



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
GEOLOGÍA**

**COMPARACIÓN DE LA DINÁMICA DEL CARBONO  
EN BOSQUE NATIVO VERSUS PLANTACIONES DE  
PINUS SP. EN EL PARQUE NACIONAL NONGUÉN,  
REGIÓN DEL BÍO-BÍO, CHILE**

**Memoria para optar al Título de Geóloga**

**Maite del Pilar Aguilar Gómez**

**Profesora Guía:** Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

**Profesora Co-Guía:** Dra. Pamela Ivonne Castillo Lagos

**Profesora Comisión:** MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez

**Concepción, 2024**

*A mi familia,  
A la familia que yo escogí,  
Y a mí, por nunca rendirme*

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo financiero brindado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) mediante el proyecto de cooperación internacional MPG 190022 entre la Universidad de Concepción y el Max Planck Institute for Biogeochemistry, dirigido por el Dr. Felipe Aburto; como también al proyecto VRID InvestigadorAs 2022000571, cuya investigadora responsable es la Dra. Fernanda Álvarez Amado.

Mi más sincero agradecimiento a la profesora Fernanda Álvarez, por incluirme en el proyecto y orientarme a lo largo de todos estos meses de trabajo. Agradecer a la profesora Pamela Castillo Lagos, por confiarme su trabajo, compartir su sabiduría, su constante apoyo y paciencia, y por responder siempre las mil dudas que le hice llegar. A ambas profesoras, por enseñarme implícitamente que es posible ser una gran profesional, madre y mujer a la vez. A Josefa, por hacer más divertidas las visitas a Nonguén, y a Ignacio por el apoyo en los trabajos de laboratorio.

Agradecer a mi familia, sin ellos jamás habría llegado hasta acá. A mi mamá Pilar por su apoyo y amor incondicional; a mi papá Eduardo, por su incansable esfuerzo y compañía; y a mis hermanas Victoria y Julieta, por entregarme el amor más puro que puedo conocer y la felicidad más grande que podré experimentar. A Verónica, la hermana que yo escogí, gracias por acompañarme siempre.

A mis queridos amigos Martín, Matías, Álvaro, Nicolás, Joaquín, David, Nelson y Diego, porque a pesar de todas las mañan que me hicieron pasar, sin querer hicieron más feliz mi estadía en la universidad. A mi amiga Daniela, por ser siempre mi complemento ideal. A Esteban, por su constante apoyo, compañía, amistad y amor.

Finalmente, agradezco a todas las personas, quienes de una u otra forma, han estado ahí para mí en estos largos seis años, muchas gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema .....	1
1.2 Hipótesis .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Ubicación y Accesos.....	3
1.5 Trabajos Anteriores.....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 Suelo .....	6
2.1.1 Horizontes de Suelo.....	7
2.1.2 Coberturas y Usos de Suelo.....	9
2.2 Ciclo del Carbono.....	11
2.3 Flora.....	13
<b>3. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	<b>15</b>
3.1 Geomorfología.....	15
3.1.1 Cordones montañosos o graníticos .....	16
3.1.2 Plataformas de erosión o graníticas .....	16
3.2 Geología .....	16
3.2.1 Basamento Metamórfico .....	17
3.2.2 Batolito Costero del Sur .....	18
3.2.3 Depósitos fluviales y aluviales .....	19
3.3 Geología Estructural.....	19
3.4 Hidrología.....	19
3.5 Mineralogía de los suelos .....	21
3.6 Hidrogeología.....	23
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>24</b>
4.1 Selección de sitios de estudio .....	24
4.2 Diseño experimental para el muestreo y análisis.....	25
4.2.1 $C_{total}$ en suelos .....	28
4.2.2 $C_{total}$ disuelto en aguas de poros.....	29

4.2.3 Flujo de CO <sub>2</sub> desde suelos.....	30
4.2.4 Hojarasca del suelo.....	31
4.3 Tratamiento de datos y análisis estadístico.....	32
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
5.1 C <sub>total</sub> disuelto en suelos.....	35
5.2 C <sub>total</sub> disuelto en aguas de poros.....	38
5.3 Flujo de CO <sub>2</sub> desde suelos.....	39
5.4 Hojarasca del suelo.....	42
5.5 Modelo de la dinámica del Carbono para el Parque Nacional Nonguén.....	43
<b>6. DISCUSIÓN.....</b>	<b>46</b>
6.1 Influencia de las características climáticas en la dinámica del Carbono.....	46
6.1.1 Variaciones estacionales de la dinámica del Carbono.....	47
6.2 Variaciones en la dinámica del Carbono entre sitios con la misma cobertura.....	48
6.3 Influencia en las características fisicoquímicas del suelo en los contenidos de C <sub>total</sub> .....	49
6.4 Influencia de la mineralogía del suelo en el contenido de C <sub>total</sub> .....	50
6.5 Influencia en la actividad de los microorganismos en la emisión de CO <sub>2</sub> .....	51
6.6 Efectos del reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales sobre el almacenamiento de Carbono.....	52
6.7 Recomendaciones para disminuir incertezas del modelo.....	53
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Mapa de ubicación del área de estudio. ....	3
<b>Figura 1.2</b> Mapa de distribución de los sitios de estudio dentro del Parque Nacional. ....	4
<b>Figura 2.1</b> Diagrama de factores y respuestas generales de los suelos frente a los procesos de meteorización. Modificado de (Brantley et al., 2006). ....	7
<b>Figura 2.2</b> Horizontes de suelo distinguibles en el sitio NOPL2, presente en el área de estudio. Notar que no se alcanza a apreciar el horizonte R. ....	8
<b>Figura 2.3</b> Mapa de coberturas y usos de suelo dentro del Parque Nacional Nonguén. ....	10
<b>Figura 2.4</b> Diagrama del Ciclo del Carbono, con sus principales etapas. ....	12
<b>Figura 3.1</b> Mapa geomorfológico del área de estudio. Modificado de Ramírez (2004). ....	15
<b>Figura 3.2</b> Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Ramírez (2004). ....	17
<b>Figura 3.3</b> Mapa de ubicación de la subcuenca del estero Nonguén, y sus principales redes hidrográficas. ....	20
<b>Figura 3.4</b> Caracterización mineralógica y propiedades fisicoquímicas de los sitios NOBN1 (GR-NF) y NOPL1 (GR-PL). Obtenido de (Castillo et al., In review). ....	22
<b>Figura 3.5</b> Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), para el área ubicada entre las cuencas costeras e islas ubicadas entre el río Itata y río Biobío. Modificado de DGA (2022). ....	23
<b>Figura 4.1</b> Distribución y organización de los sitios de estudio en el Parque Nacional Nonguén. Modificado de Crovo, (2020). ....	25
<b>Figura 4.2</b> Modelo conceptual de reservorios, aportes ( <i>inputs</i> ) y emisiones ( <i>outputs</i> ) de carbono. ....	27
<b>Figura 4.3</b> Metodología de muestreo y preparación de muestras de agua de poros. (a. Instalación de lisímetro en calicata; b. Extracción de agua de poro a través de bombas al vacío; c. Filtrado de muestras; d. Muestras empaquetadas para envío a análisis). ....	30
<b>Figura 4.4</b> Metodología de muestreo de flujo de CO <sub>2</sub> . (a. Collar de PVC heterogéneo de 0.4 m de altura; b. Muestreo con instrumento LICOR). ....	31
<b>Figura 4.5</b> Metodología de muestreo de hojarasca de suelo. (a. Muestreo de hojarasca en terreno; b. Muestras en el horno de secado). ....	32
<b>Figura 5.1</b> Contenido de carbono en el suelo. (a. Variación del contenido de carbono en profundidad para cada sitio de estudio (en [Mg/ha]); b. Variación del contenido total de carbono por sitio (en [Mg/ha]), las letras indican diferencias estadísticamente significativas, y las barras de error representan la desviación estándar de las muestras ( $\sigma$ ); c. Diagrama de cajas y bigotes que indica la variación del contenido total de carbono ponderado por la profundidad para ambas condiciones). ....	36
<b>Figura 5.2</b> Comparación de la variabilidad del contenido de carbono en los diferentes horizontes según cobertura: a. Horizonte O-A; b. Horizonte B; c. Horizonte C. Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de muestras. ....	38
<b>Figura 5.3</b> Diagrama de cajas y bigote que muestra la variación del contenido de carbono en las aguas de poro recuperadas, para las distintas condiciones. ....	39
<b>Figura 5.4</b> Flujo de Carbono en los sitios de estudio (a. En sitios de Bosque Nativo (BN); b. En sitios de plantaciones forestales (PL); c. Comparación del flujo de Carbono entre las dos	

condiciones de estudio; d. Comparación de los promedios mensuales del flujo de Carbono de todos los sitios de cada condición; e. Variación total del flujo de carbono anual por sitio, las letras indican diferencias estadísticamente significativas; f. Variación total del flujo de carbono anual por condición, las letras indican diferencias estadísticamente significativas). ..... 41

**Figura 5.5** Distribución de caída de hojarasca en los sitios de estudio (a. Comparación del contenido de hojarasca en BN y PL en el periodo de un año, las letras indican diferencias estadísticamente significativas, y las barras de error representan la desviación estándar de las muestras ( $\sigma$ ); b. Distribución anual de la caída de hojarasca). ..... 42

**Figura 5.6** Modelo conceptual de la dinámica del carbono en el Parque Nacional Nonguén, según el tipo de cobertura presentada. .... 44

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Nombre y coordenadas de los sitios de estudio. ....	25
<b>Tabla 5.1</b> Cantidad de horizontes genéticos muestreados.....	35
<b>Tabla 5.2</b> Promedio ponderado de carbono por la profundidad (en [Mg/ha]) según horizonte genético.....	37
<b>Tabla 5.3</b> Contenido de carbono disuelto en agua de poros (en Mg/ha), en las muestras que pudieron ser analizadas.....	38
<b>Tabla 5.4</b> Flujo de Carbono desde suelos, en [Mg/ha], para los distintos sitios dentro del área de estudio, en un periodo de un año. ....	40
<b>Tabla 5.5</b> Contenido de hojarasca, estadísticos y contenido de carbono para los sitios NOBN1 y NOPL1.....	43



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Distribución del contenido de carbono en los distintos horizontes genéticos para cada uno de los sitios, con los parámetros necesarios para su obtención. (D.A.: densidad aparente; Fg: fragmentos gruesos (> 2mm); HG: horizonte genético).....	61
--	----

## RESUMEN

El carbono es uno de los elementos más importantes para la construcción de la vida en la Tierra, pues se puede reconocer de forma transversal en todos los ambientes terrestres. Sin embargo, el ciclo del carbono ha experimentado un sinnúmero de modificaciones debido principalmente al fuerte impacto de la actividad antrópica. Los suelos conforman uno de los principales reservorios de carbono, no obstante, en las últimas décadas ha experimentado fuertes alteraciones debido a los cambios en los usos de suelo. Es por ello, que este estudio busca comprobar que existen efectos perjudiciales en el proceso de almacenamiento de carbono en los suelos al producirse reemplazos de bosques nativos por plantaciones forestales.

Se estudió el comportamiento de los reservorios, ingresos y egresos de carbono desde el suelo, tanto en sitios cubiertos por bosque nativo, como sitios con cubierta de plantaciones forestales, dentro del Parque Nacional Nonguén, ubicado en la Provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile. Para ello, se analizaron los diversos componentes presentes en la dinámica de los bosques, que influyen en el ciclo del carbono. Entre ellos se encuentra el carbono contenido en los horizontes de suelo, la biomasa superficial, crecimiento de raíces, hojarasca, escurrimiento de aguas de poro y el flujo de CO<sub>2</sub>, producto de la respiración de los microorganismos.

A partir del balance de masas entre los diferentes parámetros de estudio es posible identificar que existe un efecto contraproducente en el almacenamiento de carbono en los suelos, debido a la sustitución de los bosques nativos por plantaciones forestales, viéndose disminuida la reserva de este elemento de interés en un 34% aproximadamente. En concreto, se registró una disminución de la reserva de carbono total de  $3,91 \pm 2,4$  Mg/ha, pasando de  $11,54 \pm 24,1$  Mg/ha para bosque nativo, a una cifra de  $7,63 \pm 26,5$  Mg/ha para plantaciones forestales. Además, se reconocieron que las disminuciones más importantes se concentraron en la biomasa de pie, la producción de raíces y el contenido total de carbono albergado por el suelo.

Es fundamental ampliar este estudio mediante la incorporación de otros enfoques, que permitirá realizar un análisis más completo de cómo los cambios en la manera en que se utilizan los suelos afectan a los ciclos biogeoquímicos globales.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del Problema

El carbono es uno de los elementos más abundantes en la Tierra, ya que es fundamental en la formación de la vida del planeta. Su presencia es transversal en los ambientes terrestres, pero a grandes rasgos puede encontrarse en cinco reservorios: litósfera, océanos, materia orgánica presente en los suelos, atmósfera y biósfera (Hillel & Hatfield, 2005). En cada uno el carbono cumple un rol fundamental, que contribuye a la estabilidad del planeta.

En líneas generales, el ciclo terrestre del carbono consta de tres etapas: el traspaso del CO<sub>2</sub> desde la atmósfera a las plantas a través de la fotosíntesis, consumo y oxidación del C de las plantas por animales y microorganismos, y por último el retorno del CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Sin embargo, una parte importante del carbono que es absorbido por las plantas es traspasado a los suelos a través de las raíces y la adición de materia vegetal (Weil & Brady, 2016).

En los suelos, el carbono es probablemente el componente más importante, puesto que de este dependen las propiedades físicas, químicas y biológicas de estos, además de ser un indicador primario de la calidad del suelo (Hillel & Hatfield, 2005).

El ciclo del carbono, y cómo este varía con respecto a los distintos usos que pueden tener los suelos constituye un área poco abordada, a pesar de que, en las últimas décadas ha ocurrido un cambio acelerado en los usos del suelo en nuestro país y en el mundo, por el crecimiento de la actividad agrícola y forestal, en detrimento de áreas que originalmente estaban cubiertas por bosque nativo (Martínez Retureta, 2021). El reemplazo del bosque nativo por plantaciones forestales puede tener consecuencias negativas en la cantidad de carbono que pueden almacenar los ecosistemas, disminuyéndolo sustancialmente (entre un 15 a 30%) (Liao et al., 2010), provocando una serie de efectos nocivos para el ambiente, como lo son la pérdida de la biodiversidad y un aumento de las tasas erosivas (Crovo et al., 2021). Incluso, está comprobado que una de las principales causas del cambio climático global es la variación en la cobertura y usos de suelo, puesto que inducen perturbaciones significativas a procesos globales, como el balance energético de la superficie terrestre, el ciclo del agua, y en el principal objeto del presente estudio, que es el ciclo del carbono (Song et al., 2018).

Es por esto que esta memoria de título busca analizar las diferencias que puedan existir entre un suelo destinado a plantaciones forestales y un suelo formado bajo bosque nativo, dentro del Parque Nacional Nonguen, en donde ambos ambientes coexisten a distancias acotadas, y como ha variado la dinámica del carbono, siendo este elemento un punto fundamental en la capacidad del suelo de almacenar y secuestrar nutrientes, tales como el elemento de estudio.

El Parque Nacional Nonguén, se ubica en la Provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile; dentro de esta área se establecieron 8 parcelas de estudio en el sendero Los Canelos, de las cuales la mitad corresponden a parcelas de bosque nativo secundario y la otra mitad a plantaciones de pino. Se analizará el carbono presente en muestras de agua de poro en los horizontes de suelo, en la hojarasca, en los diferentes horizontes de suelo, y las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el suelo, obtenidas desde los distintos sitios de estudio antes mencionados.

A partir del muestreo de estas matrices se espera comprender las posibles variaciones en la dinámica del carbono en los usos de suelo analizados, y las implicancias que tendría esta variación en los procesos de estabilización y secuestro de carbono en el suelo.

De acuerdo con Heilmayr et al., (2016), el reemplazo de bosques nativos por plantaciones es un tema de estudio abordado históricamente para Europa y América del Norte, sin embargo, en las últimas décadas ha tomado mayor importancia tanto en Asia como en Latinoamérica. En Chile se ha reconocido que las plantaciones forestales han desplazado directamente a los bosques nativos del territorio nacional, especialmente durante el período 1986-2001, registrando  $1,266 \pm 6 \times 10^3$  ha de expansión de plantaciones forestales en áreas que anteriormente estaban cubiertas por bosque nativo (Heilmayr et al., 2020).

A pesar de que el estudio de estos factores aparentemente influyentes en la calidad de los suelos ha tomado mayor relevancia en los últimos años, aún son pocas las evidencias que permiten comprender y correlacionar todos los agentes que inciden en el ciclo del carbono en los distintos escenarios que se proponen en este estudio: bosques nativos chilenos y plantaciones forestales.

## **1.2 Hipótesis**

Al realizar un balance de masas, los sitios de estudio que corresponden a parcelas de bosque nativo secundario presentarán en total mayores contenidos de carbono, en comparación a las parcelas con plantaciones antiguas de pino.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Determinar el impacto del cambio de uso de suelo desde un bosque nativo a plantaciones forestales de *Pinus sp.* en la dinámica del carbono.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar el contenido de carbono y su distribución en los diferentes reservorios asociados a los diferentes usos de suelo (agua de poros, hojarasca, horizontes de suelo).
- Establecer el control estacional, químico y mineralógico del carbono en los diferentes usos de suelo, mediante los distintos parámetros a analizar.
- Generar un modelo conceptual para cada uso de suelo que explique el flujo de carbono.

## 1.4 Ubicación y Accesos

El Parque Nacional Nonguén se encuentra distribuido entre las comunas de Chiguayante, Concepción y Hualqui, en la Provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile. Cuenta con una superficie de 3037 hectáreas, localizadas entre los  $73^{\circ}00'44''$ - $72^{\circ}56'40''$  de longitud Oeste, y  $36^{\circ}51'07''$ - $36^{\circ}56'13''$  de latitud Sur (Figura 1.1).

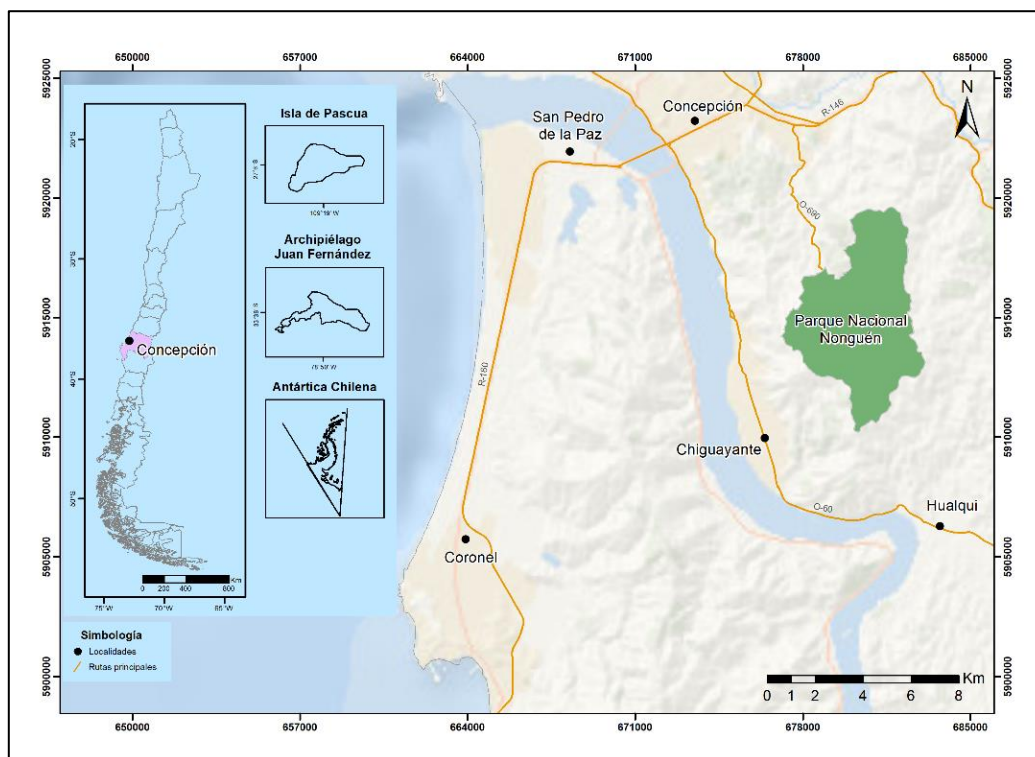
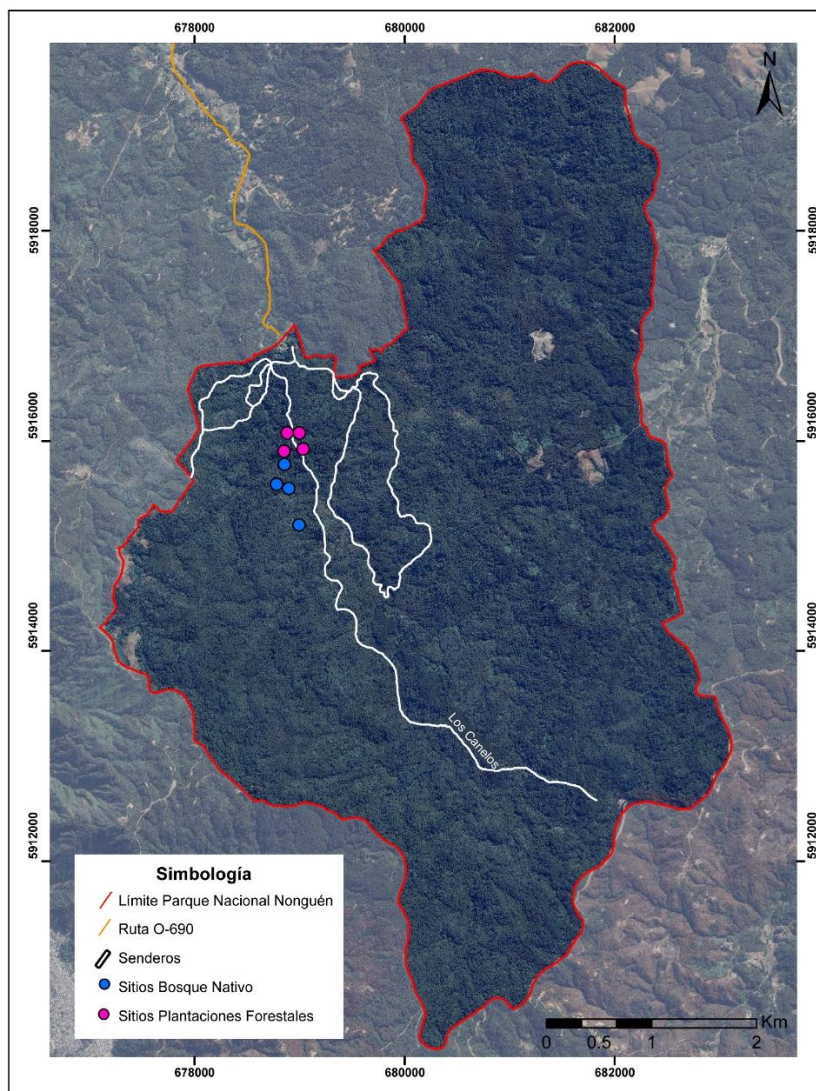


Figura 1.1 Mapa de ubicación del área de estudio.

