de los tratamientos de cobertura, sus abreviaciones, tipo de cobertura y funciones.

Tratamiento	Abreviación	Característica
Control	CO	Solo especies leñosas sin cobertura
Fibra de Coco	FC	Geotextil biodegradable, actúa como mulch, protege de radiación, retiene humedad
Siembra directa	SD	Siembra al voleo de gramíneas, leguminosas y herbáceas
Hidrosiembra	HS	Semillas (igual que SD) + hidromulch e hidrogeles
Testigo	T	Sin especies leñosas ni cobertura

El factor riego comprende tres niveles, desde el 100%, 50% y 25%, el cual es medido en base a la Evapotranspiración del cultivo. Este riego se aplica a través de una plancha de riego con goteros autocompensado en cada planta.

Para este ensayo se escogieron plantas nativas leñosas presentes en el ecosistema de referencia de tamaño medio, basadas en su diversidad de hábitos de crecimiento, forma de estructura de dosel, extracción de nutrientes, crecimiento radicular, mecanismos de dispersión y diversidad funcional. Su objetivo principal es generar una cobertura permanente, que se asemeje a lo que alguna vez hubo en la zona. Así como cumplir con funciones ecosistémicas como: protección de la erosión, retención de la humedad y variados servicios ecosistémicos. La selección de especies sirvió para entender su desempeño y extrapolar sus resultados a las siguientes etapas de revegetación. Cada especie seleccionada tiene distintos mecanismos de absorción de nutrientes, sistemas radiculares, estructuras de dosel y funciones (Torres, 2021). Las especies nativas leñosas corresponden a *Maytenus boaria* (Maitén), *Embothrium coccineum* (Notro), *Aristotelia chilensis* (Maqui), *Sophora cassioides* (Pelú) y *Ugni molinae* (Murtilla) (Tabla 2).

Tabla 2. Especies incluidas en el plan de revegetación.

Nombre científico	Nombre común	Hábito
<i>Maytenus boaria</i>	Maitén	Arbóreo
<i>Embothrium coccineum</i>	Notro	Arbóreo
<i>Aristotelia chilensis</i>	Maqui	Arbóreo/Arbustivo
<i>Sophora cassioides</i>	Pelú	Arbóreo
<i>Ugni molinae</i>	Murtilla	Arbustivo

La unidad muestral corresponde a las parcelas de tratamiento de cobertura que contempla cinco hileras de plantas nativas leñosas, cada unidad muestral tiene una dimensión de 20x5 m. Las plantas se encuentran a una separación de 0,75 m entre sí, mientras que las hileras están separadas por 1 m. Las hileras ubicadas en los bordes de las parcelas fueron establecidas como buffer, por lo que no se consideraron para el muestreo. finalmente, se tienen tres hileras de 25 plantas por unidad de muestreo, secuenciadas de 1 a 5, siendo un total de 36 parcelas experimentales. Las plantas fueron fertilizadas individualmente al momento de plantación directo en el hoyo con 20g de Foreskote NPK + 2% Boro.

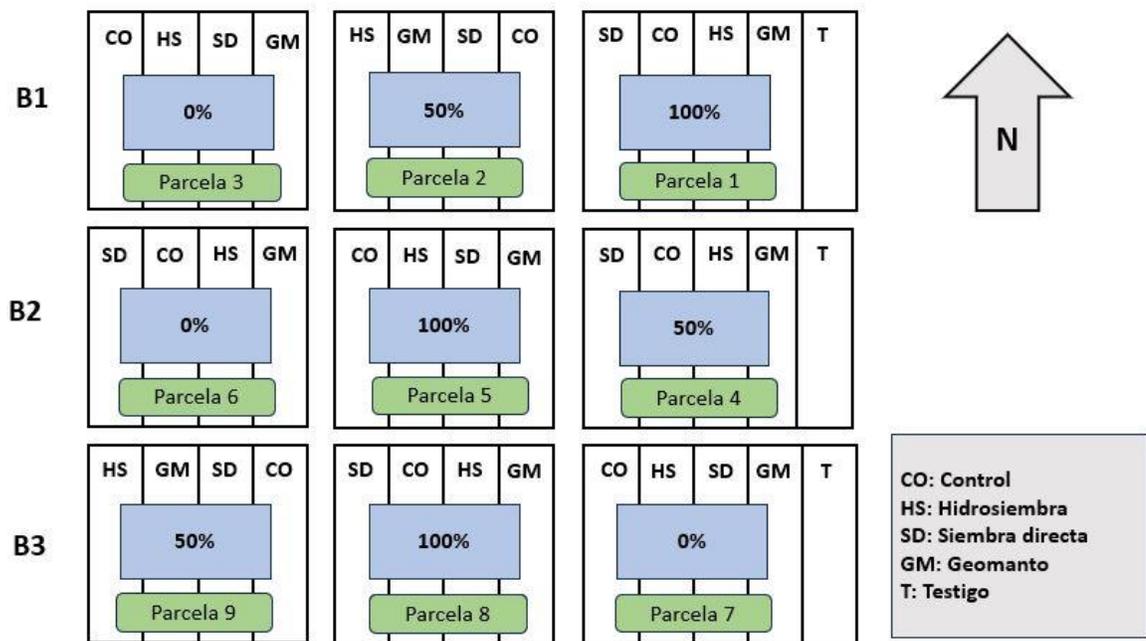


Figura 3. Esquema del plan piloto, incluyendo parcelas, nivel de riego y tratamientos.

2.4 Datos de campo

Junto con las variables de cobertura, en el marco del proyecto se realizó un muestreo de diversas variables físicas y químicas del suelo. Para propósitos de este estudio, se trabajó solo con la variable carbono total del suelo (%), el cual fue medido de manera sistemática cada año en cada tratamiento de cobertura. Se utilizaron los valores promedios por parcela y tratamiento.

2.5 Muestreo de lombrices

El método de extracción pasó por una prueba de pre-muestreo, en otra zona, en donde se experimentó con distintas marcas y concentraciones de solución irritante. Se comparó así también la diferencia entre extraer la cobertura del suelo en el mismo momento y el día anterior. El pre-muestreo se realizó durante dos días de abril 2022 a las 18.00 hrs y 07.00 hrs respectivamente. En el campus de la Universidad de Concepción, específicamente en una zona de césped que además presentaba algunos arbustos y árboles acompañantes. En este ensayo si fue posible coleccionar lombrices de varios tamaños y tipos, detalles en anexo Figura 14. A partir de esta experiencia se definió la metodología utilizada en el sitio de estudio.

Para realizar el muestreo se definieron unidades muestrales en las parcelas con 100% de riego (parcela 1, 5 y 8), ya que al presentar mayor humedad más probable encontrar actividad biológica. Dentro de cada parcela se establecieron tres unidades muestrales por tratamiento de suelo: testigo, hidrosiembra, geomanto y control. Las unidades muestrales correspondieron a tres subparcelas de 0,25 m² distanciadas de manera regular a lo largo de la línea central de cada parcela, entre las hileras de árboles, dando un total de 36 subparcelas de medición (i.e., unidad muestral).

Las mediciones se realizaron en dos oportunidades, los días 12 y 13 de abril del año 2022 y posteriormente los días 12, 13 y 16 de enero del año 2023, entre las 7 am y 11 am. Este horario se escogió ya que es más probable encontrar individuos en los primeros centímetros del suelo, producto de una mayor humedad y menor temperatura que hay antes del mediodía (Chan & Munro, 2001). El día anterior a la medición se removió la cobertura vegetal de cada unidad, esto con el fin de no perturbar el hábitat a las lombrices producto de vibraciones, evitando que generara un efecto negativo en su comportamiento. Se utilizó el método de extracción mediante la aplicación de una solución de mostaza al suelo (Chan & Munro, 2001), en una concentración de 300g en 10 L de agua (Gunn, 1992). Este método se basa en el efecto irritante para las membranas mucosas de las lombrices que las obliga a salir a la superficie. Se instalaron marcos de metal de 0,25 m² y al menos 8 cm de alto en cada unidad de muestreo, sobre los cuales se aplicó 2,5 L de solución. Pasados 15 minutos se realizó una segunda aplicación con la misma dosis con el fin de registrar la presencia de lombrices.

Las lombrices se colectaron al momento que emergieron del suelo, estas se tomaron y se almacenaron en frascos con formalina al 4% por tratamiento y parcela. Finalizando la etapa de extracción, en una estación preparada a la sombra se registró en planilla el número total de lombrices por tratamiento y parcela, procediendo a limpiarlas en agua para luego secarlas rápidamente. Se

registró el número de individuos y su peso en húmedo. En la última etapa se secaron los individuos en una estufa a 60° C durante 24 a 48 h para obtener el peso seco.

En total el proceso de muestreo duró 3 días, donde se completaron 12 unidades muestrales por día.



Figura 4. a) remoción de la cobertura vegetal por unidad de muestreo. b) Localización de los marcos de metal dentro un tratamiento de suelo (en este caso Testigo).

2.6 Muestreo de respiración del suelo

Para medir la respiración del suelo se utilizó un diseño similar al muestreo de lombrices: centrado en las parcelas 100% riego y los tratamientos Control (CO),

Fibra de Coco (FC), Geomanto (GM) y Testigo (T). A su vez la disposición de las unidades de muestreo fue, al igual que lombrices, en el centro de parcela, ordenado aleatoriamente de norte a sur, con tres unidades por Tratamiento, dando un total de 36 muestras. Se tuvo cuidado de no ubicar los puntos en los mismos lugares donde se establecieron las subparcelas de medición de lombrices.

Previo al muestreo se instalaron tubos o collares de suelo en cada unidad muestral. Estos tubos sobresalen aproximadamente 8 cm sobre el suelo, estando enterrados 5 cm en el mismo, los cuales permiten acoplar la cámara del equipo analizador de gases.

Las mediciones de flujo de CO₂ del suelo se realizaron con un equipo analizador de gases por infrarrojos (LICOR) LI-8100, el cual es una cámara dinámica cerrada que mide el intercambio de gas entre el suelo que cubierto por la cámara y la atmósfera al interior de ella (Ryan & Law, 2005). El instrumento primero depura los gases que hay en la cámara, para luego medir, en 60 segundos el flujo que hay entre el suelo y la cámara de respiración ya cerrada. El CO₂ emitido por el suelo queda captura en la cámara y es medido a través de sensores infrarrojos. El equipo entrega directamente el flujo medido en unidades de $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

El muestreo se realizó a fines de mayo del 2023, luego se repitió en septiembre, noviembre del mismo año y enero del 2023. Estas mediciones representan la variabilidad de las dos estaciones del año evaluadas (primavera, verano y otoño). Se efectuaron mediciones repetidas en tres horarios del día: 8 am, 13 pm y 18 pm por tratamiento. La elección de estos horarios radica en que representan la intensidad de actividad metabólica según la luz solar y temperatura presente. La respiración posterior las 18.00 hrs tiende a ser homogénea (López-Teloxa & Monterroso-Rivas, 2020), por lo que estos horarios representan la variación diaria de respiración.

Simultáneamente, se midió la temperatura y humedad, del aire y suelo en cada punto de muestreo.



Figura 5. (a) muestreo del flujo de CO₂ con el equipo LICOR acoplado al tubo previamente instalado. (b) medición de la temperatura y humedad del suelo.

2.7 Procesamiento de los datos

Con respecto al análisis de los datos de respiración generados, la información pasó por un proceso de depuración antes de su utilización. Este proceso se realizó en el software SoilFLux Pro, desde el cual se recalculó el modelo exponencial (que era el que más se ajustaba), el caso de aquellos datos con un R^2 bajo, (es decir menor a 0.7). Esto con la finalidad de poder tener una mejor representación de los datos (Figura 13 en anexos).

Una vez que los datos fueron depurados, se transformaron y ponderaron por hora, para poder conseguir el valor de respiración diario. Este valor se calculó por parcela y luego se calculó la respiración anual por parcela y tratamiento.

El análisis estadístico se efectuó en el software GraphPad prism 9, en donde en primer lugar se evaluó si los datos cumplían con la normalidad de residuales, a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, se realizaron correlaciones de Pearson para los datos con la hipótesis de distribución normal y Spearman en el caso en que no se cumplía la normalidad. Las correlaciones se efectuaron entre los valores de respiración junto con humedad y temperatura, de aire y suelo. Finalmente, se realizó una correlación entre los datos de respiración y carbono del suelo (%). Con los datos de C del suelo y respiración se realizó una regresión lineal simple para explorar el efecto de las interacciones y poder

establecer un posible modelo que describa su relación. A su vez se construyó un índice que relaciona el C almacenado en el suelo y los flujos de CO₂ producido por hectárea y año. El índice se realizó en base a la siguiente ecuación: Indicador de balance de CO₂ = flujo de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ / Carbono (%) por ha⁻¹ año⁻¹.

Para comparar los valores de respiración con los horarios de medición se ejecutó un análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías con los flujos de CO₂ y tratamientos. Previo a esto se corroboró que cumpliera con los supuestos para ejecutar la prueba. Se realizó la misma prueba para comparar el efecto de los horarios de medición y tratamientos en los flujos de CO₂. Para comparar los valores de respiración por tratamiento se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía con los valores CO₂ anuales ponderados y considerando los tipos de coberturas como factor. Posteriormente se aplicó la prueba de Tukey de múltiples comparaciones entre los tratamientos.

III. RESULTADOS

3.1 Lombrices del suelo

Con respecto a los resultados de lombrices, no fue posible encontrar ningún individuo en los dos días que duró el muestreo, 12 y 13 de abril del año 2022. En la segunda medición realizada en enero, tampoco fue posible encontrar individuos. Salvo algunos individuos del género *Armadillidium* (chanchitos de tierra), *Phyllophaga* (escarabajos), larvas de género no identificado y *Gnaphosidae* (arañas de tierra) que emergieron a la superficie con la aplicación de la solución.

Se han registrado observaciones casuales de tres individuos de lombrices dentro del proyecto de revegetación, pero fuera del plan piloto u área de muestreo. Estas observaciones se han realizado en zonas adyacentes a los límites del proyecto, las cuales colindan con áreas periurbanas colonizadas principalmente por especies exóticas como *Acacia melanoxylon*.

2.3 Flujo de respiración del suelo

El flujo de CO₂ presentó variaciones en los distintos meses y tratamientos muestreados (Figura 6). Los meses con mayor respiración diaria fueron septiembre y luego de noviembre. Esta tendencia cambió en el tratamiento

control en el que noviembre alcanzó el mayor valor. A su vez los meses correspondientes a verano y otoño presentaron un menor flujo de respiración, a pesar de la aplicación de riego durante la temporada estival (Figura 6).

Como tendencia general se observa en la Figura 6 los mayores flujos de CO₂ en los tratamientos de Fibra de Coco (FC), seguido de Hidrosiembra (HS) y Control (CO). Estos valores variaron según el mes de muestreo. En mayo el mayor flujo lo tuvo HS, en septiembre fue FC, mientras que en noviembre y enero los valores más altos fueron obtenidos por CO. La tendencia que se cumplió en todos los meses en un flujo menor en el tratamiento Testigo.

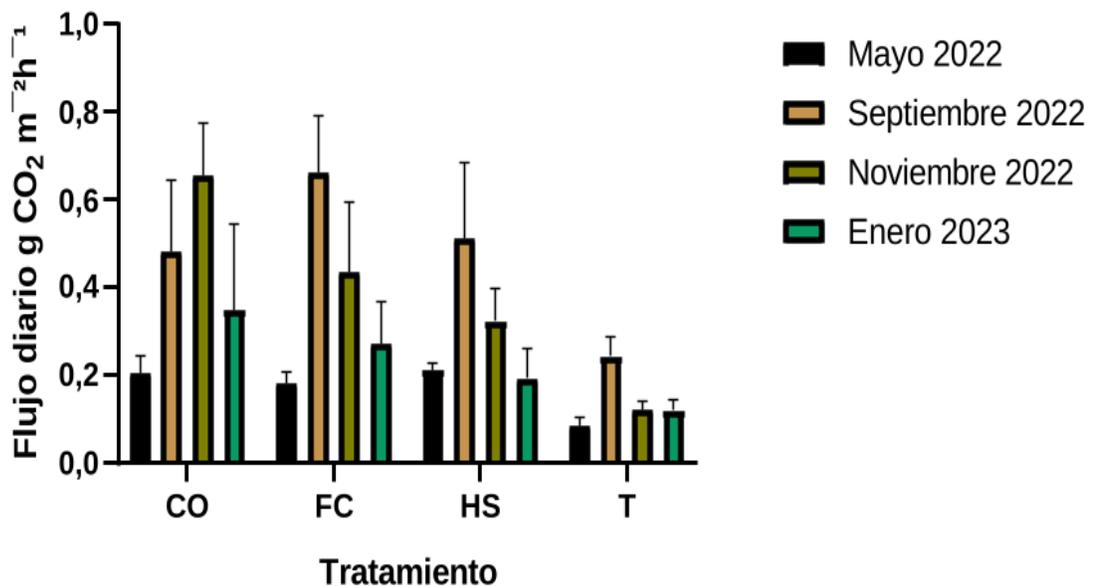


Figura 6. Flujo diario de CO₂ por fecha de medición y tratamiento.