El acceso principal al Parque Nacional se encuentra por el valle Nonguén, desde el sector de Collao, en la comuna de Concepción. Para llegar al parque se debe seguir la ruta O-690 por ~10 km. Los sitios de estudio se encuentran ubicados alrededor de los primeros kilómetros del sendero “Los Canelos” (Figura 1.2).



**Figura 1.2** Mapa de distribución de los sitios de estudio dentro del Parque Nacional.

### 1.5 Trabajos Anteriores

La Cuenca Hidrográfica de Nonguén, y en particular el área protegida que conforma el Parque Nacional ha sido estudiada con enfoque en múltiples áreas del conocimiento, debido a la amplia biodiversidad que este alberga. Factores tales como la flora y la fauna endémica del país son

algunos de las razones que motivaron la creación de este Parque Nacional, de acuerdo con el Plan de Manejo de la Reserva Nacional Nonguén (CONAF, 2019).

Son variados los estudios que se han realizado en las inmediaciones del Parque Nacional, la mayoría impulsados por la Universidad de Concepción, y en particular de la Facultad de Ciencias Forestales, la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, el Centro de Ciencias Ambientales EULA y, recientemente el Departamento de Ciencias de la Tierra, que ha patrocinado tesis de pregrado, relacionadas principalmente con la hidrogeoquímica.

Dentro de dichos estudios, destacan los que buscan identificar y caracterizar a la flora presente en el Parque Nacional, como la tesis de Rojas (2010), y el trabajo de Hauenstein & Saavedra (2014), además de la extensa recopilación presentada por (CONAF, 2019), en la que subraya la importancia del Parque Nacional en la conservación del Bosque Caducifolio de Concepción.

La geología y geomorfología de la región del Biobío, y en particular del gran Concepción ha sido estudiada previamente. Destacan los trabajos de Aguirre et al. (1972) acerca de las unidades metamórficas aflorantes en la región, y el trabajo de Creixell (2001), en el que detalla las características de las unidades intrusivas del área de estudio. Estudios más recientes, como la “Zonificación del fundo Nonguén”, publicado por EULA (2002), la tesis de Ramírez (2004), y la tesis doctoral de Martínez Retureta (2021) profundizan el análisis tanto de la geología, como de los usos de suelo y sus impactos en la calidad de estos en el Parque Nacional Nonguén.

La hidrología y geoquímica de la Cuenca Hidrográfica de Nonguén, especialmente del estero homónimo, cuenta con estudios isotópicos recientes representados principalmente por el trabajo de Correa-Araneda & Salazar (2014) y adicionalmente, las tesis de pregrado de Contreras (2022) y Bernard (2023).

El estudio de las aguas de poro, el ciclo del carbono, y los impactos de la variación en los usos de suelo dentro de la Cuenca de Nonguén es reducido, acotándose en su mayoría a los trabajos publicados por Crovo et al. (2020 y 2021) y Castillo et al. (In review).

## **2. MARCO TEÓRICO**

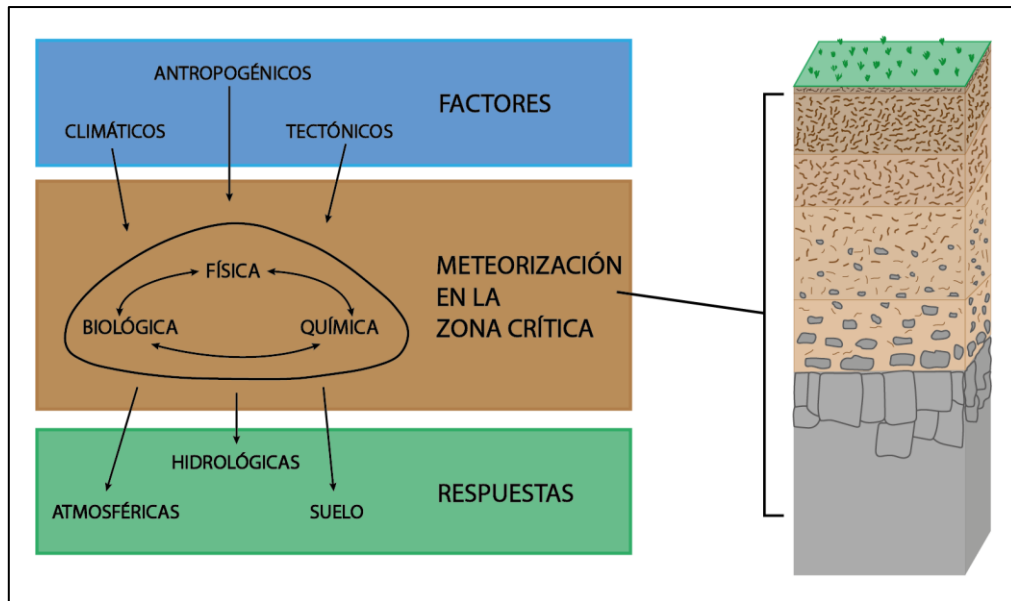
### **2.1 Suelo**

El suelo es el material mineral y orgánico no consolidado que se produce de forma natural en la superficie terrestre. En líneas generales, se conforma de sólidos tanto minerales como orgánicos, gases, líquidos y organismos vivos, es decir, es el lugar en donde interactúan las cinco esferas terrestres: biósfera, litósfera, hidrósfera, atmósfera y detritósfera, esta última compuesta por la materia orgánica en descomposición (Voroney, 2006; Weil & Brady, 2016).

Los suelos cumplen un rol fundamental en gran parte de los ecosistemas terrestres, siendo el pilar base para el crecimiento de plantas, el sistema natural de suministro y purificación de agua, y el medio principal para el reciclaje de nutrientes (Weil & Brady, 2016). Dado estas características es que el estudio del suelo ha tomado especial importancia en las últimas décadas, enfocándose en comprender la dinámica de las interacciones geoquímicas, bioquímicas y biofísicas que ocurren en la superficie de la tierra, específicamente en la llamada “Zona Crítica” (Voroney, 2006).

De acuerdo con Brantley et al., (2007), la zona crítica (CZ) es una mezcla de aire, agua, biota, materia orgánica y material rocoso. Es en esta porción del suelo donde se producen reacciones químicas que constituyen una fuente importante de nutrientes y energía que son sustento de los ecosistemas terrestres. Para comprender la evolución de la CZ y cómo reaccionará a los procesos químicos, físicos y biológicos, inducidos por factores tectónicos, climáticos y antropogénicos, que finalmente conllevan a la meteorización, es posible estudiar registros obtenidos tanto de suelos y sedimentos, como de la atmósfera, océanos y ríos (Figura 2.1).





**Figura 2.1** Diagrama de factores y respuestas generales de los suelos frente a los procesos de meteorización. Modificado de (Brantley et al., 2006).

Una de las primeras etapas de la formación de los suelos es la meteorización de la roca, a través de la fragmentación física, alteración química y biogeoquímica del material parental de la superficie terrestre. Al disgregarse la roca hasta partículas finas se liberan múltiples nutrientes que dan inicio al proceso de formación de suelos. Sin embargo, los suelos serán el resultado final de la acción de múltiples factores independientes entre sí, tales como el clima, material parental, topografía, organismos y el tiempo, considerando incluso la acción antropogénica (Voroney, 2006).

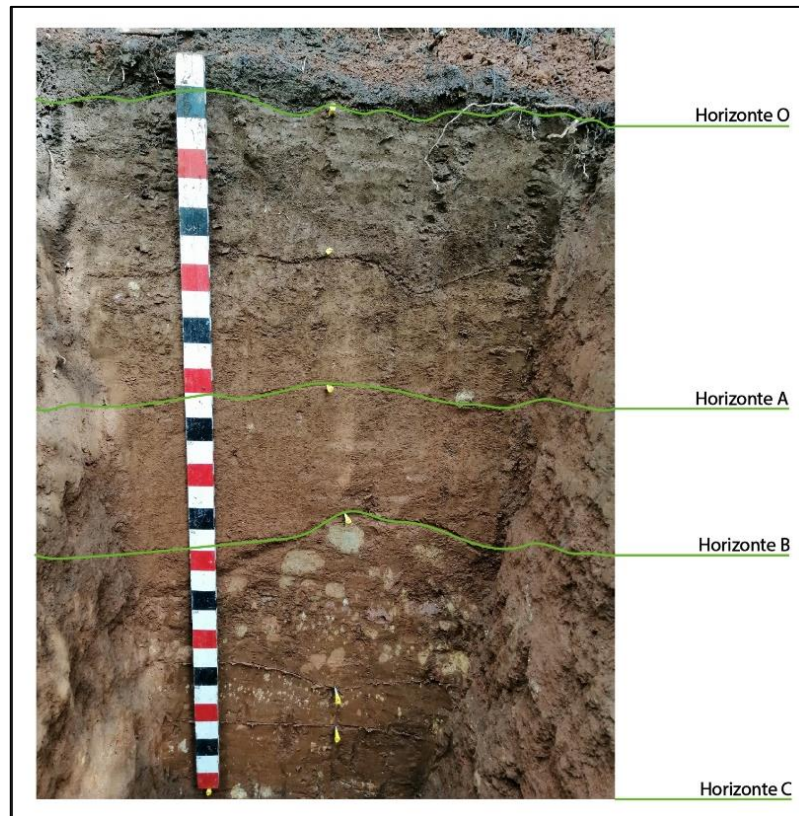
### 2.1.1 Horizontes de Suelo

Los procesos formadores de suelos, antes descritos, comúnmente actúan desde la superficie hacia profundidad, por lo que las principales características del suelo tales como las variaciones composicionales, texturales, estructurales y de color, evolucionan gradualmente. De esta forma, se desarrollan diferencias verticales que dividen al suelo en zonas o capas que se conocen como horizontes (Figura 2.2).

Los horizontes dentro de un perfil de suelo varían en grosor dependiendo de la intensidad con la que están afectando al material parental los factores formadores de suelo: clima, material parental, topografía, organismos y tiempo (Jenny, 1941). Sin embargo, los límites entre estas capas no siempre pueden distinguirse a simple vista. El desarrollo de los horizontes es una característica

fundamental para la distinción del suelo del material parental más profundo (Voroney, 2006; Weil & Brady, 2016).

Además, dependiendo de las características ambientales y la magnitud de los factores formadores, se desarrollarán distintas zonificaciones en los suelos. En condiciones ideales, se forman seis horizontes principales: *O*, *A*, *E*, *B*, *C* y *R* (Figura 2.2; Voroney, 2006; Weil & Brady, 2016). A continuación, se describe cada uno de estos horizontes.



**Figura 2.2** Horizontes de suelo distinguibles en el sitio NOPL2, presente en el área de estudio. Notar que no se alcanza a apreciar el horizonte R.

Horizonte O. Horizonte orgánico de color oscuro, formado por encima del suelo mineral. Se compone principalmente de residuos vegetales y materia orgánica suelta, en proceso de descomposición. Este horizonte es el hábitat de diversos organismos, que contribuyen con  $O_2$ ,  $CO_2$  y ácidos orgánicos al desarrollo del suelo.

Horizonte A. Horizonte mineral más superficial, que puede contener suficiente materia orgánica parcialmente descompuesta, que le confiere un color más oscuro que los horizontes más profundos.

Horizonte E. Encontrado usualmente bajo el horizonte A, es una capa de color claro producto del bajo contenido de material orgánico. Corresponde a la zona de máxima lixiviación de materiales como arcilla, hierro y óxidos de aluminio, concentrando minerales resistentes, tales como el cuarzo. Este horizonte no se encuentra presente en los sitios del área de estudio.

Horizonte B. Formados bajo un horizonte O, A o E, han sufrido cambios suficientes durante el proceso formador del suelo que hacen indistinguible el material parental. En esta capa suele haber una acumulación de partículas arcillosas y otros materiales, provenientes del lavado de los horizontes superiores, en un proceso denominado iluviación.

Horizonte C. Corresponde a la capa menos meteorizada en un perfil de suelo mineral. Es una capa de material no consolidado, que subyace a las zonas de mayor actividad biológica y no ha sido suficientemente alterado por estas.

Horizonte R. Corresponde a la roca de caja, con escasos e incluso nulos indicios de meteorización.

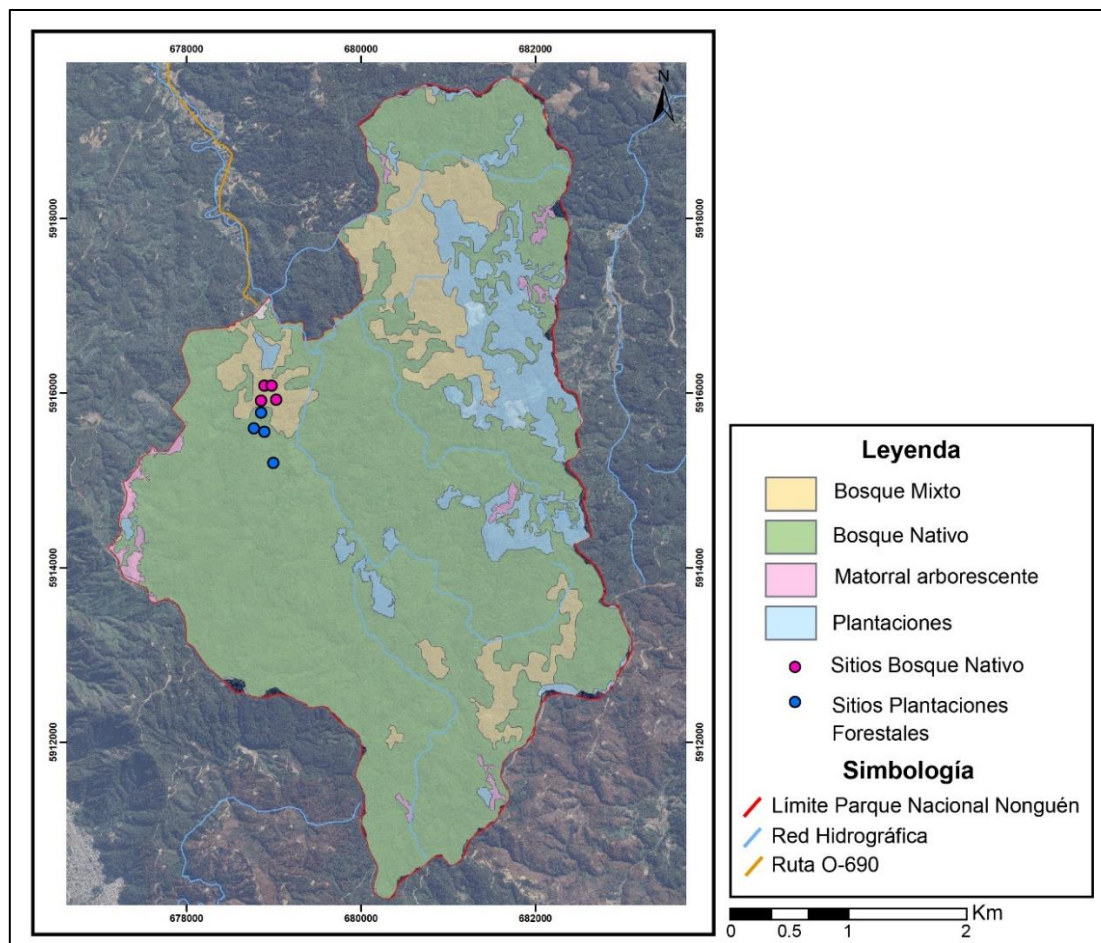
Además, estos horizontes pueden ser divididos en subhorizontes, dependiendo de las características del medio de estudio.

### **2.1.2 Coberturas y Usos de Suelo**

Los términos “coberturas” y “usos de suelo” suelen confundirse o emplearse sin distinción, a pesar de que hacen referencia a diferentes conceptos. Por una parte, la cobertura terrestre se define a partir de las características de la superficie terrestre y la sección más superficial del subsuelo, donde destacan como componentes las aguas superficiales y subterráneas, el suelo, la biota que habita en y sobre este, y las construcciones y edificaciones producto de la intervención antropogénica. El estudio y caracterización de las coberturas del suelo proporcionan información biofísica relevante acerca del medio ambiente, y cuáles son los conjuntos, tanto bióticos como abióticos que los dominan. Por otra parte, el término “usos de suelo” hace referencia a los fines para los cuales se utiliza y/o explota un cierto tipo de cobertura terrestre, considerando además en la definición, tanto la metodología de explotación, como también el propósito de la actividad (Lambin & Geist, 2008); Wulder et al., 2018).

De acuerdo con la actualización del Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (CONAF, 2021), se identifican diversos usos de suelos y coberturas, así como las actividades destinadas a los suelos dentro de la subcuenca del Estero Nonguén. Sin embargo, dentro del Parque

Nacional Nonguén se distinguen cuatro coberturas principales: bosque nativo, plantaciones forestales, bosque mixto y matorrales. Se destaca que los sitios de estudio atingentes a esta Memoria de Título se distribuyen entre las coberturas bosque nativo y bosque mixto (Figura 2.3).



**Figura 2.3** Mapa de coberturas y usos de suelo dentro del Parque Nacional Nonguén.

Bosque Nativo. Esta cobertura considera áreas de bosques formados por especies autóctonas, que provienen de generación y/o regeneración natural, o plantación bajo dosel de especies de distribución original en el área. Pueden encontrarse especies exóticas accidentales distribuidas al azar (CONAF, 2021). La cobertura de bosque nativo domina el área de estudio, representando un 76% de este.

Plantaciones. Comprenden áreas dominadas por plantaciones de especies exóticas, comúnmente de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, con la finalidad de abastecer la industria forestal y en menor medida para leña (Lara et al., 2012). En el área de estudio las plantaciones exóticas abarcan un

11%, ubicándose mayormente en el sector oriental del Parque Nacional, entre los esteros San Francisco y Los Lirios.

Bosque Mixto. Esta clasificación hace referencia a la mezcla entre bosque nativo (adulto o renoval) y especies plantadas en proporciones 1:2 del cubrimiento. También puede hacer referencia a la mezcla entre bosque nativo y especies exóticas asilvestradas, que se han regenerado de forma natural, en proporciones 1:3 del cubrimiento (CONAF, 2021). En el área de estudio esta cobertura abarca un 12%, situándose principalmente en los sectores aledaños a los esteros Manquemávida, Los Lirios, San Francisco y Compuy.

Matorral arborescente. Comprenden áreas dominadas por plantaciones de *Pinus* y *Eucalyptus* jóvenes, invadidos por arbustos y múltiples especies herbáceas (Lara et al., 2012). Solo un 2% del área de estudio se encuentra cubierta por este uso de suelo, mayormente concentrado en el extremo occidental del Parque Nacional.

## **2.2 Ciclo del Carbono**

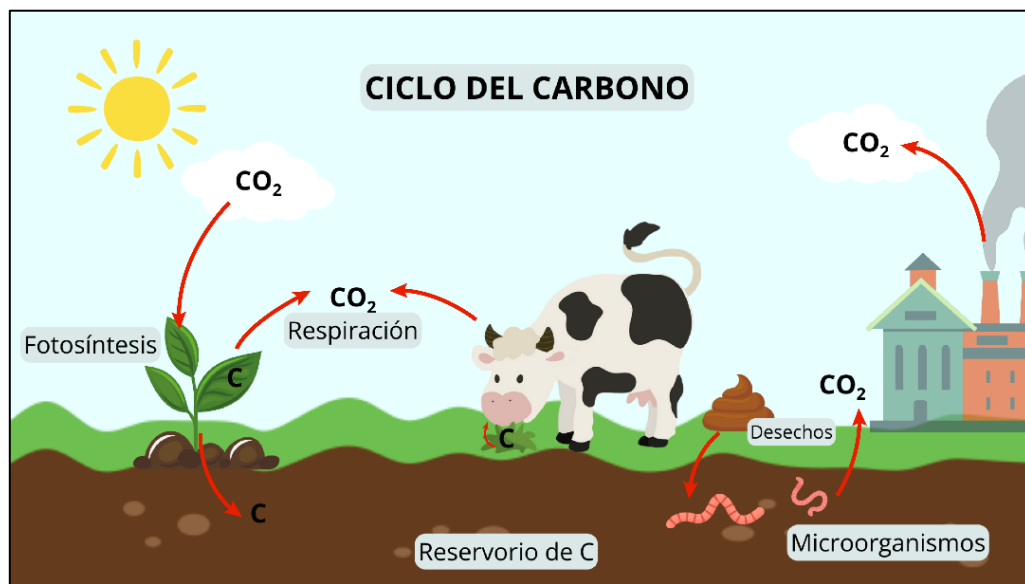
Junto con el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo, el carbono es uno de los macronutrientes esenciales en los suelos, y el sexto elemento más abundante del planeta. Incluso, este puede considerarse como el elemento base de toda la vida terrestre, ya que une a los ecosistemas de la Tierra y sus habitantes a través del flujo que se produce entre los distintos ambientes terrestres (Janzen, 2004; Weil & Brady, 2016).