Luego de realizar la prueba ANDEVA de medidas repetidas se encontró que tanto el mes de medición, como el tratamiento de suelo tienen efectos estadísticamente significativos en el flujo diario de CO₂ del suelo.

Tabla 3. Parámetros estadísticos de la prueba ANDEVA de medidas repetidas aplicado a los meses de medición para la variable de flujo de CO₂

Fuente de variación	P	Fc
Tratamiento	0.0121	F (3, 8) = 7.101
Mes	<0.0001	F (3, 23) = 36.65
Tratamiento x Mes	0.0037	F (9, 23) = 3.956

Se reporta diferencia estadísticamente significativa entre todos los meses comparados, a excepción de mayo del 2022 con enero del 2023, donde no hay diferencias en el flujo de CO₂.

Tabla 4. Parámetros de la prueba ANDEVA de medidas repetidas.

Factores	P
Mayo 2022 vs. septiembre 2022	<0.001
Mayo 2022 vs. noviembre 2022	<0.001
Mayo 2022 vs. enero 2023	0.3757
Septiembre 2022 vs. noviembre 2022	<0.05
Septiembre 2022 vs. enero 2023	<0.001
Noviembre 2022 vs. enero 2023	<0.01

Se obtuvo una tasa de respiración anual promedio de 1,08 ton CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ para el plan piloto. La menor tasa de respiración anual se registró en la condición Testigo (0,58 ton CO₂ ha⁻¹ año⁻¹), siendo el mayor valor registrado por el tratamiento Fibra de coco (1,82 ton CO₂ ha⁻¹ año⁻¹).

Tabla 5. Valores promedio y desviación estándar de flujo de ton CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ ponderado por parcelas y tratamiento

	CO		FC		HS		T	
	\bar{X}	Σ	\bar{X}	Σ	\bar{X}	Σ	\bar{X}	Σ
Parcela 1	1,08	0,24	1,15	0,06	1,24	0,05	0,62	0,11
Parcela 5	1,01	0,09	1,82	0,19	1,50	0,18	0,64	0,08
Parcela 8	1,33	0,24	1,18	0,20	0,87	0,08	0,58	0,04
Promedio anual	1,14	0,17	1,38	0,38	1,20	0,32	0,61	0,03

Con respecto a las horas del día, en general los tratamientos presentaron una baja respiración en la mañana, seguidos por un aumento al medio día y una leve disminución en el horario de la tarde (Figura 7). Sin embargo, en los meses de otoño el flujo de respiración fue mayor en la tarde que al medio día. En general el tratamiento FC presenta los mayores flujos de CO₂ en todos los horarios muestreados, seguido por HS.

A través de análisis de varianza ANDEVA de medidas repetidas se determinó que la hora del día tiene un efecto estadísticamente significativo en el flujo del CO₂ del suelo.

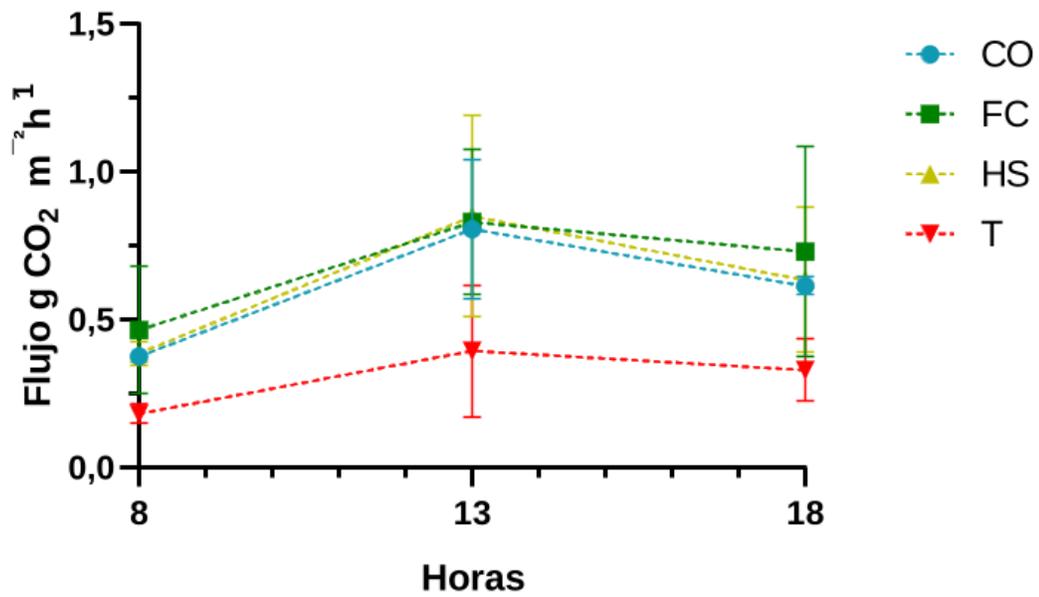


Figura 7. Flujos de g CO₂ m⁻² h⁻¹ por Hora del día y tratamientos.

A través de la prueba ANDEVA de múltiple comparación se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los horarios de mañana y tarde, además del medio día con la tarde.

Tabla 6. Parámetros obtenidos en análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías realizado para los horarios de medición y el flujo de CO₂.

Fuente de variación	P	Fc
Hora del día	<0.009	F (1.690, 10.99) = 15.22
Flujo CO ₂	0.123	F (3, 8) = 2.616
Hora del día x Flujo CO ₂	0.920	F (6, 13) = 0.3101

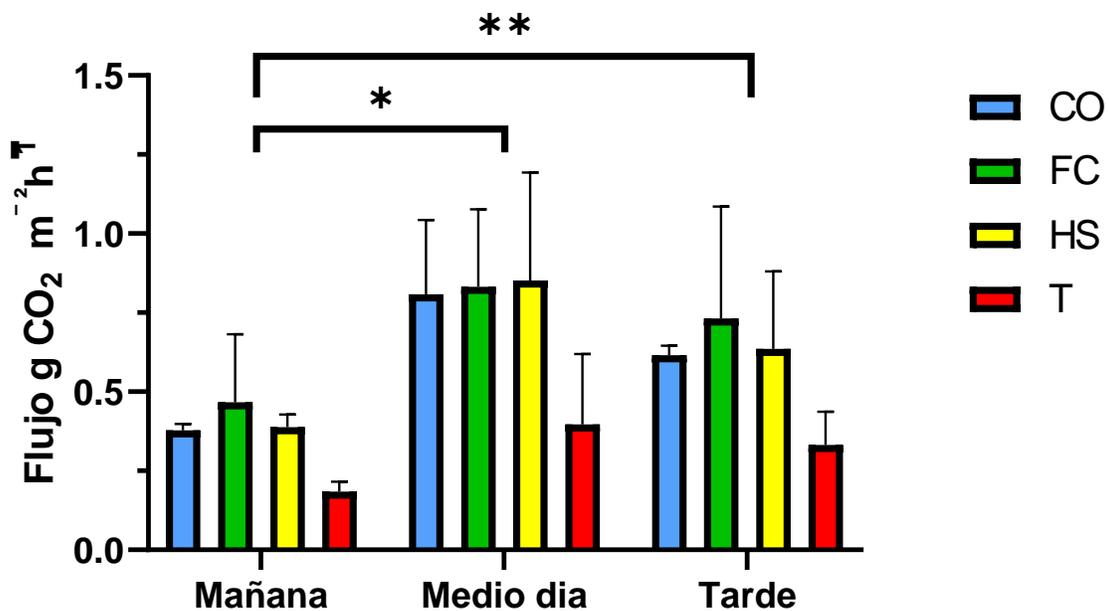


Figura 8. Análisis de Varianza de medidas repetidas (ANDEVA) por horario de medición y su flujo de CO₂ promedio.

En cuanto a la temperatura y humedad registradas fueron similares en todos los tratamientos, a excepción de Testigo donde la humedad fue menor al iniciar el día. A su vez en T se registró mayor temperatura en la tarde a diferencia de los demás tratamientos.

En cuantos a las correlaciones se encontró relación estadísticamente significativa entre el flujo de CO₂ y la temperatura, tanto del aire (p=0.0029) como del suelo (p<0,001). Sin embargo, el coeficiente de correlación (R) de la temperatura del aire es bajo (R=0,2839), lo que indica una relación lineal baja entre las variables. A diferencia de la temperatura del suelo que muestra una relación fuerte (R= 0,7119), indicando una representatividad alta de los datos.

Tabla 7. Parámetros de la correlación de Spearman realizada entre el flujo CO₂ y la Temperatura del aire y suelo. (R: Coeficiente de Correlación).

Correlación	R	95% intervalo de confianza	P
Tº aire vs CO ₂ flux	0,2839	0,09474 to 0,4533	0,0029
Tº suelo vs CO ₂ flux	0,7119	0,5450 to 0,8246	<0,001

No se encontró relación significativa entre la humedad del suelo (p=0,7286) y humedad del aire (p=0,1098) con el flujo de CO. A su vez estas presentan un

coeficiente correlación muy bajo, 0,2122 y -0,1547 respectivamente, intensificando la idea de una relación muy débil entre las variables.

Tabla 8. Parámetros de la correlación de Spearman entre el flujo de CO₂ y la Humedad del aire, junto con correlación de Pearson entre CO₂ y Humedad del suelo. (R: Coeficiente de Correlación).

Correlación	R	95% intervalo de confianza	P
H aire vs CO ₂ flux	-0,1547	-0,3390 to 0,04090	0,1098
H suelo vs CO ₂ flux	0,2122	-0,09809 to 0,4848	0,1774

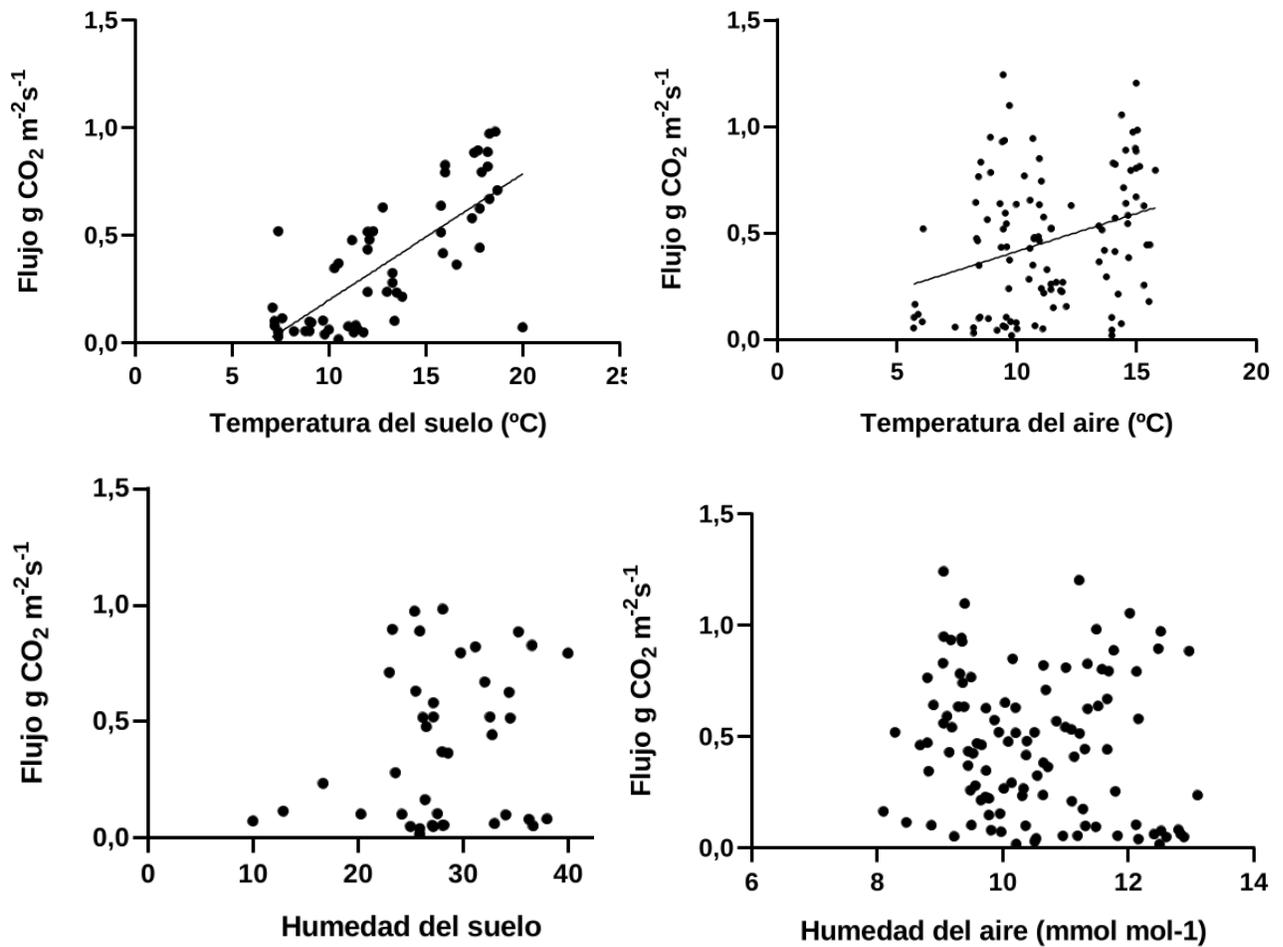


Figura 9. Relación entre flujo de CO₂ y a) temperatura del suelo. b) temperatura del aire. c) humedad del suelo. d) humedad del aire

Se obtuvo una relación lineal significativa entre la temperatura del suelo y el flujo de CO₂ ($p < 0,001$). Sin embargo, según el coeficiente de determinación este modelo solo explicaría un 55% de la variación de los datos. La ecuación del modelo de respiración del suelo (R_s) es el siguiente:

$$R_s = 0,05872 \times T - 0,3885 \quad (1)$$

Tabla 9. Parámetros obtenidos de regresión lineal entre Temperatura de suelo (°C) y flujo del CO₂.

Error estándar	Grados de libertad	R ²	F	P
0,007220	53	0,5552	66,15	<0,001

A través de un ANDEVA se determinó diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tratamientos de suelo ($p < 0,05$), estableciendo disparidad el desempeño de las distintas coberturas de suelo (Figura 9).

Tabla 10. Parámetros obtenidos en análisis ANOVA de una vía realizado para los tratamientos y el flujo de CO₂.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	de Cuadrado medio	Fc	P
Tratamientos	3	1,314	0,4381	F(3,12)= 9,639	<0,0016
Error	12	0,5454	0,04545		
Total	15	1,860			

A través de la prueba de Tukey de múltiple comparación se determinaron diferencias significativas de la tasa de respiración entre todos los tratamientos (CO, HS y FC) con el tratamiento testigo, el cual presenta el flujo de CO₂ más bajo en relación con los demás tratamientos. El detalle se describe en la Figura 10.

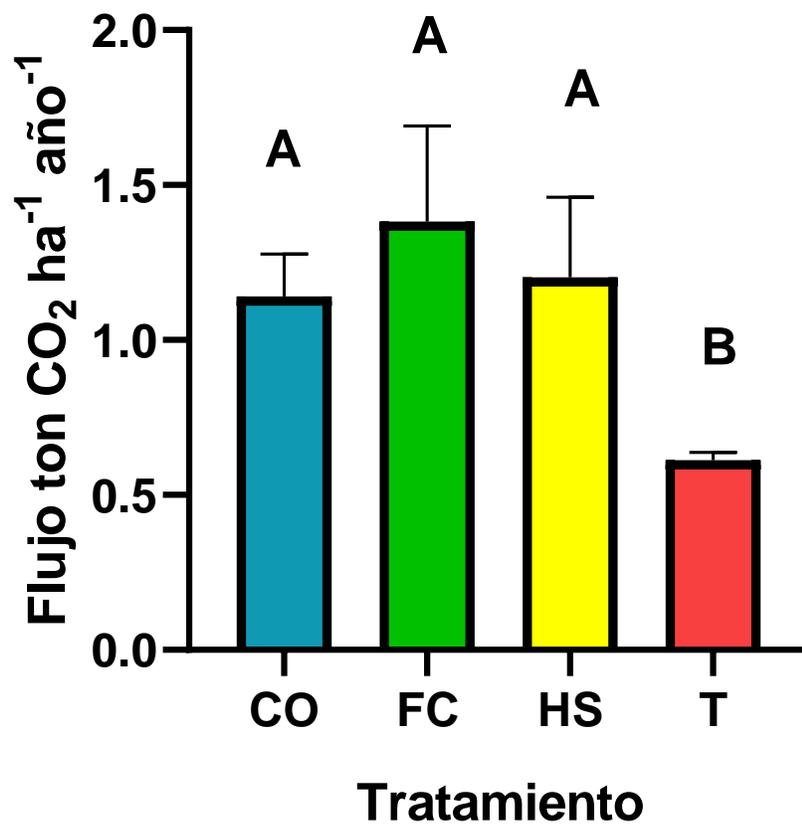


Figura 10. Análisis de Varianza ANOVA, por tratamiento y su valor de CO₂ anual.