A modo general, los principales reservorios de carbono que participan activamente en el ciclo de este son cuatro: CO<sub>2</sub> atmosférico, biota (esencialmente material vegetal), materia orgánica presente en los suelos, y el océano; siendo este último un reservorio parcialmente activo (Janzen, 2004). Además, se considera la litósfera como la mayor reserva de carbono de la Tierra, contenido principalmente en combustibles fósiles y depósitos de rocas sedimentarias. Estos constituyen reservas naturalmente inactivas de carbono (Hillel & Hatfield, 2005).

De acuerdo con Paul & Horwath (2015), el ciclo global del carbono puede subdividirse en dos: un ciclo geológico de largo plazo y en un ciclo biológico de corto plazo. El ciclo del carbono de largo plazo implica tanto la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, como también el proceso de formación de rocas sedimentarias y la subducción de estas en el manto terrestre, formando un reservorio geológico de carbono casi permanente. Sin embargo, parte de este material subductado puede ser

liberado nuevamente a la atmósfera como  $\text{CO}_2$ , a través de actividad volcánica. Por otra parte, la proliferación y evolución de organismos fotosintéticos generaron cambios trascendentales en el ciclo del carbono a largo plazo, puesto que conformaron otro proceso de consumo de  $\text{CO}_2$ , a través de la deposición de carbono en el suelo y los sedimentos, como resultado de su actividad metabólica.

Por otra parte, en el ciclo del carbono de corto plazo, los mayores intercambios se producen entre la atmósfera, la vegetación y los océanos, siendo el suelo un medio fundamental para el flujo, aunque también juega un rol importante como reservorio, tanto de carbono orgánico, como inorgánico (Hillel & Hatfield, 2005; Paul & Horwath, 2015). No obstante, el ciclo básico del carbono terrestre de corto plazo se puede resumir en tres grandes etapas (Figura 2.4):



**Figura 2.4** Diagrama del Ciclo del Carbono, con sus principales etapas.

(1) Captación del  $\text{CO}_2$  atmosférico a través de las plantas mediante fotosíntesis, transformándolo en carbohidratos. Parte de estas moléculas orgánicas formadas son utilizadas por las mismas plantas como fuente de energía a través de la respiración, liberando nuevamente el carbono a la atmósfera. El carbono restante es almacenado en el material vegetal, que eventualmente se agrega al suelo como hojarasca, raíces y ácidos orgánicos (Hillel & Hatfield, 2005; Weil & Brady, 2016).

(2) Consumo y oxidación de carbohidratos por animales y microorganismos. Los animales consumen importantes cantidades de materia vegetal, donde aproximadamente la mitad del carbono consumido se devuelve a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$ , mientras que el material restante regresa

al suelo en forma de desechos o tejidos corporales. Estos son digeridos por microorganismos descomponedores que habitan en el suelo, y gradualmente devuelven este carbono a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> como producto de los procesos de respiración celular (Hillel & Hatfield, 2005; Weil & Brady, 2016).

(3) Retorno del CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De acuerdo con lo mencionado en el punto anterior, uno de los medios por los que el carbono regresa a la atmósfera es en forma de CO<sub>2</sub>, como resultado de la respiración de los microorganismos que habitan en el suelo, como también de los organismos que viven en la superficie terrestre. Sin embargo, en las últimas décadas el uso de combustibles fósiles, la quema de bosques y la conversión de extensas zonas a la agricultura, han tomado mayor relevancia en el proceso del regreso del carbono terrestre a la atmósfera (Paul & Horwath, 2015). Se estima que retornan 255 Pg/año de carbono a la atmósfera, mientras que el ingreso de carbono a la biota se calcula que ocurre a una tasa de 215 Pg/año (Hillel & Hatfield, 2005).

En los últimos dos siglos el ciclo del carbono ha experimentado importantes distorsiones, asociadas a la rápida proliferación humana y a su acelerado desarrollo económico, industrial y tecnológico (Liao et al., 2010; Weil & Brady, 2016). Las dos actividades más influyentes en la alteración del ciclo del carbono son: los cambios en el uso de suelos, asociado a la expansión de la agricultura, con el fin de suplir la necesidad alimentaria de la creciente población; y el uso de combustibles fósiles como medio principal de energía, liberando al ciclo una gran cantidad de carbono que se encontraba almacenado en reservorios inactivos (Janzen, 2004). Por lo tanto, es importante incluir estos dos grandes factores en futuros estudios asociados al ciclo del carbono.

### **2.3 Flora**

El Parque Nacional Nonguén se enmarca en la Ecorregión de los Bosques Templados que se desarrolla en Chile y áreas adyacentes de Argentina entre los paralelos 35° y 48° S, e incluye una gran variedad de bosques, matorrales, humedales, ríos y lagos (Lara et al., 2012).

El Bosque Caducifolio de Concepción presenta una distribución geográfica restringida dentro de la Ecorregión, sin embargo, el mayor fragmento remanente de este bosque se encuentra protegido dentro del Parque Nacional Nonguén. Este se caracteriza por la presencia de la especie arbórea caducifolia *Nothofagus obliqua*, conocida como Roble pellín, que coexiste con especies arbóreas siempreverdes típicas del bosque esclerófilo, tales como el Peumo (*Cryptocarya alba*), Litre (*Lithrea caustica*), Lingue (*Persea lingue*), y especies arbóreas siempreverdes del bosque

valdiviano, tales como Olivilla (*Aextoxicon punctatum*) y Palo Santo (*Weinmannia trichosperma*). Por otra parte, los bosques de fondo de quebrada se caracterizan por la abundante presencia de la especie arbórea siempreverde Coigüe (*Nothofagus dombeyi*), en conjunto con especies hidrófilas tales como Laurel (*Laurelia sempervirens*) y Mañío (*Podocarpus saligna*) (CONAF, 2019).

Actualmente, existen múltiples zonas dentro del área de estudio en las que el Bosque Caducifolio de Concepción se encuentra parcial o completamente reemplazado por plantaciones exóticas, principalmente de Pino (*Pinus radiata*) y Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (EULA, 2002).



### 3. MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1 Geomorfología

De acuerdo con Börgel (1983), la región del Biobío puede ser dividida en cinco unidades morfoestructurales, siendo de oeste a este: Planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera y la Cordillera Andina. Además, se incluye una unidad morfoestructural menor, denominada Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional. El Parque Nacional Nonguén se enmarca en la Cordillera de la Costa, que se caracteriza por presentar un relieve suave que permite una conexión abierta entre la depresión central y la línea costera (Rehak et al., 2008).

En el estudio realizado por (EULA, 2002) se describen las principales unidades geomorfológicas que se presentan en la cuenca del estero Nonguén, tanto erosivas como relieves de acumulación. Sin embargo, dentro de los límites del Parque Nacional se pueden distinguir dos unidades morfológicas principales: Cordones montañosos y Plataformas de erosión (Figura 3.1).

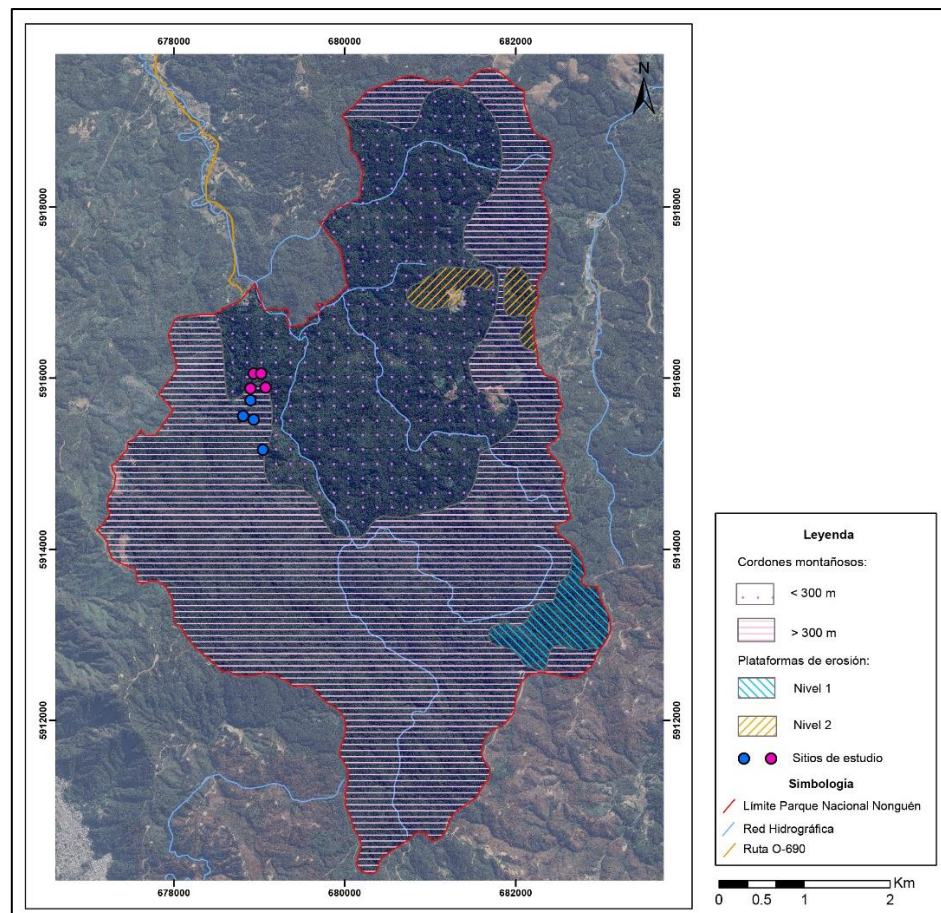


Figura 3.1 Mapa geomorfológico del área de estudio. Modificado de Ramírez (2004).

### **3.1.1 Cordones montañosos o graníticos**

Unidad dominante tanto en el área de estudio, como en toda la extensión de la cuenca del estero Nonguén, presentando notables variaciones de altitud, por lo que pueden definirse dos niveles: un nivel superior que cubre gran parte del área de estudio, superando los 300 m s.n.m.; y un nivel inferior que se distingue en la zona norte del área de estudio, cuyas altitudes varían entre los 200 y 250 m s.n.m. (Ramírez, 2004).

El nivel superior de este relieve se forma predominantemente en las rocas que conforman el basamento metamórfico, y alcanza sus mayores altitudes en la zona más al sur del área de estudio, en la cabecera del estero Manquemávida (Ramírez, 2004).

Por otra parte, el nivel inferior de este relieve se forma principalmente por rocas del Batolito Costero Sur, y destaca por presentarse como roca fuertemente disgregada, lo que hace que se vuelva un relieve inestable frente a factores meteorológicos, produciendo erosión de laderas y deslizamientos. Sin embargo, la abundante presencia de cobertura boscosa permanente conforma una barrera protectora (EULA, 2002).

### **3.1.2 Plataformas de erosión o graníticas**

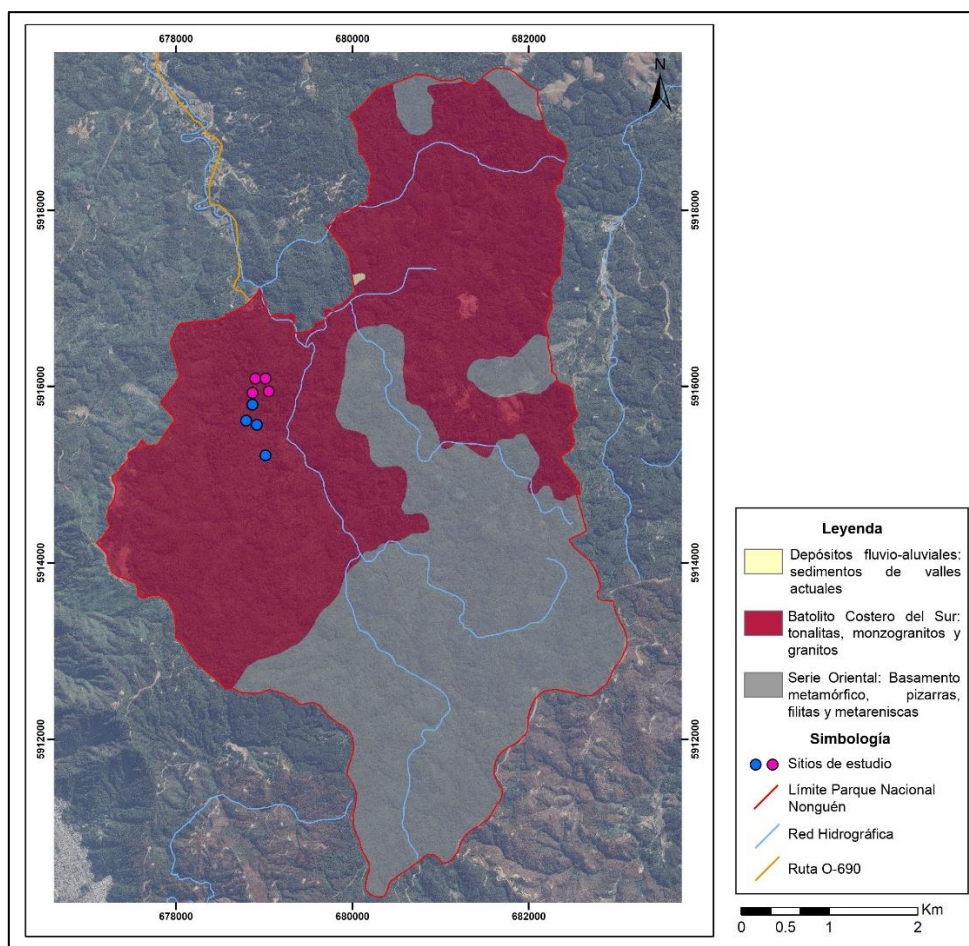
Unidad subordinada en el área de estudio, sin embargo, forma parte de una unidad mayor que se extiende hacia el este. Corresponden a niveles altos erosivos, que superan los 200 m s.n.m., los que pueden dividirse en dos niveles, de acuerdo con las diferencias de altitud: el nivel 1, con alturas que superan los 300 m s.n.m., y el nivel 2, con alturas que varían entre los 200 y 300 m s.n.m. (Ramírez, 2004).

Debido a que este relieve presenta bajas pendientes que facilitan su acceso, se ha visto ocupada por actividades tanto agrícolas como forestales, que aumentan su vulnerabilidad frente a procesos erosivos (EULA, 2002).

## **3.2 Geología**

El Parque Nacional Nonguén se distribuye entre los 73°00'44"-72°56'40" de longitud oeste, y 36°51'07"-36°56'13" de latitud sur, y abarca un área de 3037 hectáreas, enmarcadas dentro de la cuenca hidrográfica del estero Nonguén, cuyo límite corresponde a la confluencia de dicho estero con el río Andalién (EULA, 2002). Esta corresponde a una cuenca intermontana inserta en la Cordillera de la Costa de la Región del Biobío (Ramírez, 2004). Geológicamente, el área de estudio

está conformada principalmente por rocas intrusivas y metamórficas, así como también por depósitos no consolidados de origen fluvial, aluvial y coluvial. De esta forma, se describen tres unidades principales en el área: basamento metamórfico e intrusivos graníticos, ambos de edad paleozoica, y sedimentos de valles actuales de edad holocena (Figura 3.2; EULA, 2002).



**Figura 3.2** Mapa geológico del área de estudio. Modificado de Ramírez (2004).

### 3.2.1 Basamento Metamórfico

Definido inicialmente por Aguirre et al. (1972), esta unidad conforma gran parte de la Cordillera de la Costa central chilena, extendiéndose continuamente a partir desde los 34°S hasta los 43°S, formando una extensa franja paralela subparalela al borde costero. Representa un complejo de subducción antiguo, en el que se pueden reconocer dos unidades con diferencias sustanciales tanto en litología como en estructura: la Serie Occidental, conformada por micaesquistos, metachert y metabasitas, consistentes con una serie de alto P/T; y la Serie Oriental, que presenta filitas, metapelitas y rocas córneas, consistentes con una serie de bajo P/T. Estas series se identifican como

cinturones metamórficos pareados, los cuales son evidencia de la acreción basal y frontal que se produce en un margen continental activo (Hervé et al., 2013).

En el área que engloba el Parque Nacional Nonguén, afloran rocas pertenecientes a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico. Estas quedan expuestas en la parte sur del área de estudio, en cordones montañosos de altitudes superiores a 200 m s.n.m. (Ramírez, 2004).

### **3.2.1.1 Serie Oriental**

Definida por Aguirre et al. (1972), consiste principalmente de una alternancia de metaareniscas y metapelitas, interpretadas como sucesiones turbidíticas (Hervé et al., 2013). Estas se encuentran intruídas por el Batolito Costero del Sur, que indujo a un evento de metamorfismo de contacto, produciendo la formación de zonas de biotita, andalucita y sillimanita, las que aparecen de forma progresiva hacia el cuerpo intrusivo (Glodny et al., 2008).

Dataciones de U-Pb en zircones ubican la depositación del protolito que conforman las rocas pertenecientes a esta serie en el Carbonífero inferior, con una edad máxima de ~345 Ma; mientras que el metamorfismo de contacto se le asigna una edad de ~300 Ma (Hervé et al., 2013; Lucassen et al., 2004).

Esta litología aflora ampliamente en el área sur del Parque Nacional, presentando afloramientos ubicados en la ladera oeste de la subcuenca del estero Manquimávida, donde se observan en contacto por intrusión con el Batolito Costero del Sur (EULA, 2002; Ramírez, 2004).

### **3.2.2 Batolito Costero del Sur**

Cuerpo intrusivo de grandes dimensiones, que se presenta elongado en dirección NE-SW de manera continua en la zona centro-sur de Chile, extendiéndose entre los 33° y 40°S, conformando gran parte de la Cordillera de la Costa del país, en donde se encuentra intruyendo al basamento metamórfico. Esta unidad es evidencia de la existencia de un arco magmático del Carbonífero tardío al Pérmico (Glodny et al., 2008; Deckart et al., 2014).

En la zona de la Cordillera de Nahuelbuta, esta unidad se conforma de rocas calcoalcalinas, particularmente granodioritas, dioritas, tonalitas y en menor medida granitos, que presentan edades de Rb-Sr y K-Ar de ~300 Ma (Hervé et al., 1988; Glodny et al., 2008).

Localmente, esta unidad fue definida por Creixell (2001) como *Granitoides Concepción*, con el fin de agrupar a los granitoides que afloran principalmente en el radio urbano de Concepción.

Litológicamente, se conforma de monzogranitos de biotita, tonalitas de biotita y micas blancas, de grano medio a grueso y con textura fanerítica.

De acuerdo con Ramírez (2004), los afloramientos de esta unidad en el área de estudio son escasos, puesto que la gran mayoría corresponden a roca disgregada y transformada en suelos. Sin embargo, se reconocen afloramientos fuera de los límites del Parque Nacional Nonguén, pero dentro de la cuenca del estero homónimo, como la Cantera Santa Helena.

### **3.2.3 Depósitos fluviales y aluviales**

Depósitos holocenos de diversa índole, que corresponden principalmente a sedimentos no consolidados, acumulados por procesos recientes. El valle del estero Nonguén forma parte de la llanura aluvial del río Andalién, cuyos sedimentos consisten en arenas finas con limos no compactados, que se agrupan en las llamadas Arenas Andalién, y provienen de la alteración y erosión de los granitoides presentes en la Cordillera de la Costa de la región (EULA, 2002).

Los depósitos fluviales consisten en gravas y arenas de origen ígneo y metamórfico, arrastrados por los afluentes del estero Nonguén desde los cordones montañosos circundantes; mientras que los depósitos aluviales corresponden a material no consolidado, producto de eventos de remoción en masa, que se presentan en la base de algunos cerros (Ramírez, 2004).

### **3.3 Geología Estructural**

A nivel regional, han sido descritas múltiples fallas y lineamientos que afectan tanto al Basamento Metamórfico como a la cobertura meso-cenozoica, sobre todo hacia el área costera de Concepción y Talcahuano (Quezada, 1996).

De acuerdo con Ramírez (2004), dentro del área de estudio no es posible reconocer planos de falla o escarpes con indicadores cinemáticos debido a la abundante cobertura vegetal e intensa meteorización de las rocas. Sin embargo, es posible identificar a través de imágenes satelitales numerosos lineamientos que coinciden con la posición de quebradas y laderas de fuertes pendientes, con direcciones preferenciales NNE – SSW.

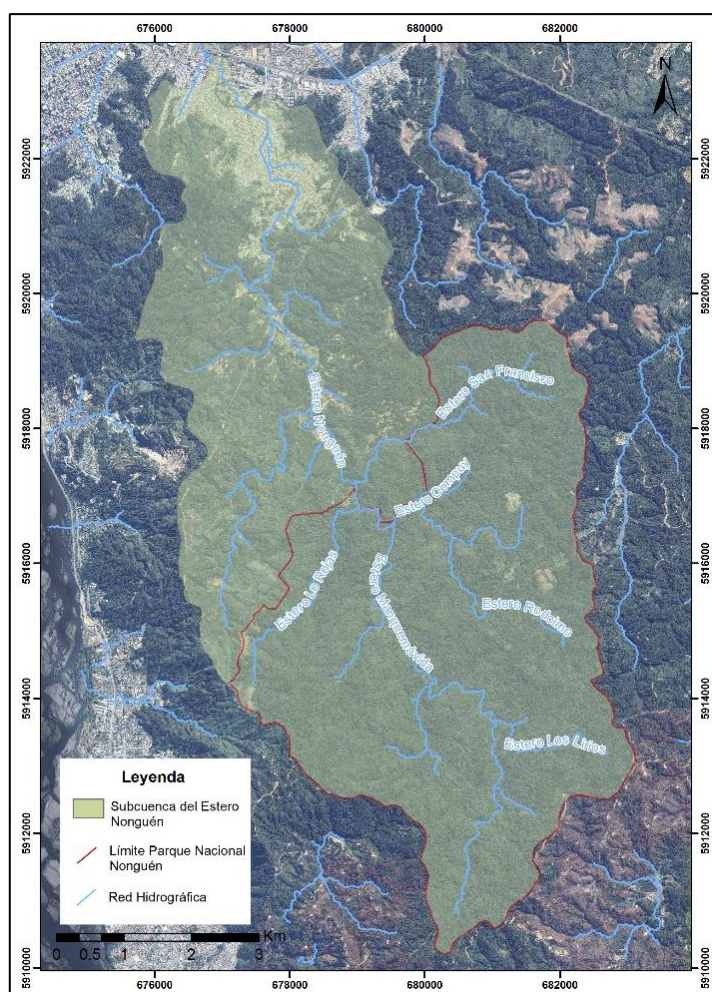
### **3.4 Hidrología**

La cuenca del río Andalién es un sistema hidrológico costero, que drena la zona occidental de la Cordillera de la Costa a la latitud de los 36°S, desembocando en la costa sur de la bahía de



Concepción, inmediatamente al norte de la desembocadura del río Biobío, y cubre un área de 780 km<sup>2</sup> (DGA, 2004; Jaque, 2008).

Dentro de esta gran cuenca, importante en el área urbana de Concepción y Talcahuano, se encuentra la subcuenca del estero Nonguén, ubicada entre los 36°49'S y los 36°54'S y los 72° 57'O y los 73° 01'O, con una orientación de sur a norte, con una longitud 17 km y una superficie de 52,68 km<sup>2</sup> (CONAF, 2019). El Parque Nacional Nonguén se encuentra enmarcado dentro de esta subcuenca homónima, hacia el sector SE (Figura 3.3).



**Figura 3.3** Mapa de ubicación de la subcuenca del estero Nonguén, y sus principales redes hidrográficas.

El estero Nonguén es el curso principal de esta subcuenca, que nace desde de la confluencia de los esteros Compuy y Manquimávida, y es alimentado por otros cursos menores como los esteros Lo Rojas, San Francisco, Rodolfo y Los Lirios. Estos conforman una densa red de drenaje de tipo dendrítico, con pendientes pronunciadas y quebradas marcadas (EULA, 2002; CONAF, 2019). El

curso principal de esta subcuenca y sus cursos tributarios tienen un control estructural, donde las estructuras principales siguen una orientación preferencial NW-SE, mientras que estructuras secundarias siguen una orientación NE-SW (Ramírez, 2004).

La subcuenca hidrográfica consta de un régimen pluvial, donde las mayores precipitaciones se concentran entre los meses de mayo y agosto. Es un sistema bien drenado, con una densidad de drenaje de 1,82 k/km<sup>2</sup>, y la mantención de su producción hídrica es fuertemente dependiente de las condiciones a las que se enfrenten tanto la parte alta, como la parte media de la subcuenca, en especial al tipo de cobertura vegetal. Goza de una recarga principalmente pluvial, dado a que la cuenca se enmarca en la Cordillera de la Costa (EULA, 2002).

La subcuenca del estero Nonguen, puede ser zonificada en tres microcuencas a partir de su perfil longitudinal:

- Zona natural con fuerte gradiente hídrico, no perturbada, cauces cubiertos por vegetación nativa y buena calidad del agua;
- Zona transicional o parte media, con menor velocidad del cauce, disminución de la cobertura vegetal nativa y de la calidad de las aguas;
- Zona baja, fuertemente alterada por la interacción con las comunidades aledañas al estero.

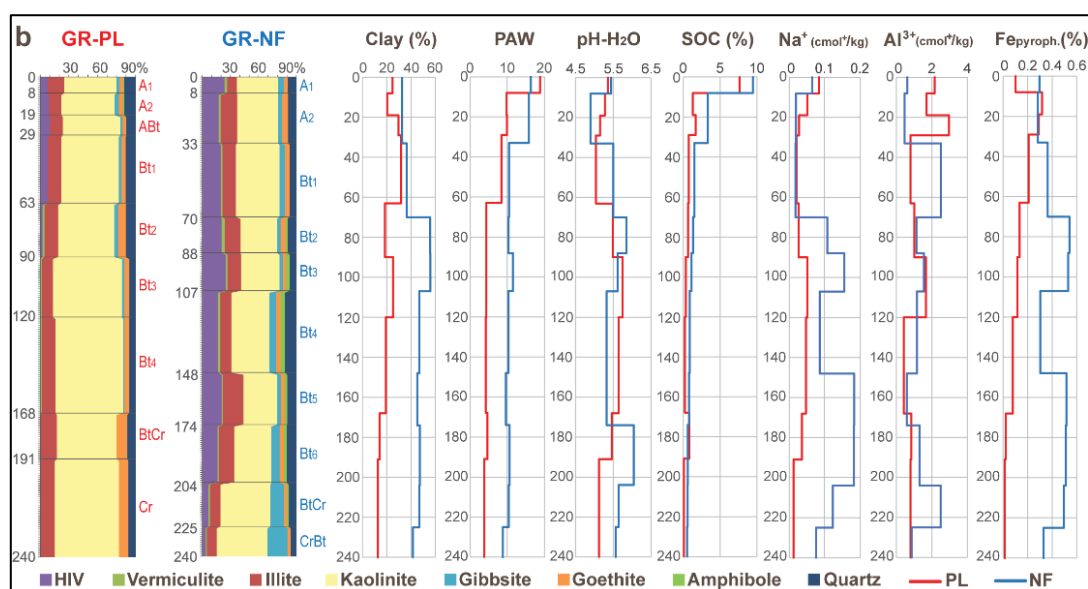
### **3.5 Mineralogía de los suelos**

El trabajo de Castillo y colaboradores (In review) presenta un completo análisis acerca de la mineralogía y características fisicoquímicas de los suelos de dos sitios dentro del área de estudio. En ellos se estudiaron dos perfiles de suelo hasta los 2,4 m de profundidad, muestreando por horizontes genéticos, tanto en suelo bajo bosque nativo (sitio NOBN1), como para el suelo bajo plantación de pino (sitio NOPL1). Cabe destacar, que ambos forman parte de los sitios que fueron seleccionados para analizar en el presente estudio.

Los suelos del Parque Nacional Nonguén son catalogados como Alfisoles (Castillo et al., In review). Este tipo de suelos suelen formarse en zonas húmedas de frías a cálidas, así como climas mediterráneos, y comúnmente bajo bosques nativos caducifolios. Además, los alfisoles se caracterizan por presentar un horizonte B subsuperficial moderadamente lixiviado, en el que se acumulan filosilicatos (o minerales de arcilla) por efecto de los procesos de iluviación (Weil & Brady, 2016).

Los suelos de Nonguén, formados a partir de la meteorización del Batolito Costero del Sur, contienen vermiculita y HIV, junto con illita, caolinita, gibbsita, goethita y cuarzo en toda la extensión del perfil de suelo estudiado, sin embargo, las proporciones en las que se distribuyen estos componentes en profundidad varían dependiendo de la cobertura bajo la que se forma el suelo (Castillo et al., In review; Figura 3.4). La vermiculita y la hidroxi-vermiculita (HIV) son arcillas silicatadas que entre sus capas suelen albergar moléculas de agua fuertemente adsorbidas, iones hidroxilo-Al y cationes como el  $Mg^{+2}$ ,  $Na^{+}$  y  $Ca^{+2}$  (Weil & Brandy, 2016).

Para aquellos suelos formados bajo plantaciones forestales, la vermiculita, HIV y la gibbsita disminuyen gradualmente hasta desaparecer ~170 cm de profundidad, mientras que la illita parece inalterada, y la caolinita resulta ser el componente más abundante del suelo. Además, presentan una disminución en profundidad de factores, como el porcentaje de arcillas, el agua disponible para plantas (PAW), pH, que conlleva a una acidificación paulatina, y carbono orgánico del suelo (SOC). Por otra parte, si bien en los suelos formados bajo bosque nativo el componente más abundante sigue siendo la caolinita, destaca la presencia constante en profundidad de la fase HIV y de la gibbsita. Además, presentan un aumento progresivo del porcentaje de arcillas y pH con la profundidad, mientras que, si bien ocurre una disminución del agua disponible para plantas (PAW) y el carbono orgánico del suelo (SOC), esta ocurre a una tasa menor que en los suelos formados bajo plantaciones de pino (Castillo et al., In review; Figura 3.4).

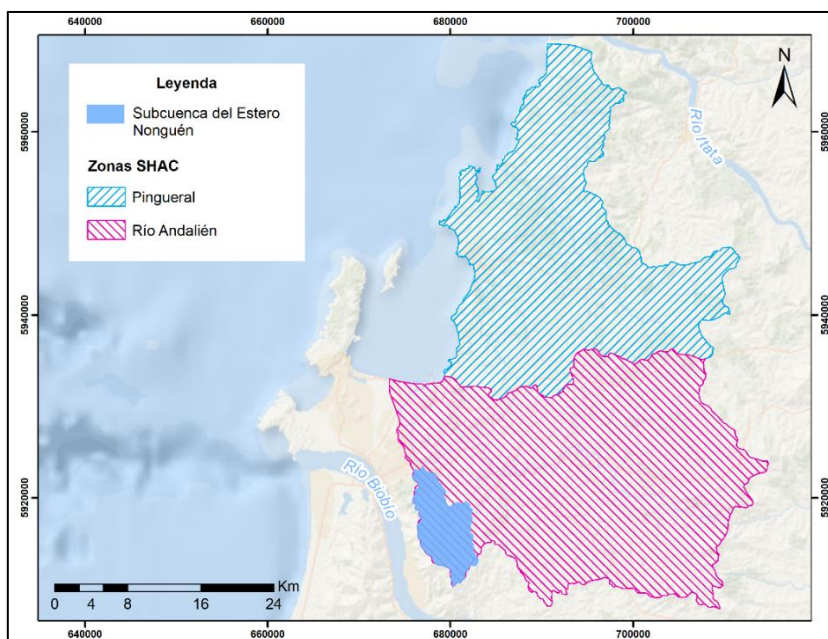


**Figura 3.4** Caracterización mineralógica y propiedades fisicoquímicas de los sitios NOBN1 (GR-NF) y NOPL1 (GR-PL). Obtenido de (Castillo et al., In review).



### 3.6 Hidrogeología

La Dirección General de Aguas (DGAC Chile, 2023) define dos Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) para el área ubicada entre las cuencas costeras e islas ubicadas entre el río Itata y río Biobío: SHAC Pingueral y SHAC Río Andalién (Figura 3.5). Es en este último en el que se encuentra enmarcada la subcuenca del estero Nonguén, y es la zona acuífera más grande e importante de la cuenca. A partir de estudios y modelos conceptuales se obtuvo que la recarga media anual del SHAC del río Andalién es de 658 L/s, con una profundidad media del nivel estático de tan solo 1 m (DGA, 2022).



**Figura 3.5** Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), para el área ubicada entre las cuencas costeras e islas ubicadas entre el río Itata y río Biobío. Modificado de DGA (2022).

A partir de la recopilación de datos bibliográficos, y su complementación con múltiples estudios se buscó definir distintas unidades hidrogeológicas de todas las cuencas distribuidas entre los ríos Itata y Biobío. De esta forma la DGA (2022) definió cuatro unidades hidrogeológicas principales, de las cuales es relevante para el área de estudio únicamente la unidad UGH 3b. Esta representa suelos impermeables con presencia de rocas intrusivas del Carbonífero, principalmente, constituidas en su mayoría por granitos. Debido a la porosidad y presencia de fracturas y fisuras que suelen contener este tipo de rocas, se favorece el flujo y la acumulación de agua subterránea (Centeno & García, 2008).

## **4. METODOLOGÍA**

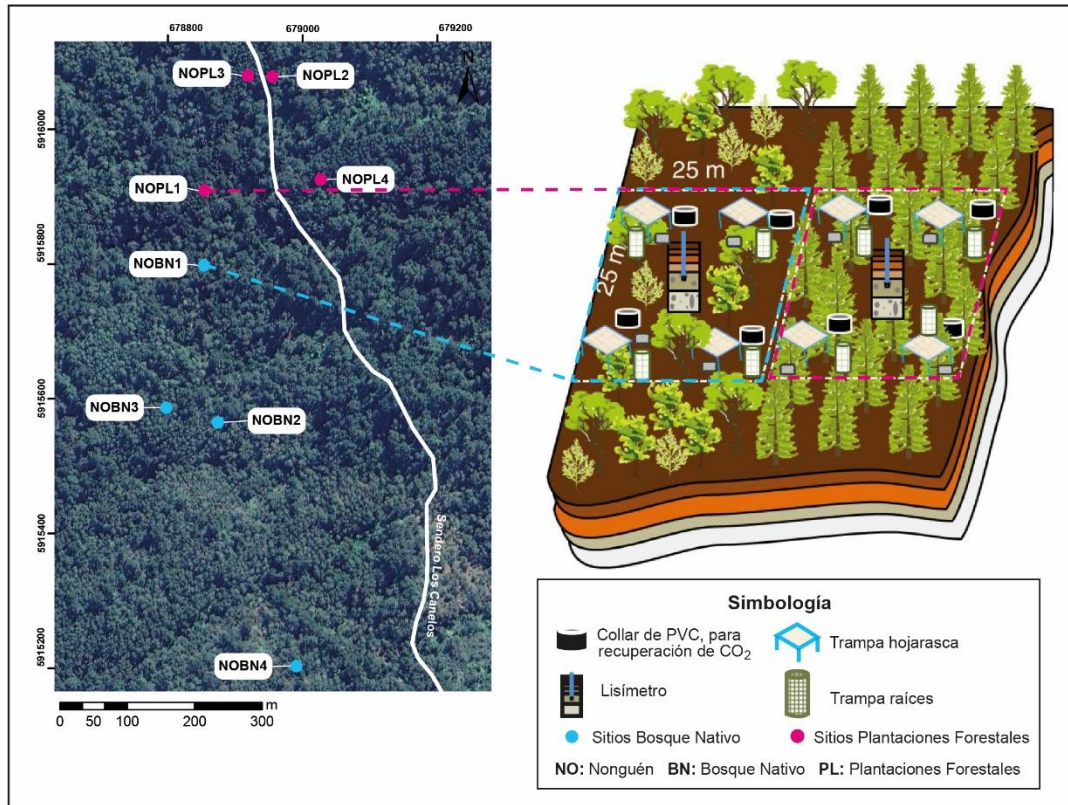
### **4.1 Selección de sitios de estudio**

En el marco del proyecto FONDECYT INICIACIÓN 11160372 del año 2017, a cargo del Dr. Felipe Aburto, se desarrollaron diversas metodologías con el fin de determinar cómo el reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales ha modificado las reservas de C, N y P en el sector centro-sur de Chile. El procedimiento de selección de sitios e instalación de los instrumentos que se detalla a continuación fue obtenido de Crovo (2020).

Se seleccionaron sectores dentro del Parque Nacional Nonguén en áreas en las que hubo sustitución forestal hace al menos 35 años, basándose en los registros de la administración forestal local. Además, esta información fue complementada con análisis de teledetección a partir de imágenes satelitales Landsat 5, consideradas para un periodo de 25 años (desde 1986 hasta 2011), con una resolución especial de 30 m.

Una vez identificadas las posibles zonas de estudio, se realizaron campañas de terreno para encontrar áreas parcialmente homogéneas, en las que el bosque nativo y las plantaciones de pino se encontraran a una distancia mínima de ~10 m y máxima de ~100 m. Para reducir la variabilidad de los factores a analizar dentro de las parcelas, se contabilizaron una serie de características de los bosques, tales como la especie arbórea dominante, edad promedio de los árboles, altura y diámetro, tipo de suelo y algunas variables geomorfológicas. De esta forma, fueron seleccionados dos de las parcelas de estudio que contempla esta memoria de título: NOBN1 y NOPL1.

Posteriormente, en el marco del proyecto MPG-190022, se agregaron seis parcelas de estudio. Estas tienen una dimensión de 25 m por 25 m en cada tipo de bosque (tres parcelas de bosque nativo y tres parcelas de plantaciones forestales; Figura 4.1), considerando en total ocho parcelas. Para distinguir estos sitios de estudio, se escogió el código principal “NO” que hace referencia al Parque Nacional Nonguén, mientras que las siglas “BN” indican sitios de bosque nativo, y las siglas “PL” indican sitios de plantaciones antiguas de pino (Tabla 4.1).



**Figura 4.1** Distribución y organización de los sitios de estudio en el Parque Nacional Nonguén. Modificado de Crovo, (2020).

**Tabla 4.1** Nombre y coordenadas de los sitios de estudio.

Sitio Bosque Nativo (BN)	Ubicación		Sitio Plantaciones Forestales (PL)	Ubicación	
	Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
NOBN1	36°53'12" S	72°59'34" W	NOPL1	36°53'9" S	72°59'34" W
NOBN2	36°53'20" S	72°59'33" W	NOPL2	36°53'4" S	72°59'30" W
NOBN3	36°53'29" S	72°59'36" W	NOPL3	36°53'3" S	72°59'32" W
NOBN4	36°53'31" S	72°59'28" W	NOPL4	36°53'8" S	72°59'27" W

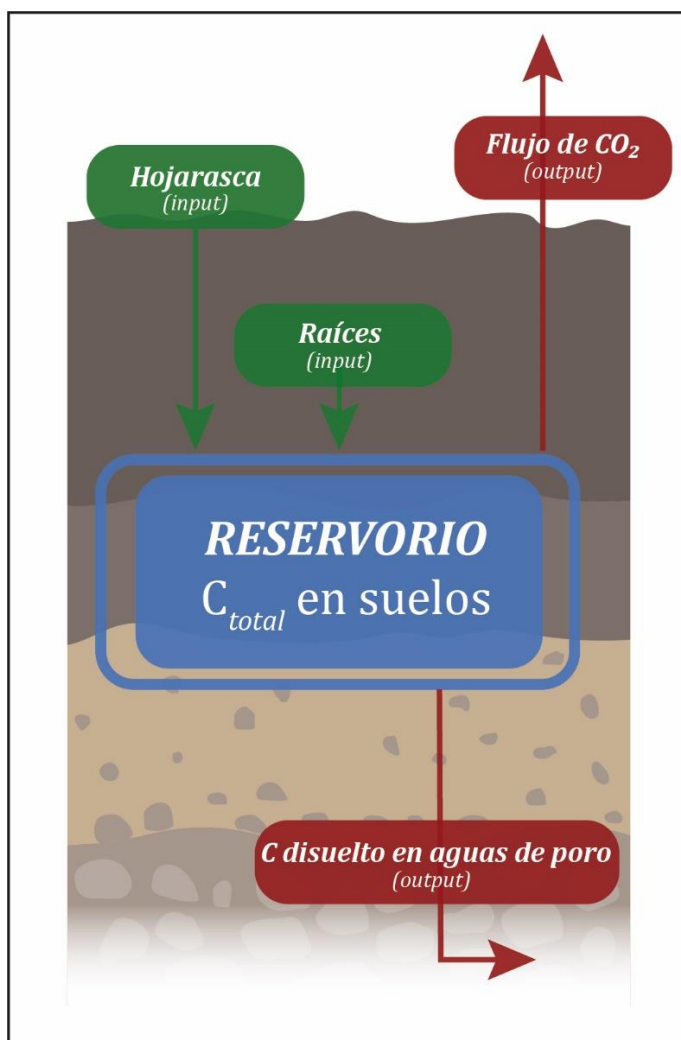
#### 4.2 Diseño experimental para el muestreo y análisis

La presente memoria de título comprende un total de cuatro matrices de datos que entregan información relevante acerca de la dinámica del carbono en los bosques, y que potencialmente podrían dilucidar los efectos del reemplazo de las coberturas en el ciclo de dicho elemento. Las matrices estudiadas son:

- C<sub>total</sub> en suelos. Comprende un muestreo único por sitio de estudio, realizado al momento de la instalación de los sitios. En el centro de cada una de las parcelas de estudio se excavó a mano una calicata de 240 cm de profundidad, para la instalación de los equipos de medición necesarios. En esta oportunidad, se muestrearon y describieron los horizontes genéticos, hasta una profundidad cercana a los 170 cm.
- C<sub>total</sub> disuelto en aguas de poros. Comprende un muestreo bimensual realizado entre marzo-2022 y marzo-2023, para los sitios NOBN1, NOBN2, NOBN3, NOBN4, NOPL1, NOPL3 y NOPL4. Sin embargo, durante los meses estivales no fue posible la extracción de agua de poros, debido a las bajas precipitaciones acaecidas en dicho periodo.
- Flujo de CO<sub>2</sub> desde suelos. Comprende un muestreo bimensual realizado entre marzo-2022 y marzo-2023 para cada uno de los sitios de estudio. Se realizaron mediciones tanto de respiración total (que comprende organismos del suelo y raíces), como de respiración heterotrófica (que considera únicamente organismos y microorganismos del suelo). Para los sitios NOBN1 y NOPL1 se contó con diez puntos de medición (cinco totales y cinco heterotróficos), mientras que, para el resto de los sitios, se contó con seis puntos de medición en cada uno (uno heterotrófico y cinco totales). De esta forma, se obtuvo un total de 778 mediciones de respiración de suelo (CO<sub>2</sub>) considerando dos mediciones diarias (mañana y tarde). Sin embargo, para esta memoria de título fueron consideradas únicamente las mediciones de respiración total, abarcando 277 mediciones de respiración total de suelo (CO<sub>2</sub>).
- Hojarasca del suelo. Comprende un muestreo bimensual realizado entre los meses de marzo-2022 y marzo-2023, para los sitios NOBN1 y NOPL1. Las trampas de hojarasca fueron vaciadas antes y después de finalizar el periodo de medición, por lo que el contenido recuperado representa la cantidad de hojarasca que cae al suelo que fue acumulada en dos meses aproximadamente.

Con estas matrices de datos, e incorporando otros factores recopilados previamente por Crovo (2020), tales como la biomasa de pie y el crecimiento radicular, se ideó un modelo conceptual que busca relacionar todos los factores considerados en este estudio con el fin de comparar el balance de masas total obtenido tanto para el bosque nativo como para las plantaciones antiguas de pino ubicadas en el Parque Nacional Nonguén. Para ello, se consideraron tres factores principales:

reservorios, aportes (*inputs*) y emisiones (*outputs*) de carbono, que pueden ser desglosados en los distintos elementos estudiados (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Modelo conceptual de reservorios, aportes (*inputs*) y emisiones (*outputs*) de carbono.