3.3 Carbono del suelo:

El carbono del suelo presentó su mayor valor promedio en el tratamiento de hidrosiembra con 12,59% en promedio, aunque con una alta variación de los datos dependiendo de la parcela donde se realizó el muestreo. Le siguió fibra de coco (10,07%), control (8,78%) y finalmente testigo con un valor mínimo de carbono (4,43%).

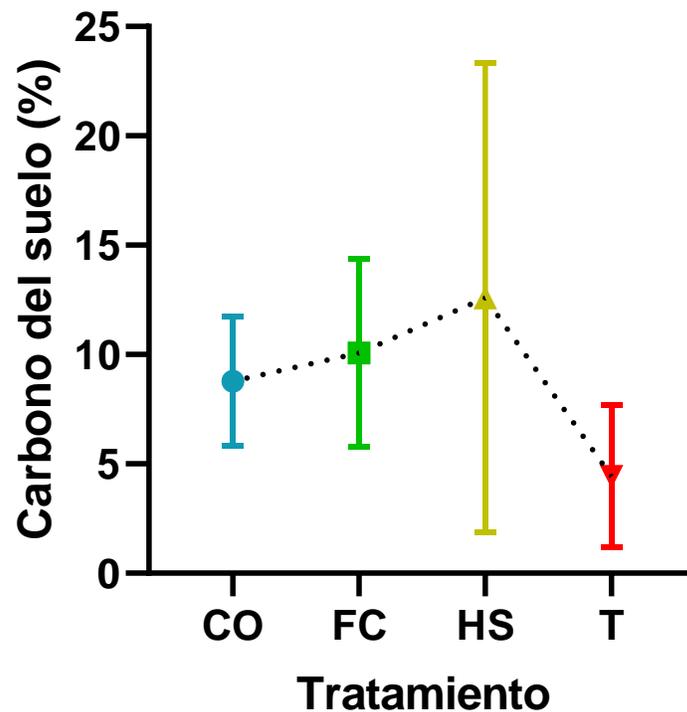


Figura 11. Carbono presente en el suelo (%) por tratamiento.

En cuanto al carbono del suelo la correlación realizada junto con el flujo de CO₂, mostró que no existe relación estadísticamente significativa entre las mismas ($p=0,4900$). A su vez el coeficiente de correlación (R) indica una baja relación entre las variables, mientras que el coeficiente de determinación (R²) muestra un bajo valor sugiriendo un ajuste pobre del modelo lineal.

Tabla 11. Parámetros obtenidos a la correlación entre flujo de CO₂ y Carbono del suelo (%). (R: coeficiente de correlación).

R	R ²	95% intervalo de confianza	P
0.4806	0.2309	-0.1289 to 0.8265	0.1138

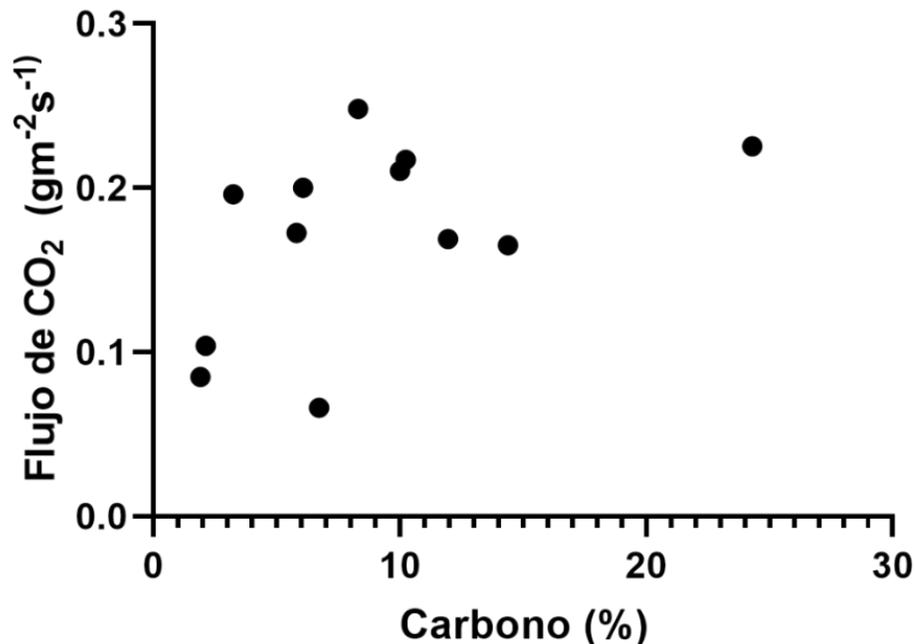


Figura 12. Relación entre el carbono del suelo y el flujo de CO₂.

Con respecto al indicador construido en relación con el flujo de CO₂ producido y el reservorio de C por hectárea en un año, el cual refleja el balance de CO₂ según el muestreo realizado. Se encontró que en cuantos a los balances de salida el tratamiento T presenta el mayor valor, mientras HS el menor, los valores se describen en la Tabla 12. Lo cual indica una mayor salida del carbono almacenado en el suelo del tratamiento sin coberturas. Si bien el indicador es bastante ilustrativo para entender las relaciones entre producción y reservorio, puede tener sus limitaciones ya que no se midió en todos los meses del año, por lo que su utilidad es más bien para indicar los flujos de balance de CO₂ por tratamiento, y no así una medida anual.

Tabla 12. Indicador del balance de CO₂ (producción vs. reservorio) en hectárea y año por tratamiento.

Tratamiento	Balace de C
CO	0.1298
FC	0.1371
HS	0.0952
T	0.1699

IV. DISCUSIÓN

La evaluación de la calidad del suelo se puede ligar con el concepto funcionamiento del ecosistema, ya que integra y conecta procesos con componentes tanto físicos, químicos como biológicos (Calderón et al., 2002) . Los parámetros biológicos del suelo son generalmente considerados dinámicos al reaccionar de manera más sustantiva al cambio o perturbaciones ambientales. En este sentido, la actividad biológica del suelo se puede relacionar de manera más directa a la calidad del suelo y su nivel relativo de recuperación (Aguilar-Garavito et al., 2015).

4.1 Lombrices del suelo:

En el muestreo realizado a fines de mayo del año 2022 y en el segundo muestreo en enero del 2023, no fue posible encontrar lombrices, a pesar de haber probado la metodología anteriormente. Esto no concuerda con otros estudios que plantean la repoblación de lombrices como un proceso rápido, es decir, alrededor de 1 a 3 años. Sin embargo, el material con el que se rellenó el vertedero corresponde a horizontes profundos del suelo (Cr), donde es poco probable encontrar lombrices de manera natural. Mientras es posible que el compost añadido tampoco presentara lombrices. De esta forma se infiere que la colonización de lombrices es totalmente dependiente de su movilidad por el área.

Estudios de rehabilitación de suelos corroboran que, en etapas iniciales, sin adición intencional de poblaciones de lombrices, la presencia de estos individuos es muy baja (Ashwood, 2016; Boyer et al., 2011).

A su vez es importante tener en consideración que las lombrices se distribuyen de manera heterogénea en el suelo, con una alta variabilidad espacial (Brown et al., 2001) por lo que podría ser posible encontrarlas en otras zona del área de estudio. Es importante considerar las áreas colindantes con los límites del predio, desde donde pudiesen colonizar estos individuos, como se ha observado de manera ocasional. Se infiere que la lejanía del plan piloto a estas zonas, además de la existencia de caminos y drenes pueden ser considerados quiebres o barreras físicas en el paisaje que impiden el movimiento de lombrices.

A tres años de la implementación del plan de revegetación es posible que el suelo reconstruido aun no desarrolle las características para ser colonizado por estas especies. Además de la perturbación inicial, la acumulación de materia orgánica en el suelo puede ser un factor importante ya que según varios autores (Brévault et al., 2007; Kladvko, 2001) existe una alta relación entre el contenido de materia orgánica, tanto en cantidad como calidad y la presencia de lombrices en el suelo. Es este sentido es importante destacar que en todos los tratamientos se incorporó una capa de aproximadamente 20 cm de compost de corteza de pino. Además, en los tratamientos de cobertura (HS, FC y C) los pastos son podados generando

un importante aporte de materia orgánico que podría ser utilizado por las lombrices. Mientras en el tratamiento FC el manto aplicado al inicio del proyecto, proporciona protección al suelo en el primer año y con el tiempo una capa de materia orgánica que se va descomponiendo. Por lo que existirían las condiciones idóneas para la presencia de lombrices. Entre las acciones adicionales que se podrían tomar para incentivar la colonización de lombrices se encuentran la inoculación del material, contar con una capa superficial de materia orgánica, así como añadir enmiendas de estiércol que promueve la actividad microbiana, sirviendo de alimentos a las lombrices (Pfiffner & Luka, 2007) lo cual puede aumentar la presencia de estos organismos y proveen beneficios adicionales para la vegetación adyacente.

Es necesario seguir realizando muestreos en distintas épocas del año, sobre todo en los meses más húmedos, considerando que la época de reproducción suele ser en otoño y primavera o inicio de verano (Evans & Guild, 1948), luego de las épocas lluviosas. Algunos estudios plantean que el tiempo de recuperación o colonización en ecosistemas rehabilitados puede ser entre 10 a 30 años dependiendo de la especie y condiciones del sitio (Armstrong & Bragg, 1984; Scullion, 1994).

A pesar del resultado, la presencia de otras especies encontradas como de los géneros *Armadillidium*, *Phyllophaga*, larvas de género no identificado y

Gnaphosidae que componen la edafofauna, entrega información inicial sobre algunas de las funciones ecosistémicas que pueden estar ocurriendo en el suelo. A través de sus grupos funcionales se infiere, a grandes rasgos, procesos como: descomposición de la materia orgánica y ciclaje de nutrientes por organismos detritivos, rizófagos y fitófagos, por lo que existen redes tróficas funcionando con depredadores como las arañas y escarabajos (Brown et al., 2001).

Otra consideración importante es analizar la metodología para la extracción de lombrices. Este tipo de muestreo por extracción puede ser útil para ciertos estratos del suelo, mientras que su efecto se distribuye principalmente para las lombrices del tipo anécicas (Chan & Munro, 2001) las cuales habitan las partes profundas del suelo y construyen galerías verticales sin ramificaciones (Blouin et al., 2013). A su vez Pélosi et al (2014) afirma efectividad de esta metodología con lombrices anécicas, también del tipo epigeas las cuales habitan y se alimentan en la hojarasca. Por otro lado, este método fue poco efectivo para especies endógeas habitantes del interior del suelo, las cuales construyen galerías horizontales con múltiples ramificaciones (Pélosi et al., 2014). Por lo cual se infiere que la metodología usada pudo no haber sido la mejor si es que la población dominante fuera del tipo endógena. Por tal razón, se propone probar en futuros estudios otras metodologías que se ajuste a las condiciones del suelo, sea más exhaustivo en su búsqueda y tenga efectos inocuos en la vegetación y edafofauna adyacente.

Estudios plantean que primero se recupera la actividad total y biomasa de los organismos del suelo (Harris, 2003), siendo el tiempo aproximado de uno a tres años luego de la implementación de acciones de restauración, mientras la composición puede tardar más tiempo en recuperarse. Sin embargo, se ha reportado que este proceso puede tardar más tiempo según las condiciones de cada sitio (Aguilar-Garavito et al., 2015). Por lo que se puede concluir que el suelo y sus procesos ecosistémicos asociados se encuentran en una trayectoria de recuperación inicial.

4.2 Carbono del suelo:

Los tratamientos de cobertura con mayor porcentaje de carbono fueron hidrosiembra y fibra de coco. Estos tratamientos generaron un aporte constante de materia orgánica al suelo, en el caso de FC el manto, además de proteger el suelo contra la erosión, radiación solar u otros, aportaron materia orgánica al descomponerse lentamente mientras también permitieron la colonización de pastos. De forma similar, HS con el aporte de semillas generó un estrato herbáceo, que además del aporte de sus raíces y rizodepositación, al cortarlo aportó una capa de materia orgánica superficial (mulch). En el caso del tratamiento CO, su valor de carbono es ligeramente inferior (no significativamente), a pesar de no contar con una cobertura de suelo, solo árboles. En este tratamiento la colonización por especies de pastos fue rápida y

espontánea lo cual ha aportado materia orgánica, así como la cobertura aportada por los árboles ha influido en su crecimiento mientras aporta C en su desarrollo y probablemente en mayor profundidad. Finalmente, el tratamiento testigo sin coberturas ni árboles que aporten MO de manera directa presentó un bajísimo % de carbono, aportado por las pocas especies que han germinado espontáneamente, así como la materia orgánica aportada por la capa de compost al inicio de la revegetación fue disminuyendo producto de la falta de cobertura y la mayor erosión reportada para esta condición (Torres, 2021).

Al construir un índice que relacione el C almacenado en el suelo con la respiración de CO₂, se evidenció la salida del C del suelo donde el tratamiento con mayor valor es T. Reafirmando la pérdida de C producto de la falta de cobertura o vegetación asociada. Mientras en los tratamientos de cobertura HS presentó el menor valor.

Con respecto al carbono del suelo y la respiración, no se encontró relación entre ellas. El carbono del suelo tiende a ser indicador que se recupera a largo plazo, cerca de 10 años según algunos estudios (Brye et al., 2002; Hansen & Gibson, 2014) variando de acuerdo con la condición de cada sitio. A su vez su calidad y cantidad depende de la diversidad de aportes de cobertura u hojarasca (Baer et al., 2010). Por lo que su recuperación y relación con otras propiedades y funciones del suelo está en la trayectoria inicial de recuperación.

4.3 Respiración del suelo:

Las tasas de respiración encontradas coinciden con valores de otros estudios en ecosistemas esclerófilos chilenos con algún grado de perturbación según Díaz Vasconcellos (2018) y de baja perturbación según Brown et al (2001). Los valores de R_s registran diferencias en los valores según la estación del año. A su vez según Yáñez Díaz et al (2017) coincide con valores similares de respiración en sistemas agrícolas, pastizales y plantación, lo cual puede indicar que el área de estudio se encuentra en una trayectoria de recuperación, con actividades metabólicas similares a las producidas en ecosistemas naturales.

En cuanto a los horarios de medición, el mayor flujo de CO_2 se registró al medio día, seguido por la tarde y finalmente mañana. A su vez se encontraron diferencias significativas entre el flujo de la mañana con el medio día. Esta relación ha sido explicada ampliamente en la literatura (Murcia-Rodríguez & Ochoa-Reyes, 2008), debido a efecto de factores abióticos y bióticos que varían durante el día, como temperatura, humedad, tipo de vegetación, fotosíntesis u otras que regulan las actividades metabólicas de microorganismos y plantas microbiana (Cueva-Rodríguez et al., 2012). A su vez estos factores explican la variabilidad en torno a la época de medición, donde los meses correspondientes a primavera (septiembre-noviembre) alcanzan los mayores valores de R_s , debido principalmente a una mayor actividad fotosintética, humedad disponible en el

suelo lo cual estimula la actividad de microorganismos (Gomez-Casanovas et al., 2012) descomponiendo hojarasca y materia orgánica activamente (Rey et al., 2002). Mientras que los menores valores se alcanzan en verano, donde la humedad en el suelo es restringida lo que disminuye la actividad de microorganismos y en otoño invierno, donde la actividad fotosintética es menor producto de una menor radiación solar.

El valor más alto de respiración lo presentó el tratamiento HS, seguido de CO, FC y finalmente T. Esto se debe a que la respiración del suelo proviene de la actividad de las raíces de las plantas y la respiración de los organismos del suelo (Lloyd & Taylor, 1994). Estos son los tratamientos de cobertura que presentan más raíces de plantas herbáceas y un mayor aporte de materia orgánica lábil al suelo ya que el estrato herbáceo se corta cada cierto tiempo. Mientras que en el caso de FC el material de cobertura se va descomponiendo con el tiempo, lo cual estimula la actividad de los microorganismos encargados de su descomposición, mejorando la calidad del suelo. La adición de coberturas y semillas de pastos permite una sucesión muy similar a un proceso espontáneo en el ecosistema (Gajić et al., 2019). En cuanto a las raíces se ha demostrado que las raíces finas, ya sea de pastizales o árboles jóvenes, respiran más que las raíces leñosas (Saiz et al., 2006). La plantación de especies leñosas, en conjunto con la adición de tratamientos de cobertura ha sido efectiva para estimular la actividad biológica y por consiguiente en la trayectoria de recuperar la funcionalidad del suelo.

Sin embargo, es importante distinguir dentro de la respiración el CO₂ producido por la actividad de raíces en comparación con los microorganismos del suelo. Infiriendo por la edad de la revegetación es probable que haya una mayor actividad de raíces finas de pastos y árboles jóvenes que de microorganismos, lo cual se ha estudiado se va invirtiendo esta relación con la edad de las especies (Saiz et al., 2006).