Se tomaron en cuenta como reservorios a todos aquellos lugares donde el carbono se acumula y se mantiene disponible. Si bien en estos sitios el carbono sigue liberándose a la atmósfera, la tasa de emisión será mucho menor que en el factor considerado como “emisiones”, por lo que, para efectos de este modelo conceptual, se considerarán como valores constantes que contribuyen a la acumulación del carbono en el suelo, como lo son el carbono total en suelos y la biomasa de pie, es decir, los árboles. Sin embargo, este último componente no es considerado dentro del balance final, puesto que se optó por concentrar el análisis únicamente en los reservorios que se encuentren dentro del suelo.

Se consideraron como aportes (*inputs*) de carbono a todos aquellos elementos que ingresan al suelo producto de la misma dinámica del bosque, contribuyendo a la acumulación de carbono en este. Es por esto por lo que se consideraron como aportes de carbono al suelo la hojarasca y la biomasa asociada al crecimiento de raíces. Esta última, fue medida por Crovo (2020) mediante núcleos de crecimiento (Marthews et al., 2012), en los sitios NOBN1 y NOPL1. Esta metodología permite estimar la producción anual de raíces.

Se consideraron como emisiones (*outputs*) de carbono a todos aquellos medios por los que se libera carbono desde los suelos. Es por ello, que se destacaron dos medios principales: respiración total de CO<sub>2</sub> y aguas de poros. Además, se considera el supuesto de que se pierde todo el C<sub>total</sub> disuelto en las aguas de poro, liberándose completamente al acuífero.

#### **4.2.1 C<sub>total</sub> en suelos**

Con la apertura de calicatas, se realizó una descripción acabada de los perfiles de suelos, y sus respectivos horizontes genéticos, de acuerdo con el protocolo realizado por Schoeneberger et al. (2012). Se recopilieron muestras de suelo de cada uno de los horizontes genéticos y fueron secadas al aire por varios días (3 a 4 jornadas) a 25 °C y tamizadas a 2 mm. La fracción < 2 mm fue separada en varias partes, con el fin de realizar análisis físicos y químicos. Posteriormente las muestras secaron a 105 °C para luego realizar el análisis de carbono.

El carbono total de las muestras se determinó mediante un analizador elemental después de la combustión a 1150 °C (Elementaranalysator vario Max CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Alemania). Por otra parte, la concentración de carbono inorgánico se midió mediante análisis elemental después de eliminar el carbono orgánico durante 16 horas a 450 °C en un horno de mufla mediante oxidación. La concentración de carbono orgánico se calculó a partir de la diferencia entre las concentraciones de carbono total e inorgánico. Los procedimientos y análisis se llevaron a cabo en Laboratory of Routine Measurements & Analyses (RoMA), perteneciente al Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Alemania.

Entre los parámetros físicos de las muestras de suelo analizados se encuentran la densidad aparente y la textura, las que fueron determinadas por el método del hidrómetro y del cilindro, respectivamente, los que se encuentran descritos en Soil Survey Staff (2004).

#### 4.2.2 $C_{total}$ disuelto en aguas de poros

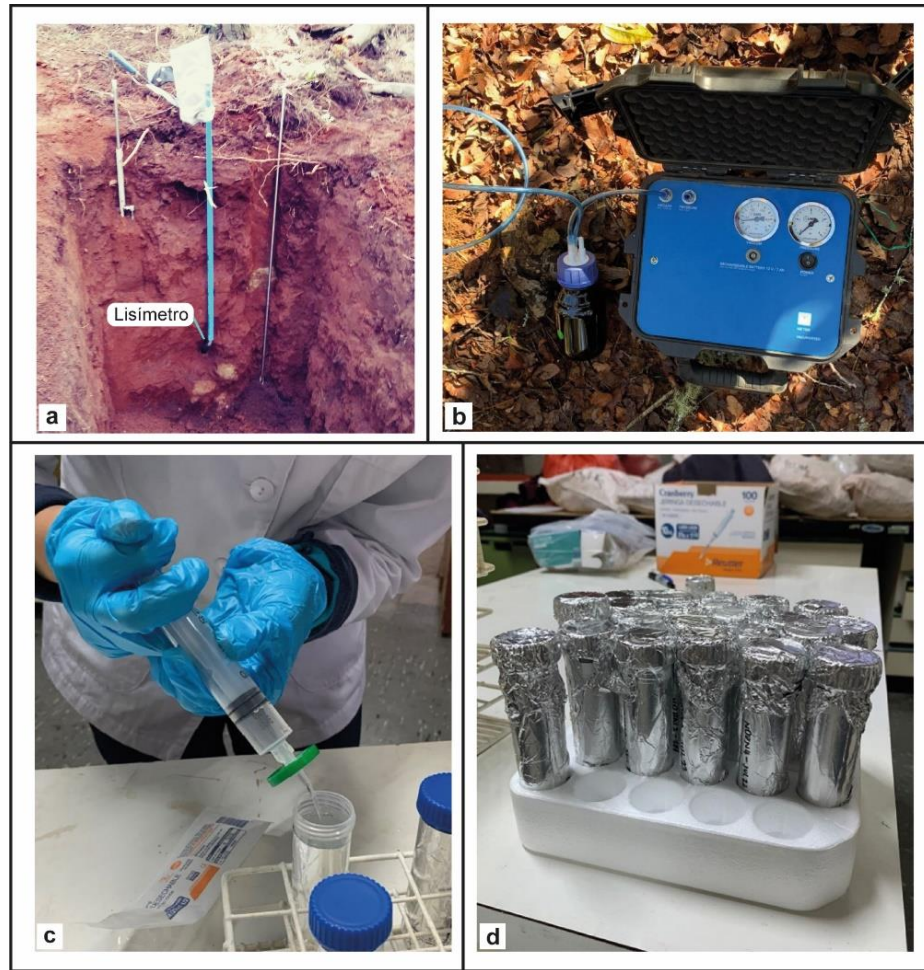
Para el muestreo de las aguas de poro, se instaló un lisímetro de vaso cerámico (SK-20, METER Group Inc, USA) en calicatas de 1,8 m de profundidad, excavadas a mano en el centro de cada parcela de estudio (Figura 4.3a). La obtención del agua de poro se realizó cada dos meses, utilizando bombas de vacío a una succión constante de ~85 kPa durante al menos seis horas. Estas se recogieron en botellas de vidrio ámbar, que protegen las muestras de la luz ultravioleta y posibles alteraciones del carbono. Además, deben transportarse en cámaras frías cerradas, para protegerlas de variaciones bruscas de temperatura hasta la llegada a laboratorio (Figura 4.3b).

El lavado de botellas y contenedores para la recuperación de las muestras se realizó según protocolo. Este contempla la limpieza de los recipientes con agua desionizada (tipo Milli-Q), y un baño ácido ( $HNO_3$  20%wt) según corresponda, de acuerdo con el tipo de medición a realizar. Posteriormente, se mantienen durante seis horas en un horno a  $300^{\circ}C$ , para la esterilización de la botella.

El filtrado de muestras de aguas extraídas se realizó con filtros de acetato de  $0,45 \mu m$ , y posteriormente fueron depositadas en tubos *Falcon*, envueltos en papel aluminio para evitar alteración por contacto con la luz de la muestra (Figura 4.3c-d).

Los procedimientos y análisis se llevaron a cabo en un Total Organic Carbon Analyzer modelo TOC-L CPH de Shimadzu. Las determinaciones de TOC se determinaron como la diferencia entre el carbono total (TC) y carbono inorgánico (IC), siguiendo las recomendaciones del fabricante. Las muestras de agua de poro fueron analizadas en el Laboratorio de Conservación y Dinámica de Suelos Volcánicos de la Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.





**Figura 4.3** Metodología de muestreo y preparación de muestras de agua de poros. (a. Instalación de lisímetro en calicata; b. Extracción de agua de poro a través de bombas al vacío; c. Filtrado de muestras; d. Muestras empaquetadas para envío a análisis).

#### 4.2.3 Flujo de CO<sub>2</sub> desde suelos

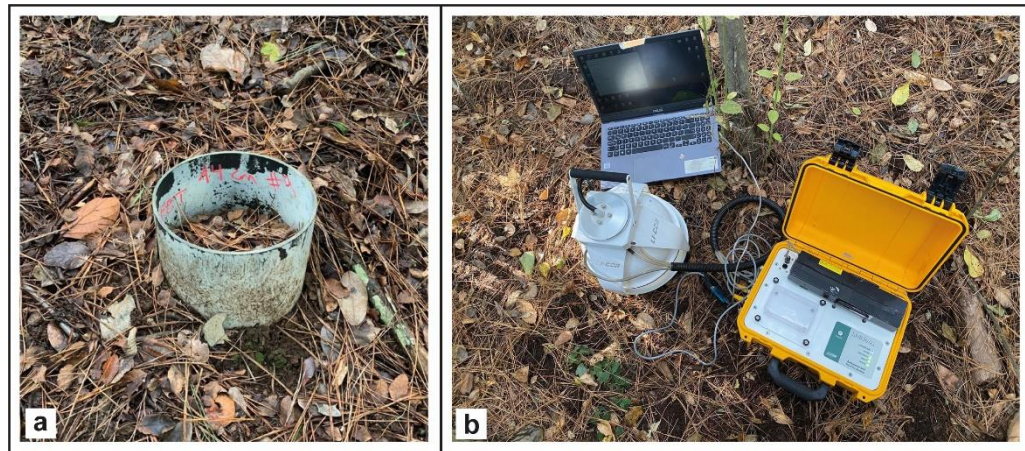
Para la medición del flujo de CO<sub>2</sub>, y la extrapolación de este componente gaseoso en los suelos, se instalaron una serie de collares de PVC en cada sitio de estudio, detallados a continuación (Figura 4.4a).

- Un collar de PVC de 40 cm de altura, para medir la respiración heterótrofa enterrado en los primeros 30 cm de suelo, quedando a una altura de 10 cm, medible por sobre el suelo. El objetivo de este método es eliminar la respiración autótrofa (derivada de las raíces) proveniente de esta porción de suelo.
- Cuatro collares de PVC de 11 cm de altura, enterrados a una profundidad de 1 cm en el suelo. Dependiendo de las condiciones del terreno, estos fueron instalados con una



separación de ~1 m del collar de PVC heterótrofo. Con esta instalación se busca registrar la respiración total (respiración derivada de raíces + respiración heterótrofa). Para este estudio, solo se considerarán estas mediciones.

Las mediciones se llevaron a cabo con un IRGA (LI-8100A, Licor Inc., Lincoln, NE, USA) y una cámara de suelo de 0,2 m, que estiman la tasa a la que el CO<sub>2</sub> se difunde al aire libre. Se realizaron mediciones bimensuales, considerando dos mediciones al día (mañana y tarde), con una duración de dos minutos cada una, para una mayor representatividad de los datos (Figura 4.4b).



**Figura 4.4** Metodología de muestreo de flujo de CO<sub>2</sub>. (a. Collar de PVC heterogéneo de 0.4 m de altura; b. Muestreo con instrumento LICOR).

#### 4.2.4 Hojarasca del suelo

Con el fin de determinar la biomasa de cada parcela de estudio, se recuperó la hojarasca a partir de ocho colectores situados únicamente en los sitios NOBN1 y NOPL1. Estos colectores consisten en mallas que se disponen sobre estructuras de 1 m<sup>2</sup> de superficie, a 0,5 m de separación del suelo (Figura 4.5a). La toma de muestras se realiza de forma bimensual, durante el periodo anteriormente especificado.

Tras la recolección, la hojarasca debe transportarse a laboratorio y secarse en horno a 65°C, hasta alcanzar un peso constante (Figura 4.5b). Se debe procurar realizar un correcto pesaje de las muestras antes y después del secado, para comparar las masas obtenidas posterior a la descomposición. Para obtener el contenido de carbono en la hojarasca comúnmente se utiliza un factor de 0,5, puesto que la literatura indica que, en promedio, la biomasa seca contiene cerca de un 50% de carbono (Schlegel et al., 2001). Sin embargo, Crovo et al. (2021) determinó mediante

un experimento de descomposición, factores específicos para la obtención del carbono en los sitios de estudio, tanto para bosque nativo (factor: 0,437), como para plantaciones de pino (factor: 0,460).



**Figura 4.5** Metodología de muestreo de hojarasca de suelo. (a. Muestreo de hojarasca en terreno; b. Muestras en el horno de secado).

### 4.3 Tratamiento de datos y análisis estadístico

De acuerdo con lo descrito en el apartado 4.2, las principales matrices de datos empleadas para análisis corresponden a  $C_{total}$  en suelos,  $C_{total}$  disuelto en aguas de poros, flujo de  $CO_2$  desde suelos, y hojarasca del suelo.

Para obtener el  $C_{total}$  en suelos, se calcularon proporciones y relaciones entre el porcentaje de carbono total ( $C_t$  %), la densidad aparente del suelo (D.A.), el espesor del horizonte genético (HG) estudiado (en cm) y la presencia de fragmentos rocosos ( $Fg\%$ ), obteniendo finalmente el contenido del elemento de interés, mediante la siguiente fórmula:

$$C_{reservorio} = \frac{C_t}{100} * D.A.* \frac{espesor\ HG}{100} \left(1 - \frac{Fg}{100}\right)$$

De esta forma se obtienen contenidos de carbono (en  $Mg/m^2$ ) para cada uno de los horizontes genéticos muestreados. Posteriormente, con el objetivo de obtener un promedio de carbono total en cada sitio de estudio, es necesario realizar un promedio ponderado del contenido de  $C_{total}$  por el espesor de cada horizonte genético.

Por otra parte, el contenido de  $C_{total}$  disuelto en aguas de poro fue directamente extraído desde los resultados entregados por el laboratorio (mg/L), y se empleó un factor de 0,01 para transformar los valores a la unidad de medida homogénea (Mg/ha).

En cuanto a las mediciones de flujo de CO<sub>2</sub> desde suelos, los valores numéricos representan un promedio de las dos mediciones realizadas durante el día, para cada uno de los cinco puntos de mediciones por sitio, obteniendo resultados en ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{día}$ ) de CO<sub>2</sub>. Estos resultados fueron transformados a flujo de carbono puro en (Mg/ha/día), mediante conversiones estequiométricas, utilizando el peso molecular del CO<sub>2</sub> y del C; además se utilizó el factor  $4,4 \times 10^{-7}$  para la conversión de unidades.

En cuanto a la hojarasca, el peso recuperado mensualmente en las cuatro trampas instaladas en cada sitio representa 4 m<sup>2</sup>, por lo que debe considerarse un promedio del peso recolectado. Posteriormente, se aplica el factor de conversión 0,01 para obtener el peso de hojarasca en Mg/ha. Finalmente, los pesos registrados de hojarasca posterior al proceso de secado fueron ponderados por el factor 0,437 para la hojarasca de bosque nativo, y 0,460 para la proveniente del sitio de plantación de pino.

Además, se realizaron todas las conversiones pertinentes para dejar todos los resultados de contenido de carbono en una unidad de medida homogénea (Mg/ha). Al realizar esta transformación se facilita la comparación de las matrices de datos estudiadas. Esta unidad es equivalente a 1 tonelada por 10.000 m<sup>2</sup>.

Las matrices de datos fueron analizadas por separado mediante estadísticos descriptivos básicos, tales como la media y la desviación estándar, utilizando Microsoft Excel. Para evaluar diferencias significativas entre las medias de distribución de cada uno de los parámetros de estudio se decidió emplear pruebas paramétricas, que deben cumplir los supuestos de normalidad de distribución de datos y homogeneidad de varianza. Para verificar dichos supuestos, se utilizó el software IBM SPSS Statistics, que mediante la prueba de Shapiro-Wilk comprueba la normalidad de distribución de los datos, y a partir de la prueba de Levene se demuestra la homogeneidad de varianzas. Ambas pruebas consideran un nivel de significancia de  $p \leq 0,100$ .

Si los grupos de datos analizados cumplían los requisitos, se llevó a cabo la realización de la prueba paramétrica ANOVA, para comprobar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los datos, al comparar los resultados obtenidos para bosque nativo (BN) y plantaciones (PL). Por otro lado, si los grupos de datos estudiados no cumplían los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, que de acuerdo con Corder & Foreman (2011), es robusta ante distribuciones no normales y no requiere

homogeneidad de varianzas entre los grupos. Esta prueba se basa en la clasificación de los datos en lugar de sus valores brutos, evaluando si las medianas de los grupos son estadísticamente iguales o diferentes.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 C<sub>total</sub> disuelto en suelos

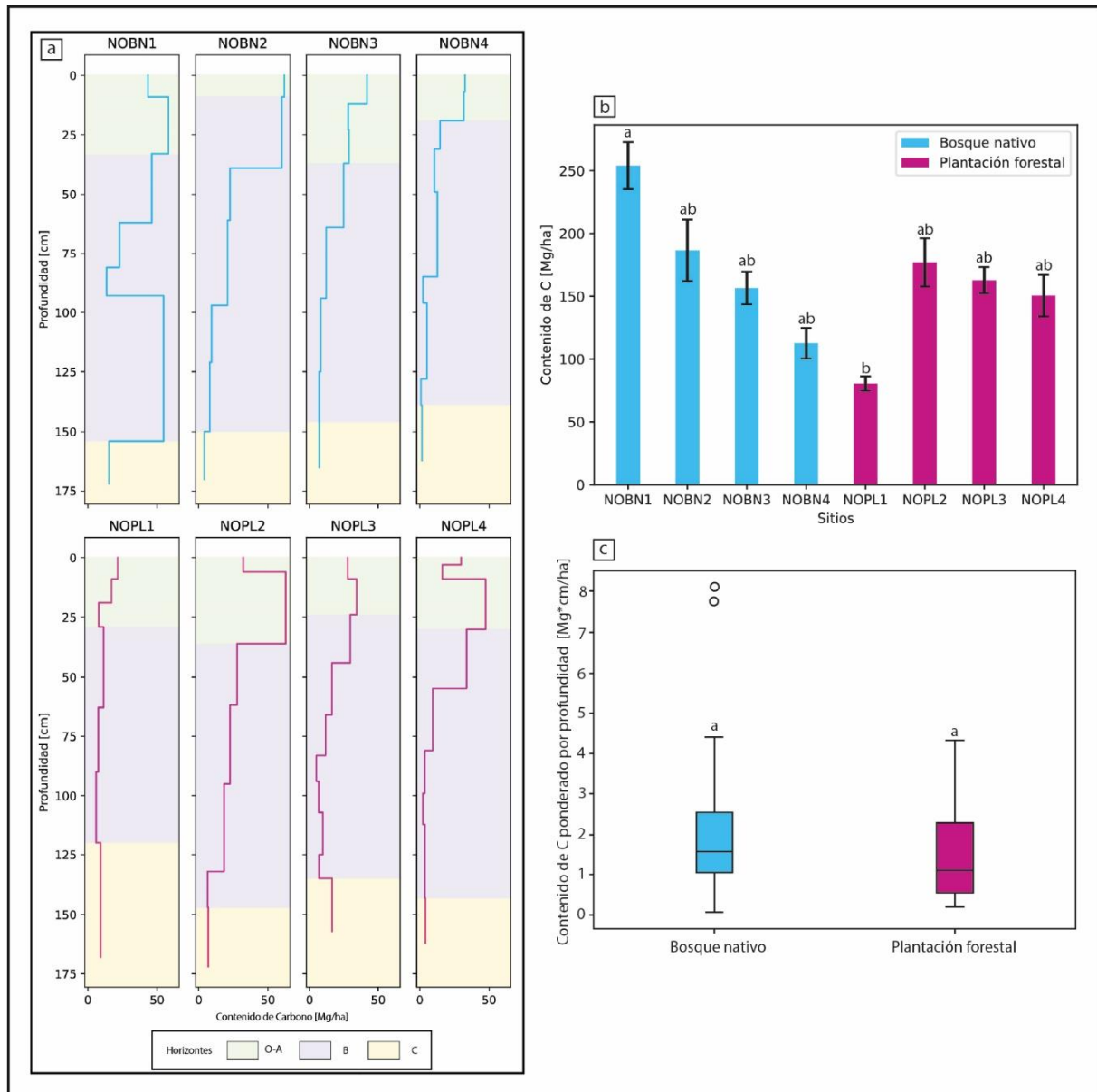
Las muestras obtenidas en terreno fueron enumeradas y descritas de acuerdo con el horizonte genético del que fue muestreada. De esta forma, fue posible asignar un contenido de carbono específico a cada uno de los horizontes por cada sitio de estudio (Anexo 1), y representarlos en gráficos de profundidad (Figura 5.1a).

Se estudiaron un total de 32 horizontes genéticos para bosque nativo (BN), de los cuales, solo los sitios NOBN1 y NOBN3 presentaban horizonte O. Por otra parte, se revisaron 33 horizontes genéticos para plantaciones forestales (PL), de los cuales únicamente el sitio NOPL3 contaba con horizonte O (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1** Cantidad de horizontes genéticos muestreados.

Horizonte genético	Bosque nativo (BN)	Plantaciones forestales (PL)
O	2	1
A	7	9
B	19	19
C	4	4

Para efectos prácticos y de mayor comprensión de los modelos, se aunaron los horizontes genéticos O y A, puesto que comparten características, tales como la presencia de materia orgánica, y permitían entregar resultados más representativos del contenido de carbono, en adelante se denominan horizontes O-A. A su vez, para aquellos perfiles de suelo estudiados que no alcanzaban a describir en profundidad el horizonte C, se estableció que el último horizonte B se designaría como tal. Adicionalmente, se extrapolaron los valores de densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) del sitio NOPL4 a partir del sitio original NOPL1, debido a la pérdida del material correspondiente al primero.



**Figura 5.1** Contenido de carbono en el suelo. (a. Variación del contenido de carbono en profundidad para cada sitio de estudio (en [Mg/ha]); b. Variación del contenido total de carbono por sitio (en [Mg/ha]), las letras indican diferencias estadísticamente significativas, y las barras de error representan la desviación estándar de las muestras ( $\sigma$ ); c. Diagrama de cajas y bigotes que indica la variación del contenido total de carbono ponderado por la profundidad para ambas condiciones).