Con respecto a la relación de la respiración del suelo y humedad, no se encontró correlación entre las variables, a diferencia de otros estudios que plantean una relación directa entre ellas (Díaz Vasconcellos, 2018). Una posible explicación es que solo se evaluó la humedad superficial la cual no necesariamente representa el estado de humedad total del suelo. Es importante considerar que estos sitios son regados durante el periodo estival, las especies arbóreas pueden obtener agua de estratos más profundos por lo que la respiración de raíces no se vería tan afectada por periodos estacionales tan marcados de sequía. Por otro lado, la temperatura del aire y del suelo, donde sí se encontró relación entre ellas y la respiración de suelos. Esto concuerda con lo cual se el estudio realizado por Lloyd & Taylor (1994), donde plantean que cuando la humedad no fue tan limitante, los flujos de CO₂ aumentan de manera más directa con la temperatura. Además, otros estudios en Chile central prueban una relación lineal entre las

variables de temperatura del suelo con flujos de CO₂, así como de contenido de humedad del suelo con los flujos de CO₂ (Díaz Vasconcellos, 2018).

Se construyó un modelo lineal entre las variables (Rs y T), el cual explica el 55,5% de la variación de los datos. Por lo que es importante considerar que la respiración del suelo es un proceso multifactorial que no puede ser precedido solamente a través de la temperatura y humedad (Davidson et al., 2000; Rey et al., 2002), si no que depende además de la estación del año, el tipo del suelo (Dowhower et al., 2020), cobertura y vegetación presente. En este sentido es importante mantener un monitoreo del flujo de CO₂ a través del tiempo y en distintas estaciones del año, con la finalidad de tener una mejor comprensión de los flujos de gases de efecto invernadero asociados a la actividad biológica del suelo, descomposición de hojarasca y crecimiento de raíces.

Estudios han reportado que la recuperación de la productividad primaria tiende ser rápida, en un periodo no mayor a tres años (Mitchell et al., 1999) junto con la actividad de organismos del suelo (Harris, 2003), lo cual en relación con los valores de respiración obtenidos indican un estado de recuperación inicial de funciones del suelo en los tratamientos de cobertura (HS, FC y C). A su vez la recuperación de las comunidades de microorganismos es un proceso de mediano plazo (Harris, 2003), por lo que es esperable cambios en los valores de Rs y sus componentes a medida que avanza el tiempo de la revegetación.

4.4 Implicancias del estudio:

En el contexto de cese de operaciones de industrias y/o vertederos surge la necesidad de rehabilitar la funcionalidad ecosistémica de estos espacios. Futuros proyectos de rehabilitación deben considerar los múltiples beneficios que la restauración ecológica ofrece en comparación a la simple revegetación de estos espacios. La revegetación con especies nativas sumado a las coberturas de suelo maximiza los beneficios ecosistémicos (Bullock et al., 2011). La rehabilitación y revegetación del vertedero con especies nativas aporta evidencia sobre la recuperación de funciones ecosistémicas claves como la generación de hábitat, aumento de la biodiversidad, secuestro de carbono y control de la erosión.

A su vez la recuperación de funciones impacta positivamente a las comunidades a través de los servicios ecosistémicos. Potenciando el bienestar humano al contener posibles contaminantes nocivos para la salud (Gajić et al., 2019; Nagendran et al., 2006), generar espacios de recreación u otros beneficios.

Este estudio enfatiza la importancia de rehabilitar áreas industriales degradadas dentro de las áreas urbanas, incentivando la restauración ecológica y la investigación científica para continuar profundizando el conocimiento sobre las trayectorias y dinámicas de recuperación. Finalmente se evidencia la relevancia

de utilizar indicadores biológicos de suelo como medidas dinámicas de los procesos ecosistémicos.

V. CONCLUSIONES

En el contexto de rehabilitación de un suelo reconstruido sobre un depósito de cenizas de termoeléctrica, este estudio muestra que es posible complementar las acciones del sellado con el relleno, rehabilitación y plantación de especies leñosas nativas. Este estudio evidencia que todas las coberturas utilizadas son efectivas en acelerar la recuperación de la funcionalidad edáfica, y, por lo tanto, de la calidad del suelo, mientras que la ausencia de revegetación activa no lograría su recuperación efectiva. Se identificaron así mismo diversas funciones asociadas al suelo (hábitat para la biodiversidad y secuestro de C) que generan bienestar no solo al ecosistema, sino también a la comunidad humana que habita los alrededores de estas zonas.

Considerando las posibilidades de rehabilitación de un vertedero surge la posibilidad de usar estos lugares como espacios recreacionales para la comunidad, así como instancias de investigación científica de restauración ecológica en contextos de alta degradación, como es el ejemplo de este caso de estudio.

VI. GLOSARIO

Metabolismo ecosistémico: se refiere a procesos que ocurren dentro del ecosistema, donde existe un intercambio continuo de energía y materia entre los componentes bióticos y abióticos. Estos procesos sustentan el funcionamiento de los ecosistemas.

Microorganismos de suelo: son la fracción microscópica de los seres vivos del suelo. Compuesto por bacterias, hongos, algas, virus y protozoos.

Mulch: es la cobertura vegetal, mantillo o materia orgánica en fases iniciales de descomposición que se deposita sobre el suelo. Puede ser pastos, hojas, ramas u similares.

Sumideros de Carbono: corresponde a depósitos naturales donde se almacena el CO₂ atmosférico. Por ejemplo: suelo, océanos y bosques.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. (CR)². (2021). Explorador climático, El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)².
2. Abril, A. (2003). ¿ Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología austral*, 13(2), 195-204.
3. Aguilar-Garavito, M., Ariza, A., Inge, A., Aronson, J., Avella, A., Bernal Castro, E., . . . Carvajal, M. (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica aplicado a ecosistemas terrestres.
4. Armstrong, M., & Bragg, N. (1984). Soil physical parameters and earthworm populations associated with opencast coal working and land restoration. *Agriculture, ecosystems & environment*, 11(2), 131-143.
5. Arshad, M. A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88(2), 153-160.
6. Baer, S., Meyer, C., Bach, E., Klopff, R., & Six, J. (2010). Contrasting ecosystem recovery on two soil textures: implications for carbon mitigation and grassland conservation. *Ecosphere*, 1(1), 1-22.
7. Bentham, H., Harris, J., Birch, P., & Short, K. (1992). Habitat classification and soil restoration assessment using analysis of soil microbiological and physico-chemical characteristics. *Journal of Applied Ecology*, 711-718.
8. Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker, G., Brussaard, L., Butt, K. R., . . . Brun, J.-J. (2013). A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, 64(2), 161-182. doi:<https://doi.org/10.1111/ejss.12025>

9. Brévault, T., Bikay, S., Maldes, J.-M., & Naudin, K. (2007). Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. *Soil and Tillage Research*, 97(2), 140-149.
10. Brown, G. G., Fragoso, C., Barois, I., Rojas, P., Patrón, J. C., Bueno, J., . . . Rodríguez, C. (2001). Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta zoológica mexicana (nueva serie)*(Es1), 79-110.
11. Brye, K. R., Gower, S. T., Norman, J. M., & Bundy, L. G. (2002). Carbon budgets for a prairie and agroecosystems: effects of land use and interannual variability. *Ecological Applications*, 12(4), 962-979.
12. Bullock, J. M., Aronson, J., Newton, A. C., Pywell, R. F., & Rey-Benayas, J. M. (2011). Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities. *Trends in ecology & evolution*, 26(10), 541-549.
13. Calderón, M. A., Moreno, M. M., & Barra, J. E. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605-620.
14. Casanova, M., Salazar, O., Seguel, O., & Luzio, W. (2013). *The soils of Chile* (Vol. 10): Springer.
15. Chan, K.-Y., & Munro, K. (2001). Evaluating mustard extracts for earthworm sampling. *Pedobiologia*, 45(3), 272-278.
16. Comerford, N. B., Franzluebbers, A. J., Stromberger, M. E., Morris, L., Markewitz, D., & Moore, R. (2013). Assessment and evaluation of soil ecosystem services. *Soil Horizons*, 54(3), 1-14.
17. Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Design and use of a portable system for measuring soil respiration in ecosystems. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327-336.