En casi la totalidad de los sitios, se puede observar una tendencia inversamente proporcional entre el contenido de carbono, y la profundidad del suelo estudiado, existiendo excepciones como es el caso del sitio NOBN1, en los que se presenta un aumento considerable del contenido de carbono en el horizonte B, hasta la profundidad de 150 cm.

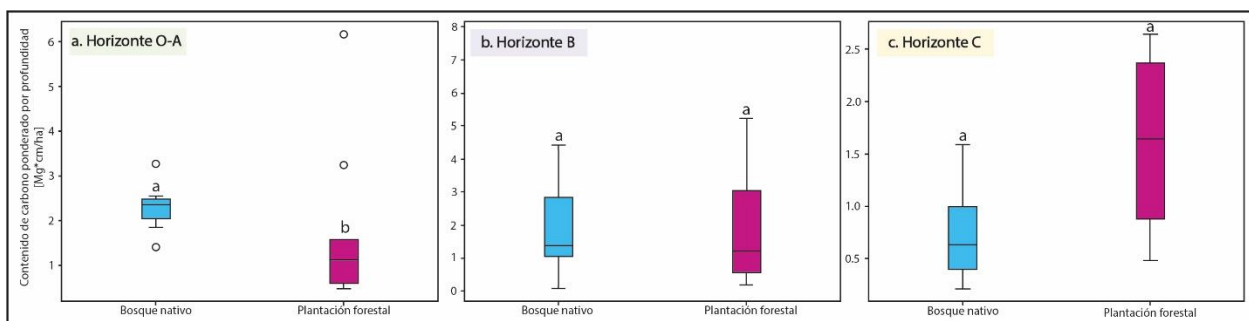
Por otra parte, se puede constatar que el horizonte genético más empobrecido en carbono es el horizonte C, tanto para áreas cubiertas por bosque nativo como en las cubiertas por plantaciones forestales (6,51 Mg/ha, y 9,24 Mg/ha, respectivamente; Tabla 5.2). Además, es posible observar un comportamiento anómalo del horizonte B en el promedio de los sitios de la condición “Bosque Nativo”, presentando valores más elevados en el contenido de carbono que el horizonte O-A, normalmente enriquecido en este elemento (91,19 Mg/ha, y 89,47 Mg/ha, respectivamente).

**Tabla 5.2** Promedio ponderado de carbono por la profundidad (en [Mg/ha]) según horizonte genético.

<b>Horizonte genético</b>	<b><math>\bar{X}_p</math> Bosque nativo (BN) (Mg/ha)</b>	<b><math>\bar{X}_p</math> Plantaciones forestales (PL) (Mg/ha)</b>
OA	89,47	76,10
B	91,19	60,99
C	6,51	9,24

De manera adicional, se buscó analizar las diferencias generales en el contenido total de carbono para cada uno de los sitios (Figura 5.1b). Los datos de contenido de carbono por sitio, que conforman ocho poblaciones de datos, no pasaron la prueba de normalidad, y no demostraron cumplir con el supuesto de homogeneidad de varianzas, por lo que fueron analizados con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, que reveló variaciones estadísticamente significativas entre los sitios NOBN1 y NOPL1, con un nivel de significancia  $p < 0,100$ . Por otra parte, al analizar los contenidos totales de carbono ponderados por la profundidad, y agrupados por condición, es decir, dos poblaciones de datos (“Bosque Nativo” y “Plantación Forestal”), con la prueba antes mencionada, no se encontraron diferencias significativas entre ambos conjuntos (Figura 5.1c).

Finalmente, se analizaron las posibles diferencias estadísticas en el contenido de carbono en los diferentes horizontes genéticos del suelo, para cada una de las condiciones. Todos los grupos de datos fueron analizados mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, puesto que no cumplían con la normalidad de distribución. De esta manera, con un nivel de significancia de  $p < 0,100$ , se obtuvo que para el caso del horizonte O-A existen diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes coberturas en la cantidad de carbono que albergan (Figura 5.2a), mientras que, para los horizontes B y C no se observaron variaciones significativas (Figura 5.2b-c).



**Figura 5.2** Comparación de la variabilidad del contenido de carbono en los diferentes horizontes según cobertura: a. Horizonte O-A; b. Horizonte B; c. Horizonte C. Las letras indican diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de muestras.

## 5.2 $C_{total}$ disuelto en aguas de poros

Si bien se recuperaron muestras de agua de poro de alrededor del 70% de los sitios de estudio, muchas veces estas no contaban con el volumen suficiente para que los resultados fueran robustos para hacer comparaciones entre sitios o entre estaciones. Por esta razón, se decidió trabajar con el contenido total de carbono disuelto en toda la cantidad de agua que pudo ser recuperada y posteriormente analizada, en un periodo de un año, para los sitios NOBN1, NOBN4, NOPL1, NOPL3 y NOPL4 (Tabla 5.3).

**Tabla 5.3** Contenido de carbono disuelto en agua de poros (en Mg/ha), en las muestras que pudieron ser analizadas.

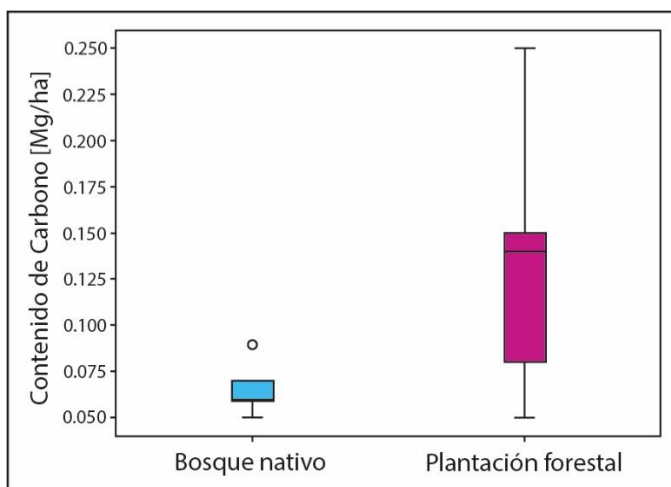
Sitio	Mes	Volumen (ml)	$C_{total}$ (mg/L)	$C_{total}$ (Mg/ha)	$\bar{X}$	$\sigma$
NOBN1	may-22	42	6,86	0,07	0,07	0,01
NOBN1	jul-22	45	6,41	0,06		
NOBN4	may-22	50	6,27	0,06		
NOBN4	jul-22	50	5,09	0,05		
NOBN4	sept-22	37	8,77	0,09		
NOPL1	may-22	25	14,95	0,15	0,14	0,08
NOPL1	jul-22	36	14,48	0,14		
NOPL3	jul-22	34	8,26	0,08		
NOPL4	may-22	50	5,17	0,05		
NOPL4	jul-22	40	25,20	0,25		

De esta forma, se analizó un total de 224 ml de aguas de poro provenientes de suelos con cubierta de “Bosque Nativo”, que contenían 0,33 Mg/ha de carbono total; y un total de 295 ml de aguas de poro provenientes de suelos con cubierta de “Plantación Forestal” que contenían 0,68 Mg/ha de carbono total. A partir de estos resultados se pudo concluir que el contenido de carbono liberado al



ambiente desde los suelos mediante el agua es considerablemente mayor en los sitios con cubierta de plantaciones, que en los sitios que presentan cubierta de bosque nativo (Figura 5.3).

Debido a la escasa cantidad de datos con los que se disponía para este parámetro, se decidió no realizar las pruebas estadísticas de normalidad, homogeneidad de las varianzas y las pruebas paramétricas, puesto que estas pierden robustez al estudiar poblaciones tan reducidas.



**Figura 5.3** Diagrama de cajas y bigote que muestra la variación del contenido de carbono en las aguas de poro recuperadas, para las distintas condiciones.

### 5.3 Flujo de CO<sub>2</sub> desde suelos

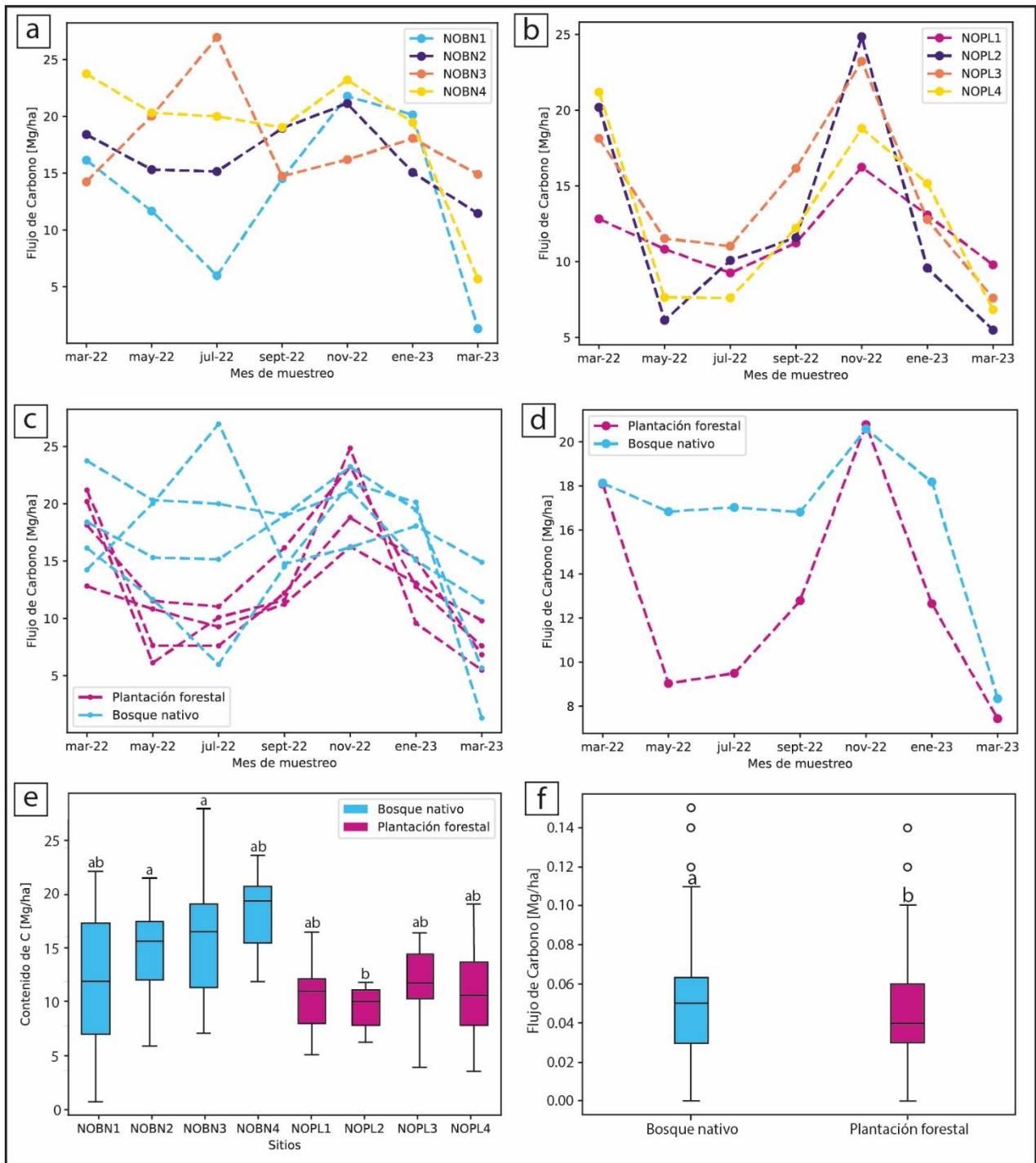
Los datos obtenidos en terreno representan el contenido de dióxido de carbono que se libera a la atmósfera durante un día, en  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ . A partir de conversión de unidades y estequiométricas se obtienen las tasas de flujo de carbono mensuales y es posible extrapolarlas al periodo de estudio (Tabla 5.4). De esta forma, se obtuvo que la liberación de carbono a la atmósfera por respiración del suelo es, en promedio, mayor en las áreas cubiertas por bosque nativo que en las áreas cubiertas por plantaciones forestales (115,88 Mg/ha, y 90,26 Mg/ha, respectivamente; Figura 5.4c). Sin embargo, se puede observar una tendencia similar a la baja en los periodos estivales para ambos tipos de coberturas (Figura 5.4d). En cuanto a las variaciones por sitio (Figura 5.4a-b), se observaron tendencias similares entre los sitios con igual cobertura, presentando algunas anomalías aisladas, como el aumento en el mes de julio para el sitio NOBN3. Además, se puede notar que el sitio NOBN1 sigue una tendencia similar al comportamiento de sitios que presentan cubiertas de plantaciones forestales más que a las cubiertas de bosque nativo, como se esperaba.

Adicionalmente, se estudiaron las diferencias significativas entre los flujos de carbono por sitio, empleando ocho poblaciones de datos, mediante la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, puesto que los datos no presentaban homogeneidad en las varianzas. Se obtuvo que existen variaciones estadísticamente significativas entre los sitios NOBN2-NOPL2 y NOBN3-NOPL3, identificadas con un nivel de significancia de  $p < 0,100$  (Figura 5.4e). Sin embargo, para la obtención de este resultado se realizó un análisis de *outliers*, es decir, valores o muy elevados o disminuidos que no siguen la tendencia general de los datos, que pueden representar errores en la medición, y derivar en una incorrecta interpretación de los datos.

Por otra parte, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para el flujo de carbono total emitido por cada una de las condiciones estudiadas, puesto que estas dos poblaciones de datos contaban con homogeneidad de varianzas, pero no con distribución normal. Se obtuvo que las variaciones observadas en el flujo para las distintas coberturas estudiadas (bosque nativo y plantación forestal) presentan variaciones estadísticamente importantes, con un nivel de significancia de  $p < 0,100$  (Figura 5.4f).

**Tabla 5.4** Flujo de Carbono desde suelos, en [Mg/ha], para los distintos sitios dentro del área de estudio, en un periodo de un año.

Sitio	mar-22	may-22	jul-22	sept-22	nov-22	ene-23	mar-23	Total anual	Estadísticos descriptivos			
									$\bar{X}_{\text{sitio}}$	$\sigma_{\text{sitio}}$	$\bar{X}$	$\sigma$
Cant. días	60	60	60	60	60	60	60	420				
NOBN1	16,14	11,66	5,98	14,51	21,77	20,13	1,31	91,50	13,07	7,39	115,88	17,53
NOBN2	18,40	15,31	15,15	18,95	21,13	15,06	11,46	115,46	16,49	3,21		
NOBN3	14,23	20,03	26,95	14,74	16,19	18,06	14,90	125,11	17,87	4,50		
NOBN4	23,74	20,32	20,00	19,02	23,21	19,47	5,68	131,43	18,78	6,06		
$\bar{X}$ mensual	18,13	16,83	17,02	16,81	20,58	18,18	8,34	463,51				
NOPL1	12,82	10,82	9,26	11,23	16,24	13,08	9,79	83,23	11,89	2,38	90,26	7,30
NOPL2	20,19	6,13	10,08	11,58	24,85	9,58	5,48	87,88	12,55	7,26		
NOPL3	18,14	11,53	11,03	16,16	23,23	12,78	7,60	100,47	14,35	5,22		
NOPL4	21,19	7,64	7,61	12,21	18,80	15,17	6,83	89,45	12,78	5,80		
$\bar{X}$ mensual	18,08	9,03	9,49	12,79	20,78	12,65	7,43	361,03				

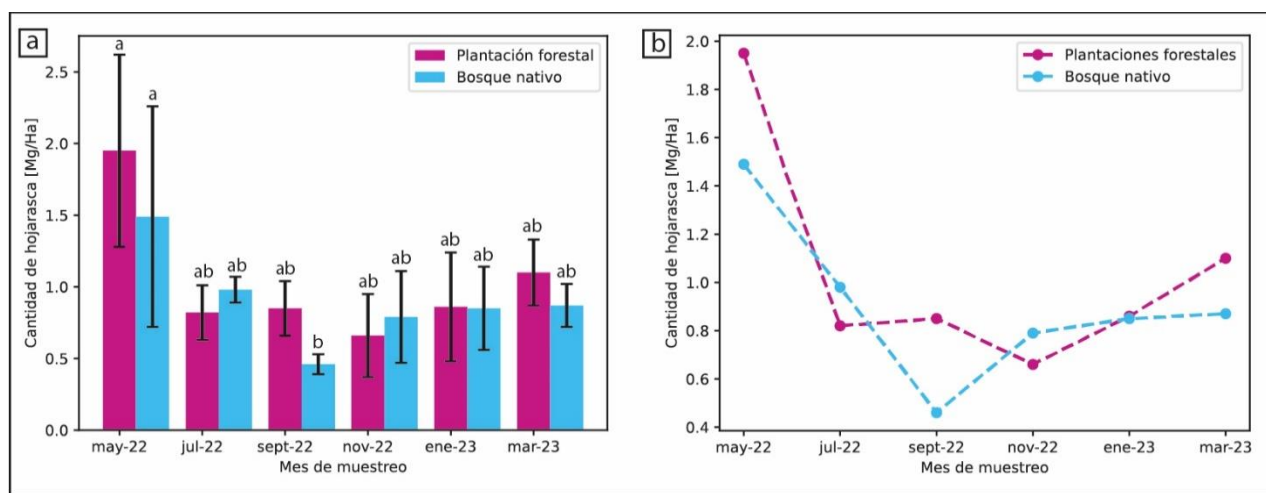


**Figura 5.4** Flujo de Carbono en los sitios de estudio (a. En sitios de Bosque Nativo (BN); b. En sitios de plantaciones forestales (PL); c. Comparación del flujo de Carbono entre las dos condiciones de estudio; d. Comparación de los promedios mensuales del flujo de Carbono de todos los sitios de cada condición; e. Variación total del flujo de carbono anual por sitio, las letras indican diferencias estadísticamente significativas; f. Variación total del flujo de carbono anual por condición, las letras indican diferencias estadísticamente significativas).

#### 5.4 Hojarasca del suelo

Los pesos de hojarasca obtenidos de forma bimensual en los sitios NOBN1 y NOPL1 en las respectivas trampas se utilizarán para extrapolar un total de hojarasca anual para cada cobertura. Dichos valores se presentan en la Tabla 5.5. De esta forma, se obtuvo que la cantidad de hojarasca anual que cae al suelo es mayor en el área cubierta por Plantaciones Forestales (PL), que en el área cubierta por Bosques Nativos (BN) (6,25 Mg/ha/año y 5,44 Mg/ha/año, respectivamente, Figura 5.5b), pero que, en ambas condiciones, se siguen patrones estacionales similares.

Además, se puede observar un comportamiento inusual en el primer mes de muestreo, en el que el contenido recuperado de hojarasca entre los meses marzo-2022 y mayo-2022 sobrepasa casi en un 50% a los contenidos recuperados en los siguientes meses de muestreo (Figura 5.5b), reflejando la mayor caída de hojas durante la temporada otoñal.



**Figura 5.5** Distribución de caída de hojarasca en los sitios de estudio (a. Comparación del contenido de hojarasca en BN y PL en el periodo de un año, las letras indican diferencias estadísticamente significativas, y las barras de error representan la desviación estándar de las muestras ( $\sigma$ ); b. Distribución anual de la caída de hojarasca).

De acuerdo con Crovo et al. (2021), el porcentaje de carbono contenido en las hojas de sitios ubicados dentro de la Reserva Nacional Nonguén es de 43,7% para BN (obtenida en el sitio NOBN1), y 46% para PL (obtenida en el sitio NOPL1). De esta forma, es posible calcular el contenido total de carbono aportado por al ciclo del carbono, que consiste en 2,38 Mg/ha/año para BN, y 2,88 Mg/ha/año para PL, respectivamente.

**Tabla 5.5** Contenido de hojarasca, estadísticos y contenido de carbono para los sitios NOBN1 y NOPL1.

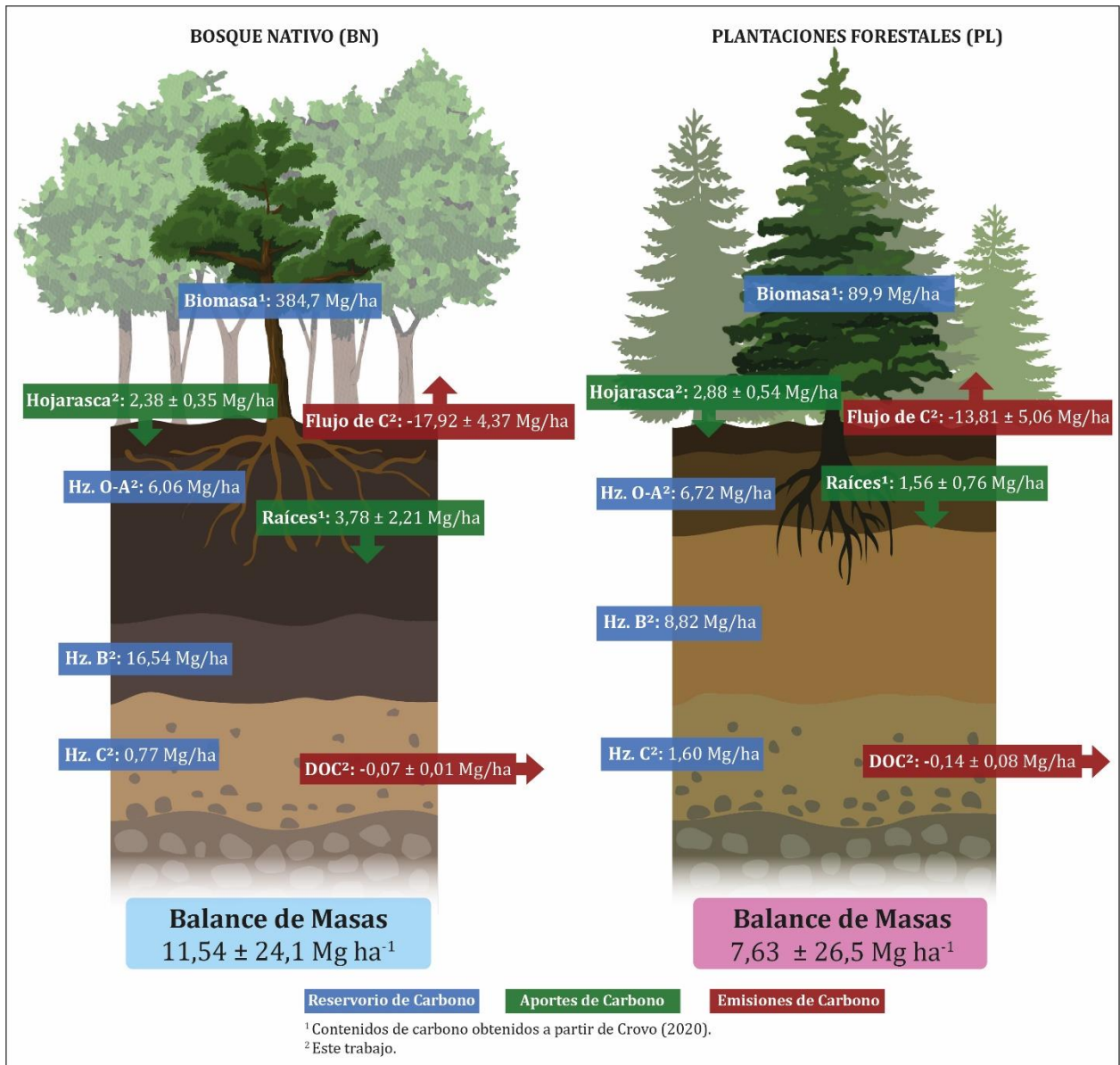
Condición	Mes de Muestreo	Total mensual hojarasca (Mg/ha)	Total anual hojarasca (Mg/ha)	Promedio ( $\bar{X}$ )	Desviación estándar ( $\sigma$ )	C <sub>total</sub> en hojarasca (Mg/ha) <sup>1</sup>
Bosque Nativo (Sitio NOBN1)	May-22	1,49	5,44	0,88	0,35	2,38
	Jul-22	0,98				
	Sept-22	0,46				
	Nov-22	0,79				
	Ene-23	0,85				
	Mar-23	0,87				
Plantaciones Forestales (Sitio NOPL1)	May-22	1,95	6,25	1,04	0,54	2,88
	Jul-22	0,82				
	Sept-22	0,85				
	Nov-22	0,66				
	Ene-23	0,86				
	Mar-23	1,10				

<sup>1</sup> Contenido de carbono obtenido en base al trabajo de (Crovo et al., 2021).

Al igual que para los otros grupos de datos de estudio, el contenido de hojarasca recopilado fue analizado estadísticamente mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, puesto que no cumplen la homogeneidad de varianzas verificada con la prueba de Levene. En este caso. Fueron consideradas doce poblaciones. Así, se obtuvo que con un nivel de significancia de  $p < 0,100$ , existen diferencias estadísticamente significativas entre distintos pares de datos (Figura 5.5a). Particularmente, se observa que existen importantes diferencias entre la cantidad de hojarasca recuperada para la cobertura de Bosque Nativo en el mes de mayo 2022 y septiembre 2022, que coinciden con estaciones en las que ocurren cambios en las condiciones ambientales.

### 5.5 Modelo de la dinámica del Carbono para el Parque Nacional Nonguén

Al estudiar el ciclo del carbono en los ecosistemas terrestres, los suelos juegan un papel importante en el almacenamiento a largo plazo de este elemento, por lo que recientemente el estudio de este reservorio ha experimentado un creciente interés. El balance de carbono en los suelos depende tanto de la suma de entradas, como de la liberación de carbono, así como también de los depósitos de almacenamiento de este elemento que se consideran “constantes”. Este balance puede presentar diversas variaciones temporales, ya sean anuales o estacionales, que se pueden ver influenciadas de manera diferencial por las condiciones ambientales (Subke et al., 2006). Es por ello, que de acuerdo con el apartado 4.2, se conformaron tres grupos a los que se le asociaron las matrices de estudio: reservorios, aportes (*inputs*) y emisiones (*outputs*) de carbono (Figura 5.6).



**Figura 5.6** Modelo conceptual de la dinámica del carbono en el Parque Nacional Nonguén, según el tipo de cobertura presentada.

Fueron considerados como reservorios de carbono, tanto el carbono total en suelos, como la biomasa de pie. Para definir esta variable se consideró el carbono en los suelos como el valor promedio (ponderado por la profundidad) de todos los horizontes genéticos de cada sitio de estudio, agrupados por condición. De esta forma, se obtuvo que, en promedio, los suelos con cubierta de bosque nativo albergan contenidos de carbono que ascienden a un total de 23,37 Mg/ha, mientras que los suelos con cubierta de plantaciones forestales almacenan 17,14 Mg/ha de carbono. Aunque la variable biomasa de pie fue considerada como reservorio, no se incluyó en el balance final,

puesto que el carbono que contempla no se encuentra disponible dentro del suelo propiamente como tal. Sin embargo, Crovo (2020) muestra que en los sitios de estudio NOBN1 y NOPL1, la variación que existe entre bosques nativos y plantaciones es de 384,7 y 89,9 Mg/ha de carbono, respectivamente, lo cual resulta es útil al cuantificar los efectos del reemplazo.

Fueron considerados como aportes (*inputs*) de carbono, tanto la biomasa asociada al crecimiento de raíces como el contenido de hojarasca que cae al suelo. El crecimiento de raíces representa un aporte de carbono significativo en suelos de bosques nativos ( $3,78 \pm 2,21$  Mg/ha), mientras que se ve más empobrecido en plantaciones ( $1,56 \pm 0,76$  Mg/ha). Por otra parte, el contenido de carbono que aporta la cantidad de hojarasca que cae al suelo fue obtenido en base al trabajo de Crovo et al. (2021), obteniendo un ligero aumento del contenido de carbono para plantaciones forestales, por sobre bosque nativo ( $2,88 \pm 0,54$  y  $2,38 \pm 0,35$  Mg/ha de carbono, respectivamente). De esta forma se obtuvo que el total de aportes de carbono para bosque nativo ascienden a un total de  $6,16 \pm 2,56$  Mg/ha, mientras que para plantaciones forestales se consideran para el modelo conceptual final  $4,44 \pm 1,30$  Mg/ha.

Por último, se consideraron como salidas (*outputs*) el carbono disuelto en las aguas de poro y la respiración total de CO<sub>2</sub>. Si bien las mediciones de agua de poro no fueron completamente representativas, se estimó que en promedio se pierden  $0,07 \pm 0,01$  Mg/ha de carbono al año, mientras que para plantaciones esta cifra se duplica a  $0,14 \pm 0,08$  Mg/ha. Por otra parte, la respiración total de los suelos, que contempla tanto a la respiración autótrofa de las raíces, como la respiración heterótrofa de los organismos y microorganismos que habitan el suelo, mostró una variación estadísticamente significativa para bosques nativos ( $17,92 \pm 4,37$  Mg/ha/año), con respecto de plantaciones forestales ( $13,81 \pm 5,06$  Mg/ha/año). Se obtuvo entonces, que el total de emisiones de carbono para el bosque nativo es de  $17,97 \pm 4,38$  Mg/ha, mientras que para plantaciones forestales es de  $13,95 \pm 5,14$  Mg/ha.

Finalmente, considerando todos los componentes en el balance, se calculó un reservorio total de carbono en el suelo para bosque nativo de  $11,54 \pm 24,1$  Mg/ha, mientras que para plantaciones forestales fue de  $7,63 \pm 26,5$  Mg/ha (Figura 5.6).

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1 Influencia de las características climáticas en la dinámica del Carbono

Si bien se plantea que el tipo de vegetación que predomina como cubierta de los suelos juega un rol fundamental en el contenido de carbono que puede ser acumulado en cada ecosistema, existen otros factores que influyen en contribuir a formar la reserva de carbono orgánico en los suelos, destacando entre ellos la composición atmosférica y el clima (Jobbagy & Jackson, 2000). Este último factor, es un punto importante al evaluar las implicancias de los cambios en los usos de suelo en el ciclo del carbono en las últimas décadas, asociado al cambio climático, puesto que la tasa de producción de la biomasa superficial y la descomposición de la materia orgánica depende en gran medida de las características climáticas locales (Canadell, 2020; Li et al., 2012).

Se tiene constancia que el almacenamiento de carbono total en suelos ( $C_{total}$ ) está determinado por el balance entre las entradas de carbono provenientes tanto de la biomasa superficial, representado por la producción de árboles, plantas y sus derivados; y las salidas de carbono, representadas principalmente por los procesos de descomposición. De acuerdo con el trabajo de Jobbagy & Jackson (2000), se estipula que, para climas húmedos como el que caracteriza a la zona de estudio, tanto la producción de biomasa como la descomposición impulsada por microorganismos, se ven potenciados con el aumento de las temperaturas. Es por esto que, si los aumentos relativos de los procesos de descomposición son considerablemente mayores, se espera obtener un balance negativo, favoreciendo la liberación de carbono a la atmósfera, al enfrentar escenarios de aumento progresivo de la temperatura global.

A su vez, la liberación de  $CO_2$  a la atmósfera a partir de los suelos, estaría potenciando el cambio climático, puesto que este gas en particular contribuye de manera eficiente al efecto invernadero, con tiempos de residencia atmosférica que pueden alcanzar cientos a miles de años (Crisp et al., 2022).

Por otra parte, estudios recientes han hecho notar que una parte importante de las pérdidas de  $C_{total}$  producto del calentamiento global pueden atribuirse a la variación sutil, pero significativa en el tiempo de residencia del carbono en el suelo, que será menor, producto del aumento en las tasas de descomposición, las que se ven impulsadas por el aumento de la temperatura. De esta forma, en el contexto del actual calentamiento global se predice un detrimento de  $C_{total}$  fuertemente relacionado



al aumento de las temperaturas (Canadell, 2020), que resulta ser independiente de la cobertura vegetal que este tenga.

### **6.1.1 Variaciones estacionales de la dinámica del Carbono**

Lo descrito anteriormente puede ser contrastado con los resultados obtenidos en la presente memoria de título, al comparar los factores de estudio que permiten hacer revisiones estacionales, como lo son el flujo de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y la producción de hojarasca.

Las mediciones del flujo de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, confirman fuertemente lo propuesto por Jobbagy & Jackson (2000) puesto que se puede comprobar que existe una tendencia al alza en la liberación de este gas a la atmósfera en los periodos estivales, en los que tiende a aumentar la temperatura en la región a una media de 23°C, mientras que en los periodos invernales se registran temperaturas que en promedio bordean los 6°C (DGAC Chile, 2023). Esta tendencia estacional puede observarse de igual forma tanto para bosques nativos como para plantaciones forestales, a pesar de algunas excepciones, que pueden estar representando errores en las mediciones (por ejemplo, el sitio NOBN3, en el mes de julio de 2022; Figura 5.4a).

Se puede notar que, en el periodo de muestreo, se alcanzan los valores de flujo de CO<sub>2</sub> máximos durante el mes de noviembre de 2022 que concuerda con el registro de la temperatura máxima anual para el año de estudio (31,3°C) (Figura 5.4d). Por otra parte, si bien se registran las menores emisiones de CO<sub>2</sub> durante el mes de marzo de 2023, estas no concuerdan con el promedio de temperaturas registradas por la Dirección Meteorológica de Chile, por lo que se asume un posible error en las mediciones. Sin embargo, si se revisa el segundo periodo con menores emisiones de CO<sub>2</sub>, es decir, el mes de julio de 2022, se registraron temperaturas máximas alrededor de 15°C, concordando con la tendencia propuesta por Jobbagy & Jackson (2000).

En cuanto a la producción de hojarasca, se comprobó que existen diferencias estadísticamente significativas entre los meses otoñales, representados en este caso por el periodo abril-mayo, con respecto a los meses invernales, representado por el periodo agosto-septiembre, considerando que el contenido de hojarasca recopilado equivale a dos meses (Figura 5.5a). De esta forma, se sigue parcialmente la tendencia propuesta por Jobbagy & Jackson (2000), puesto que los mayores volúmenes de material (1,49 Mg/ha para bosque nativo, y 1,95 Mg ha<sup>-1</sup> para plantaciones forestales) fueron reconocidos antes de que las temperaturas comenzaran a descender, registrándose además los menores contenidos de hojarasca durante el periodo invernal (0,46 Mg/ha

para bosque nativo, y 0,85 Mg/ha para plantaciones forestales). Cabe recalcar que esta tendencia está intrínsecamente relacionada al comportamiento estacional del bosque caducifolio que cubre gran parte del área de estudio, producto de una menor radiación solar (Zhang et al., 2014). Por otra parte, siguiendo con lo expuesto por los autores, se esperaría que los contenidos de biomasa superficial aumentaran en los periodos estivales, pudiendo así compensar el contenido de hojarasca poco abundante en los periodos de temperaturas más elevadas, sin embargo, no se cuenta con dichas cifras.

## **6.2 Variaciones en la dinámica del Carbono entre sitios con la misma cobertura**

A pesar de que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sitios bajo la misma cobertura en ninguno de los parámetros abordados en este estudio, es posible reconocer comportamientos que difieren parcialmente de la tendencia que siguen los pares de igual condición.

La variación más llamativa es la presentada por el sitio “NOBN1”, en la cuantificación del flujo de CO<sub>2</sub> desde el suelo (Capítulo 5.4), en el que se puede notar que su comportamiento difiere parcialmente de los sitios de su misma condición, y se asemeja en mayor medida a la tendencia seguida por los sitios de plantaciones.

Es posible que esta variación pueda ser atribuida a la mayor cercanía espacial de este sitio con el sector del Parque Nacional cuyo uso de suelo está catalogado como “Bosque Mixto”, que es precisamente en donde se encuentran ubicadas las parcelas de plantaciones forestales. De esta forma, este sitio podría catalogarse como una “zona transicional” entre el comportamiento de bosques nativos y plantaciones exóticas, que podría estar asociado a cantidad de microorganismos presentes en el suelo. Sin embargo, no se cuenta con la evidencia suficiente para aceptar o rechazar este supuesto.

Otra posibilidad que puede explicar el comportamiento de los análisis del sitio NOBN1 es que, al pertenecer a uno de los sitios de estudio originales dentro del Parque Nacional Nonguén, podría verse visto afectado por la actividad antrópica relacionada a estos proyectos de investigación. Por otra parte, Muñoz (2023) propone que la cercanía de este sitio con el “Sendero Los Canelos” del Parque Nacional, que recibe un número importante de visitantes al año, puede afectar directamente a las emisiones de CO<sub>2</sub> que libera el suelo.

### 6.3 Influencia en las características fisicoquímicas del suelo en los contenidos de $C_{total}$

Son numerosos los factores fisicoquímicos del suelo que pueden influir en el comportamiento del modelo conceptual del flujo de carbono ideado. Entre ellos destacan el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CEC) y contenido de cationes intercambiables, el carbono orgánico de los suelos, y la presencia y/o ausencia de ciertos nutrientes.

De acuerdo con el trabajo de Castillo et al. (In review), que estudiaron los sitios NOBN1 y NOPL1, se constató que en el suelo formado bajo plantaciones forestales presenta una disminución del pH de 0,9 a 0,5 unidades, con respecto al suelo formado bajo bosque nativo, especialmente en los horizontes más profundos ( $>174$  cm). Aunque esta variación en la acidificación no representa un cambio en la clase de acidez del suelo, es un indicador de los cambios producto de la instalación de las plantaciones forestales (Broquen et al., 2005). Por otro lado, es posible realizar comparaciones en la variación del pH entre los diferentes horizontes genéticos. Es notorio que se presenta un pH más ácido en el horizonte O-A para ambos tipos de cobertura, lo que concuerda con que este horizonte presenta los mayores contenidos de materia orgánica (MO). La acumulación de MO tiende a acidificar el suelo puesto que forma complejos solubles con cationes como el  $Ca^{+2}$ , facilitando la pérdida de estos cationes por lixiviación, y además es una fuente enriquecida de iones  $H^+$  (Weil & Brady, 2016).

En continuidad con lo anterior, Cifuentes-Croquevielle et al. (2020) propone que la disminución del pH del suelo producto de la introducción del género *Pinus*, puede estar relacionada a la redistribución de los cationes intercambiables disponibles en el suelo, y su reemplazo por iones  $H^+$ .

Sin embargo, si el pH aumenta, más grupos funcionales van a experimentar una disociación de iones  $H^+$ , dejando un número creciente de sitios cargados negativamente en las moléculas del suelo. Estas cargas negativas dependientes del pH son las que aumentarán la capacidad de intercambio catiónico (CEC) (Weil & Brady, 2016). Castillo et al. (In review) obtuvieron una mayor CEC para el sitio de bosque nativo, acompañado de un aumento notorio en profundidad de los cationes intercambiables  $Mg^{+2}$  y  $Na^+$ .

El  $C_{total}$  de los suelos mostró una tendencia a la baja en profundidad, para ambos usos de suelo, que se condice con el contenido de materia orgánica disponible en los diferentes horizontes genéticos en profundidad. Además, Castillo et al. (In review) destacan que el  $C_{total}$  para el sitio de bosque nativo siguió la tendencia en profundidad de la CEC. Además, estos autores reportan una

disminución de  $C_{total}$  al pasar de bosque nativo a plantaciones forestales que es asociada a un cambio mineralógico, a la vez que Jobbagy & Jackson (2000) indican que la textura del suelo, las precipitaciones, temperatura y el tipo de vegetación que conforma la cobertura, pueden influir en los contenidos y distribución del  $C_{total}$ , siendo la cobertura vegetal el factor más determinante en esta variación.

La disminución del contenido de carbono puede afectar además la retención de otros nutrientes esenciales del suelo, que contribuyen a la calidad de estos. De acuerdo con Li et al. (2012), los cambios en las reservas de carbono del suelo pueden estar correlacionados a los cambios en las reservas de nitrógeno. Esto concuerda con lo expuesto por Crovo et al. (2021), sin embargo, ellos proponen que esta variación se encuentra íntimamente relacionada con la mineralogía del suelo.

Por último, podrían considerarse las propiedades volumétricas y mecánicas del suelo, y su relación con las tasas de erosión. Ellies (1995) propone que los cambios en el uso de suelo alteran su estructura, disminuyendo la macroporosidad y aumentando la fina. Este cambio en la morfología de la porosidad es catalogado por este autor como un deterioro en la estructura del suelo. En concordancia, Aburto et al. (2021) estimaron que los suelos formados bajo plantaciones forestales tienen una erosión significativamente mayor que los formados bajo bosques nativos.

#### **6.4 Influencia de la mineralogía del suelo en el contenido de $C_{total}$**

Castillo et al. (In review), reportaron diferencias importantes en las fracciones arcillosas que conforman los suelos del área de estudio. Mientras que el suelo formado bajo bosque nativo (NOBN1) contiene principalmente vermiculita y HIV, junto con illita, caolinita, gibbsita, goethita y cuarzo en toda la extensión del perfil; en el suelo formado bajo plantación forestal la vermiculita, HIV y la gibbsita disminuyen paulatinamente hasta desaparecer. Además, se observó que la pérdida importante de arcillas está relacionada con la pérdida significativa de  $C_{total}$ .

Particularmente, la presencia de vermiculita y HIV en el sitio NOBN1 coincidió con la presencia abundante de cationes como el  $Mg^{+2}$ ,  $Na^{+}$  y  $Ca^{+2}$ . Sin embargo, la razón de la disminución y posterior desaparición de estas arcillas en el suelo formado sobre plantación forestal (NOPL1), puede deberse a la acción de varios factores tales como una mayor disolución de aluminio por acidificación, mayor migración de arcilla o mayor erosión; o bien puede deberse a la coexistencia de todos estos factores (Castillo et al., In review).

La gibbsita es otro de los componentes del suelo que mostró una pérdida importante como efecto del cambio en la cobertura. La gibbsita es el óxido de aluminio más común en los suelos, y un componente destacado en los suelos altamente meteorizados (Weil & Brandy, 2016). La desaparición de este componente con el cambio en el uso del suelo puede deberse a la disminución del pH bajo la neutralidad, como efecto secundario de la instalación de la especie *Pinus*, aumentando la solubilidad de la gibbsita, liberando  $Al^{+3}$ , que puede movilizarse a través del suelo (Mikutta et al., 2009).

Además de estos cambios mineralógicos, se observó una importante disminución en los contenidos de Al y Fe en asociaciones orgáno-metálicas, por lo que, sumado a la disminución de  $C_{total}$ , Castillo et al. (In review) proponen que minerales como vermiculita, HIV y gibbsita juegan un rol principal en la estabilización de carbono en estos suelos.

Por otra parte, Crovo et al. (2021) proponen que las propiedades del suelo, principalmente la mineralogía, es el factor que más controla la variación del contenido de carbono, junto con el de otros nutrientes esenciales como el fósforo y el nitrógeno.

### **6.5 Influencia en la actividad de los microorganismos en la emisión de CO<sub>2</sub>**

La liberación total de CO<sub>2</sub> a la atmósfera a partir de los suelos es la combinación de la respiración autótrofa, representada principalmente por las raíces y su microbiota asociada, y la respiración heterótrofa, que comprende a toda aquella emisión liberada por organismos y microorganismos que conforman la fauna del suelo, bacterias y hongos (Hanson et al., 2000). A pesar de que estos microorganismos representen bajos porcentajes del total de emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de los suelos, pueden desempeñar papeles importantes en la formación y función de estos, como la incorporación de residuos orgánicos de horizontes superficiales hasta horizontes más profundos (Weil & Brandy, 2016).

Cifuentes-Croquevielle et al. (2020) afirman que el reemplazo de bosques nativo, por masivas plantaciones monoespecíficas, tales como *Pinus radiata* y *Eucalyptus* trae consigo consecuencias ecológicas, como la pérdida de la riqueza de especies biológicas tanto en la superficie como bajo tierra, sobre todo de aquellas especies menos comunes, y que a menudo corresponden a las especies nativas.