18. Davidson, E. A., Verchot, L. V., Cattânio, J. H., Ackerman, I. L., & Carvalho, J. (2000). Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 48, 53-69.
19. Díaz Vasconcellos, M. A. (2018). Flujos de CO₂ y CH₄ en suelos de matorrales y bosques esclerófilos en la Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha, Región Metropolitana.
20. Doran, J. W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88(2), 119-127.
21. Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.
22. Dowhower, S., Teague, W. R., Casey, K., & Daniel, R. (2020). Soil greenhouse gas emissions as impacted by soil moisture and temperature under continuous and holistic planned grazing in native tallgrass prairie. *Agriculture, ecosystems & environment*, 287, 106647.
23. Espinosa Llorens, M. d. C., LÓPEZ, M., PELLÓN, A., ROBERT, M., DIAZ, S., GONZÁLEZ, A., . . . FERNÁNDEZ, A. (2010). Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(4), 313-325.
24. Evans, A., & Guild, W. M. (1948). Studies on the relationships between earthworms and soil fertility: V. Field populations. *Annals of Applied Biology*, 35(4), 485-493.
25. Filip, Z. (2002). International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88(2), 169-174.

26. Gajić, G., Mitrović, M., & Pavlović, P. (2019). Ecorestoration of fly ash deposits by native plant species at thermal power stations in Serbia. In *Phytomanagement of polluted sites* (pp. 113-177): Elsevier.
27. Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., . . . Liu, J. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27 (S1): S1-S46., 27(S1), S1-S46.
28. Gob, G. d. C. (2020, 2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile, actualización 2020*.
29. Gomez-Casanovas, N., Matamala, R., Cook, D. R., & Gonzalez-Meler, M. A. (2012). Net ecosystem exchange modifies the relationship between the autotrophic and heterotrophic components of soil respiration with abiotic factors in prairie grasslands. *Global Change Biology*, 18(8), 2532-2545.
30. Gunn, A. (1992). The use of mustard to estimate earthworm populations. *Pedobiología*, 36(2), 65-67.
31. Hansen, M. J., & Gibson, D. J. (2014). Use of multiple criteria in an ecological assessment of a prairie restoration chronosequence. *Applied Vegetation Science*, 17(1), 63-73.
32. Hanson, P., Edwards, N., Garten, C. T., & Andrews, J. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48, 115-146.
33. Harris, J. (2003). Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 54(4), 801-808.
34. Kladivko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1-2), 61-76.

35. Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1991). Conservation and Enhancement of Soil Quality. In: Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. *International Board for Soil Research and Management, Bangkok*, 175-203.

36. Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., . . . Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology (France)*.

37. Lloyd, J., & Taylor, J. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional ecology*, 315-323.

38. López-Teloxa, L. C., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). CO2 mitigation strategies based on soil respiration. *La Granja*, 32(2), 30-41.

39. Luebert, F., & Plischoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*: Editorial Universitaria.

40. Maier, M., Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E., & Schindler, D. (2011). Soil CO2 efflux vs. soil respiration: Implications for flux models. *Agricultural and forest meteorology*, 151(12), 1723-1730.

41. McDonald, T., Gann, G., Jonson, J., & Dixon, K. (2016). International standards for the practice of ecological restoration—including principles and key concepts. (Society for Ecological Restoration: Washington, DC, USA.). *Soil-Tec, Inc., © Marcel Huijser, Bethanie Walder*.

42. Mitchell, R., Marrs, R., Le Duc, M., & Auld, M. (1999). A study of the restoration of heathland on successional sites: changes in vegetation and soil chemical properties. *Journal of Applied Ecology*, 36(5), 770-783.

43. Murcia-Rodríguez, M. A., & Ochoa-Reyes, M. P. (2008). Respiración del suelo en una comunidad sucesional de pastizal del Bosque Altoandino en la cuenca del río Pamplonita, Colombia. *Caldasia*, 30(2), 337-353.

44. Nagendran, R., Selvam, A., Joseph, K., & Chiemchaisri, C. (2006). Phytoremediation and rehabilitation of municipal solid waste landfills and dumpsites: A brief review. *Waste Management*, 26(12), 1357-1369.
45. Otero, M. d. C., Torres, N., Plaza, G. d. C., & Pérez Brandán, C. (2002). Nemátodos bacteriófagos como bioindicadores y como organismos asociados a los procesos de biorremediación.
46. Pélosi, C., Chiron, F., Dubs, F., Hedde, M., Ponge, J.-F., Salmon, S., . . . Nelieu, S. (2014). A new method to measure allyl isothiocyanate (AITC) concentrations in mustard—Comparison of AITC and commercial mustard solutions as earthworm extractants. *Applied Soil Ecology*, 80, 1-5.
47. Pfiffner, L., & Luka, H. (2007). Earthworm populations in two low-input cereal farming systems. *Applied Soil Ecology*, 37(3), 184-191.
48. Rey, A., Pegoraro, E., Tedeschi, V., De Parri, I., Jarvis, P. G., & Valentini, R. (2002). Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 8(9), 851-866.
49. Ribeiro, N. S., Matos, C. N., Moura, I. R., Washington-Allen, R. A., & Ribeiro, A. I. (2013). Monitoring vegetation dynamics and carbon stock density in miombo woodlands. *Carbon balance and management*, 8(1), 1-9.
50. Ryan, M. G., & Law, B. E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73, 3-27.
51. Saiz, G., Byrne, K. A., BUTTERBACH-BAHL, K., Kiese, R., Blujdea, V., & Farrell, E. P. (2006). Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biology*, 12(6), 1007-1020.
52. Scullion, J. (1994). Earthworms and the rehabilitation of disturbed land. *University of Wales Revue of Science and Technology*, 9, 25-30.

53. SER. (2004). The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International. .
54. Simmons, E. (1999). Restoration of landfill sites for ecological diversity. *Waste management & research*, 17(6), 511-519.
55. Torres, C. (2021). *EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE TRATAMIENTOS DE COBERTURA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN UN RELLENO DE CENIZAS DE TERMOELÉCTRICA*. (Proyecto de Título presentado a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Forestal).
56. Velásquez, E. (2004). *Bioindicadores de calidad de suelo basados en poblaciones de macrofauna y su relación con características funcionales del suelo*. (Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agropecuarias con énfasis en Suelos). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, (181)
57. Vos, P., Meelis, E., & Ter Keurs, W. (2000). A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environmental monitoring and assessment*, 61, 317-344.
58. Wang, Z., Ji, L., Hou, X., & Schellenberg, M. P. (2016). Soil respiration in semiarid temperate grasslands under various land management. *PLoS One*, 11(1), e0147987.
59. Yáñez Díaz, M. I., Cantú Silva, I., González Rodríguez, H., Marmolejo Monsiváis, J. G., Jurado, E., & Gómez Meza, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(42), 123-149.

VIII. APÉNDICE

	dC/dt	SE of dC/dt	r ²	Flux	Flux CV
Exponential	0.03801	0.00073	0.70446	0.36234	2.18547
Linear	0.00785	0.00086	0.58283	0.0748	11.06475

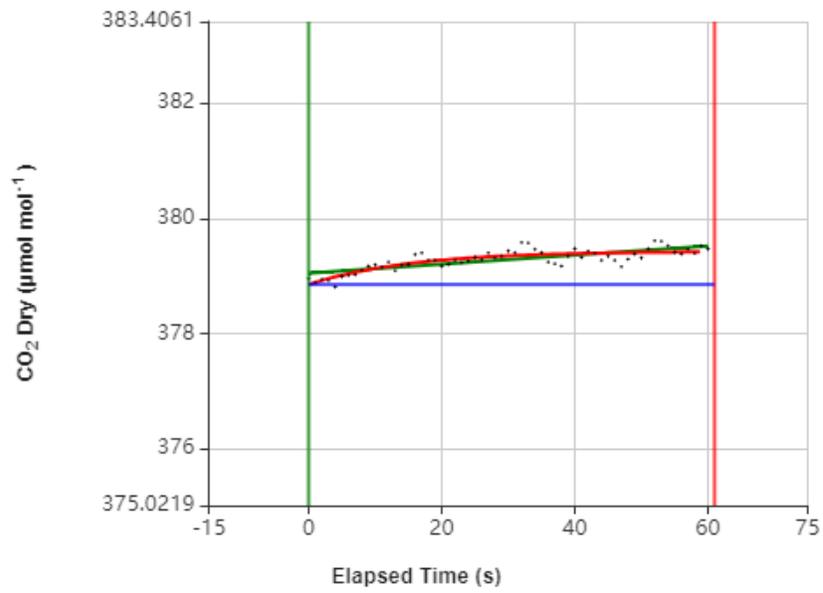


Figura 13. Modelo exponencial y lineal de datos de flujo de CO₂, en SOILFLUX pro.



Figura 14. Detalle lombrices extraídas en el pre-muestreo.