De acuerdo con Liao y colaboradores (2010), se comprobó que tanto la biomasa asociada a raíces y la concentración microbiana de carbono en los suelos son significativamente menores en los suelos formados bajo plantaciones forestales, que aquellos formados bajo bosques nativos. Este hecho está íntimamente relacionado a que la cantidad de organismos del suelo es fuertemente influenciada por la cantidad y calidad de los nutrientes disponibles en el suelo, como lo son el carbono y el nitrógeno (Weil & Brandy, 2016).

Considerando entonces, que la actividad de los organismos heterótrofos del suelo es proporcional a la descomposición del  $C_{total}$  y que su posterior liberación a la atmósfera en forma de  $CO_2$  (Hanson et al., 2000) es mayor en suelos de alta biodiversidad, constituye un factor que puede justificar la mayor emisión anual de carbono mediante respiración del suelo, en suelos cubiertos por bosques nativos (17,92 Mg/ha al año), en comparación de aquellos cubiertos por plantaciones de pinos (13,81 Mg/ha al año), debido a la pérdida de biodiversidad. Esta disminución de la biodiversidad se encuentra directamente relacionada a la influencia antropogénica que han experimentado los sitios de plantaciones forestales dentro del área de estudio.

## **6.6 Efectos del reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales sobre el almacenamiento de Carbono**

Los cambios cualitativos asociados al reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales, tales como la sustitución de árboles típicos del Bosque Caducifolio de Concepción como el Peumo y el Lingue, por Pinos y Eucaliptos, están acompañados por variaciones cuantitativas en un sinnúmero de factores. En particular, el almacenamiento de carbono se ve fuertemente afectado, tanto en general, como en sus distintos reservorios.

La variación más significativa observada radica en el contenido de carbono que representa la biomasa de pie, es decir, vegetación arbórea registrada, en la que el bosque nativo cuadriplica el contenido registrado por las áreas cubiertas por plantaciones forestales (384,7 y 89,9 Mg/ha de carbono, respectivamente). Otro factor que se ve fuertemente afectado es la producción de raíces, que disminuye desde  $3,78 \pm 2,21$  Mg/ha, para bosque nativo, a  $1,56 \pm 0,76$  Mg/ha, para plantaciones exóticas. En cuanto al suelo como reservorio, el horizonte B se ve empobrecido en carbono como efecto del reemplazo de la cobertura (16,54 Mg/ha para bosque nativo y 8,82 Mg/ha para plantaciones forestales). Se registró, además, un aumento en el carbono disuelto en aguas de poro

(DOC), pasando de  $0,07 \pm 0,01$  Mg/ha para bosque nativo, a  $0,14 \pm 0,08$  Mg/ha para plantaciones, contribuyendo así al empobrecimiento del reservorio de los suelos con dicha cubierta.

Además, se registró un leve aumento en la producción de hojarasca asociado al cambio en la cobertura, pasando de  $2,38 \pm 0,35$  Mg/ha, para bosque nativo, a  $2,88 \pm 0,54$  Mg/ha, para plantaciones forestales, constituyendo un aumento en los ingresos de carbono en los suelos con esta última cubierta.

Finalmente, el efecto del reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales puede cuantificarse realizando el balance de ingresos y egresos de carbono, para medir el reservorio total del suelo en los sitios de estudio. De esta manera, se obtuvo que el reservorio de carbono para bosque nativo asciende a  $11,54 \pm 24,1$  Mg/ha, mientras que para plantaciones forestales se calculó un reservorio de  $7,63 \pm 26,5$  Mg/ha. Esto constituye una disminución de ~34% del contenido de carbono original que albergan los suelos bajo bosques nativos en el Parque Nacional Nonguén.

### **6.7 Recomendaciones para disminuir incertezas del modelo**

A pesar de que se buscó abordar la mayor cantidad de factores que pudieran influir en la entrada, salida y reservorio de carbono en los suelos, con el fin de generar un modelo conceptual que se acerque lo más posible a la dinámica real del bosque que cubre el Parque Nacional Nonguén, existen variables que no pudieron ser abordadas en el presente trabajo, como lo es la caracterización textural de los suelos.

La textura del material que conforma el suelo juega un rol fundamental en la capacidad de retención del carbono, puesto que el aumento en el contenido de tamaño arcilla y minerales no cristalinos, sobre todo en las capas más profundas de los suelos, contribuyen a estabilizar la liberación del carbono y protegen la materia orgánica, mientras que un mayor contenido en el material de tamaño arena puede ejercer el efecto contrario (Jobbagy & Jackson, 2000). Adicionalmente, Hassink (1997) propone que la estabilización de la materia orgánica también está asociada con minerales secundarios, como arcilla y óxidos amorfos, en particular óxidos de hierro, para formar complejos organominerales estables.

Por lo tanto, se recomienda la adición de esta información con el fin de estudiar con mayor profundidad cuales son los efectos locales dentro del perfil suelo que pueden permitir entender

mejor la relación entre la textura y la mineralogía de los suelos, y como esto se relaciona con los procesos de estabilización y capacidad de secuestro de carbono.



## 7. CONCLUSIONES

Los análisis y comparaciones de los múltiples factores revisados en este estudio demuestran algunos de los efectos de la creciente incidencia de la actividad antrópica en el planeta. En particular, se demostraron los efectos negativos que conllevan los cambios en los usos de suelo, al pasar de áreas naturales como lo son los bosques nativos, a áreas intervenidas por el ser humano, como resultan ser las plantaciones forestales.

A partir del estudio del reemplazo parcial del Bosque Caducifolio de Concepción, nativo en el Parque Nacional Nonguén, por plantaciones de *Pinus* sp., hace al menos 25 años, se comprobó que dicha sustitución generó una reducción significativa en el contenido de carbono que almacenan los suelos en el área de estudio, estimando un total de  $11,54 \pm 24,1$  Mg/ha para bosque nativo, a una cifra de  $7,63 \pm 26,5$  Mg/ha para plantaciones forestales.

Esta cuantificación de los efectos del reemplazo fue obtenida a partir de la medición tanto de los reservorios de carbono, representados por el suelo y la biomasa superficial; como de los aportes de carbono, representados por el crecimiento de raíces y la hojarasca que cae de los árboles; y por último de la medición de las emisiones de carbono, representadas por el escurrimiento de aguas de poro y el flujo de CO<sub>2</sub>, producto de la respiración. Se obtuvo que, a pesar de que ciertos aportes de carbono estuvieran más enriquecidos en plantaciones forestales que en el bosque nativo, por ejemplo, la hojarasca, el balance final muestra un empobrecimiento de la reserva del carbono del suelo como consecuencia del reemplazo.

Es crucial complementar este estudio con otros análisis, como las propiedades texturales y mineralógicas del suelo, para poder realizar un análisis más exhaustivo de sobre las consecuencias de la modificación de los usos de suelo, y así poder contribuir al estudio del cambio climático.

## 8. REFERENCIAS

- Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., & Rubilar, R. (2021). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degradation and Development*, 32(1), 453–466. <https://doi.org/10.1002/ldr.3700>
- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9(1), 7–19.
- Bernard, I. (2023). Caracterización hidroquímica e isotópica del estero Nonguén y su relación con los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica del Parque Nacional Nonguén (36°48'58"-36°56'13" S y 72°56'40"-73°01'42" W). Región del Biobío, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Börgel, J. (1983). Geomorfología y Geografía de Chile. Instituto Geografía Militar. 373 pp. Santiago.
- Brantley, S., White, T., White, A., Sparks, D., Richter, D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., April, R., Anderson, S., & Amundson, R. (2006). Frontiers in Exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF). University of Delaware.
- Brantley, S. L., Goldhaber, M. B., & Vala Ragnarsdottir, K. (2007). Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements*, 3(5), 307–314. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.5.307>
- Broquen, P., Candan, F., Falbo, G., Girardin, J. L., & Pellegrini, V. (2005). Impacto del Pinus ponderosa sobre la acidificación de los suelos de la transición bosque-estepa, SO del Neuquén, Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 26(3). <https://doi.org/10.4067/s0717-92002005000300007>
- Castillo, P., Aburto, F., Albornoz, M. F., Crovo, O., Czimkzik, C. I., & Southard, R. (In review). Natural Forest conversion to Exotic Pine plantations induces soil 2 mineralogical changes – Implications for soil organic carbon stabilization. *Available at SSRN 4590864*.
- Centeno, J. de D., & García, M. (2008). Balance hídrico de las superficies grabadas en rocas graníticas: un modelo geomorfológico e hidrogeológico con implicaciones ambientales. *Tecnología y Desarrollo*, 6, 1–22.
- Cifuentes-Croquevielle, C., Stanton, D. E., & Armesto, J. J. (2020). Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. *Scientific Reports*, 10(7762), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64453-y>
- CONAF. (2019). Plan de Manejo, Reserva Nacional Nonguén. Concepción, Chile.
- CONAF. (2021). Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile al año 2020. Departamento de Monitoreo de Ecosistemas Forestales. 76 pp.
- Contreras, A. (2022). Efectos de coberturas y usos de suelo en la meteorización a partir del estudio de elementos traza y  $\delta^{7}\text{Li}$  en sedimentos en suspensión y aguas en la Cuenca de Nonguén,

- Concepción, Región del Biobío. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Corder, G. W., & Foreman, D. I. (2011). Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach. *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach*. <https://doi.org/10.1002/9781118165881>
- Correa-Araneda, F., & Salazar N, C. S. N. (2014). Caracterización fisicoquímica del agua del estero Nonguén y su confluencia con el río Andalién, región del Biobío. Variación en relación a los distintos usos de suelo en su cuenca. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 2(2), 33–46. <https://doi.org/10.7770/safer-v2n2-art763>
- Creixell, C. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30'y 38°00'S. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Crisp, D., Dolman, H., Tanhua, T., McKinley, G. A., Hauck, J., Bastos, A., Sitch, S., Eggleston, S., & Aich, V. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle? *Reviews of Geophysics*, 60(2), 1–64. <https://doi.org/10.1029/2021RG000736>
- Crovo, O. (2020). Efecto del reemplazo de bosques secundarios por plantaciones forestales sobre variables biogeoquímicas y reservorios de carbono, nitrógeno y fósforo en suelos de mineralogía contrastante del centro-sur de Chile. [Tesis de Magíster]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Crovo, O., Aburto, F., Albornoz, M. F., & Southard, R. (2021). Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations. *Catena*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104997>
- Deckart, K., Hervé, F., Fanning, C. M., Ramírez, V., Calderón, M., & Godoy, E. (2014). U-Pb geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile. *Andean Geology*, 41(1), 49–82. <https://doi.org/10.5027/andgeoV41n1-a03>
- DGAC Chile. (2023). Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Informe final, año 2004. Cuenca del río Andalién. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. *Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2022). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en cuencas costeras e islas entre el río Itata y río Biobío. S.I.T. N° 510. 345 pp.
- Ellies Sch, A. (1995). Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque*, 16(2), 101–110.
- EULA. (2002). Estudio básico zonificación del fundo Nonguén. Concepción.

- Glodny, J., Echtler, H., Collao, S., Ardiles, M., Burón, P., & Figueroa, O. (2008). Differential Late Paleozoic active margin evolution in South-Central Chile (37°S-40°S) - the Lanalhue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 26(4), 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.06.001>
- Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T., & Andrews, J. A. (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48, 115–146.
- Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*, 191(1). <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
- Hauenstein, E., & Saavedra, M. (2014). Monitoreo a la gestión del Plan Nacional de Conservación del Pitao, *Pitavia punctata* Molina (Rutaceae), en Chile. *Gestión Ambiental*, 28, 9–23.
- Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>
- Heilmayr, R., Echeverría, C., & Lambin, E. F. (2020). Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nature Sustainability*, 3(9). <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0547-0>
- Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M. A., Brook, M., Pankhurst, R. J., Snelling, N. J., & Drake, R. (1988). Granitoids of the Coast Range of central Chile: Geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(2), 185–194. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(88\)90036-3](https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90036-3)
- Hervé, F., Calderón, M., Fanning, C. M., Pankhurst, R. J., & Godoy, E. (2013). Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. *Gondwana Research*, 23(3), 1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.06.016>
- Hillel, D., Rosenzweig, C., Powlson, D., Scow, K., Singer, M. & Sparks, D. (Eds.). (2004). *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press.
- Janzen, H. H. (2004). Carbon cycling in earth systems - A soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104(3), 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.040>
- Jaque Castillo, E. (2008). Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile. *Revista Geográfica*, 143, 97–116.
- Jenny, H. (1941). Factors of Soil Formation. *Soil Science*, 52(5). <https://doi.org/10.1097/00010694-194111000-00009>
- Jobbagy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423. <https://doi.org/10.2307/2641104>

- Josep G. Canadell. (2020). Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Lambin, E. F., & Geist, H. J. (Eds.). (2008). *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. Springer Science & Business Media.
- Lara, A., Solari, M. E., Prieto, M. del R., & Peña, M. P. (2012). Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35° - 43° 30' s). *Bosque*, 33(1), 13–23. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000100002>
- Li, D., Niu, S., & Luo, Y. (2012). Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: A meta-analysis. *New Phytologist*, 195(1), 172–181. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x>
- Liao, C., Luo, Y., Fang, C., & Li, B. (2010). Ecosystem Carbon Stock Influenced by Plantation Practice: Implications for Planting Forests as a Measure of Climate change mitigation. *PLoS ONE*, 5(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010867>
- Lucassen, F., Trumbull, R., Franz, G., Creixell, C., Vásquez, P., Romer, R. L., & Figueroa, O. (2004). Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: The Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 17(2), 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.04.002>
- Marthews, T., Riutta, T., Oliveras Menor, I., Urrutia, R., Moore, S., Metcalfe, D., Malhi, Y., Phillips, O., Huaraca Huasco, W., Ruiz Jaén, M., Girardin, C., Butt, N., & Cain, R. (2012). Measuring Tropical Forest Carbon Allocation and Cycling: A RAINFOR-GEM Field Manual for Intensive Census Plots (v3.0). *In Manual*.
- Martínez Retureta, R. (2021). Efectos del cambio de uso cobertura del suelo sobre la respuesta hidrológica en cuencas del centro sur de Chile bajo escenarios de cambio climático. [Tesis Doctoral]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Mikutta, R., Schaumann, G. E., Gildemeister, D., Bonneville, S., Kramer, M. G., Chorover, J., Chadwick, O. A., & Guggenberger, G. (2009). Biogeochemistry of mineral-organic associations across a long-term mineralogical soil gradient (0.3–4100 kyr), Hawaiian Islands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(7). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.12.028>
- Muñoz, C. (2023). Emisiones de CO2 en la respiración de suelos de bosques nativos y plantaciones forestales en el Parque Nacional Nonguén, Región del Biobío. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Paul, E. A., & Horwath, W. (2015). Chapter 12 – Carbon Cycling: The Dynamics and Formation of Organic Matter. In *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*.

- Quezada, J. (1996). Geología urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Ramírez, P. (2004). Estudio geológico ambiental de la cuenca del estero Nonguén. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Rehak, K., Strecker, M. R., & Echtler, H. P. (2008). Morphotectonic segmentation of an active forearc, 37°-41°S, Chile. *Geomorphology*, 94(1–2), 98–116. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.002>
- Rojas, G. (2010). Composición, estructura y regeneración en dos áreas en la Reserva Nacional Nonguén, Región del Biobío. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2001). Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile.
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., De Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X., & Current, D. (2012). Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5), 128A–136A. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.128A>
- Soil Survey Staff, 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual V4.0, (Burt, R. ed.) United States Department of Agriculture, Lincon, Nebraska.
- Song, X. P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560(7720), 639–643. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>
- Subke, J. A., Inglima, I., & Cotrufo, M. F. (2006). Trends and methodological impacts in soil CO<sub>2</sub> efflux partitioning: A metaanalytical review. In *Global Change Biology*, 12(6), 921–943. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01117.x>
- Voroney, R. P. (2006). The soil habitat. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry: Third Edition* (pp. 25–49). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-047514-1.50006-8>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). Nature and Properties of Soils, The 15th Edition. *Pearson Education*.
- Wulder, M. A., Coops, N. C., Roy, D. P., White, J. C., & Hermosilla, T. (2018). Land cover 2.0. In *International Journal of Remote Sensing*, 39(12), 4254–4284. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1452075>
- Zhang, H., Yuan, W., Dong, W., & Liu, S. (2014). Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.01.003>

## ANEXOS

**Anexo 1.** Distribución del contenido de carbono en los distintos horizontes genéticos para cada uno de los sitios, con los parámetros necesarios para su obtención. (D.A.: densidad aparente; Fg: fragmentos gruesos (> 2mm); HG: horizonte genético).

Sitio	Prof. (cm)		C <sub>t</sub> (%)	D.A. (g/cm <sup>3</sup> )	Espesor (cm)	Fg (%)	C <sub>reservorio</sub> (Mg/m <sup>2</sup> )	C <sub>reservorio</sub> (Mg/ha)	HG	C <sub>por Hz</sub> (Mg/ha)	C <sub>Total Sitio</sub> (Mg/ha)	X̄ <sub>p</sub> de C (Mg/ha)
	inicio	fin										
NOBN1	0	9	6,93	0,77	9	10	0,004	43,33	OA	101,54	254,00	42,61
NOBN1	9	33	2,19	1,20	24	8	0,006	58,21				
NOBN1	33	62	1,23	1,36	29	5	0,005	46,09	B	137,24		
NOBN1	62	81	1,12	1,43	19	25	0,002	22,90				
NOBN1	81	93	0,99	1,18	12	3	0,001	13,60				
NOBN1	93	154	0,84	1,63	61	35	0,005	54,64				
NOBN1	154	172	0,71	1,22	18	3	0,002	15,22	C	15,22		
NOBN2	0	9	7,24	0,97	9	2	0,006	61,92	OA	61,92	186,62	24,34
NOBN2	9	39	1,82	1,19	30	8	0,006	59,95	B	120,69		
NOBN2	39	61	0,91	1,33	22	15	0,002	22,63				
NOBN2	61	97	0,51	1,37	36	18	0,002	20,78				
NOBN2	97	121	0,28	1,53	24	10	0,001	9,31				
NOBN2	121	150	0,20	1,62	29	15	0,001	8,01	C	4,01		
NOBN2	150	170	0,12	1,69	20	5	0,000	4,01				
NOBN3	2	12	3,87	1,12	10	3	0,004	41,98	OA	98,22	156,63	16,19
NOBN3	12	23	2,55	1,06	11	7	0,003	27,79				
NOBN3	23	37	1,89	1,09	14	1	0,003	28,45	B	51,43		
NOBN3	37	64	0,74	1,31	27	6	0,002	24,64				
NOBN3	64	94	0,30	1,45	30	8	0,001	11,94				

NOBN3	94	125	0,21	1,47	31	15	0,001	7,97			
NOBN3	125	146	0,24	1,37	21	0	0,001	6,88			
NOBN3	146	165	0,25	1,44	19	0	0,001	6,97	C	6,97	
NOBN4	0	7	4,34	1,10	7	2	0,003	32,66			
NOBN4	7	19	2,09	1,27	12	0	0,003	31,86	OA	64,52	
NOBN4	19	31	0,98	1,27	12	2	0,001	14,68			
NOBN4	31	49	0,49	1,33	18	10	0,001	10,52			
NOBN4	49	85	0,23	1,60	36	5	0,001	12,75			
NOBN4	85	96	0,16	1,58	11	8	0,000	2,47	B	46,58	112,60
NOBN4	96	128	0,12	1,66	32	20	0,001	5,29			10,35
NOBN4	128	139	0,08	1,64	11	40	0,000	0,87			
NOBN4	139	162	0,07	1,49	23	40	0,000	1,50	C	1,50	
NOPL1	0	9	2,18	1,10	9	0	0,002	21,52			
NOPL1	9	19	1,37	1,26	10	1	0,002	17,10	OA	46,54	
NOPL1	19	29	0,53	1,50	10	0	0,001	7,91			
NOPL1	29	63	0,23	1,65	34	12	0,001	11,35			
NOPL1	63	90	0,17	1,68	27	2	0,001	7,55	B	24,79	80,58
NOPL1	90	120	0,13	1,57	30	3	0,001	5,89			9,85
NOPL1	120	168	0,11	1,70	48	0	0,001	9,25	C	9,25	
NOPL2	0	6	6,22	0,86	6	0	0,003	32,23			
NOPL2	6	36	1,60	1,33	30	2	0,006	62,82	OA	95,05	
NOPL2	36	62	0,96	1,17	26	5	0,003	27,67			
NOPL2	62	95	0,59	1,19	33	2	0,002	22,64			
NOPL2	95	132	0,58	1,31	37	35	0,002	18,23	B	74,98	176,96
NOPL2	132	147	0,33	1,49	15	13	0,001	6,44			26,10



NOPL2	147	172	0,22	1,39	25	8	0,001	6,94	C	6,94		
NOPL3	0	9	2,66	1,15	9	0	0,003	27,56	OA	61,55	162,79	16,78
NOPL3	9	24	2,12	1,19	15	10	0,003	33,99				
NOPL3	24	44	1,13	1,86	20	30	0,003	29,35	B	84,97		
NOPL3	44	66	0,57	1,72	22	25	0,002	16,14				
NOPL3	66	83	0,52	1,64	17	20	0,001	11,49				
NOPL3	83	94	0,41	1,56	11	30	0,000	4,97				
NOPL3	94	107	0,37	1,61	13	15	0,001	6,60				
NOPL3	107	125	0,39	1,70	18	20	0,001	9,63				
NOPL3	125	135	0,42	1,70	10	5	0,001	6,77				
NOPL3	135	157	0,46	1,59	22	0	0,002	16,27				
NOPL4	0	3	8,90	1,15	3	3	0,003	29,78	OA	93,57	150,51	15,82
NOPL4	3	9	2,47	1,15	6	5	0,002	16,17				
NOPL4	9	30	2,07	1,19	21	8	0,005	47,62				
NOPL4	30	55	0,92	1,79	25	18	0,003	33,76	B	52,86		
NOPL4	55	81	0,33	1,64	26	35	0,001	9,24				
NOPL4	81	99	0,20	1,56	18	35	0,000	3,71				
NOPL4	99	112	0,12	1,61	13	5	0,000	2,38				
NOPL4	112	143	0,12	1,7	31	40	0,000	3,78				
NOPL4	143	162	0,14	1,59	19	0	0,000	4,08				