

ARTÍCULOS

Carbono en el suelo y la biomasa aérea de bosques nativos patagónicos de la región de Aysén, Chile

Carbon stocks in soils and above-ground biomass in Patagonian native forest of the Aysen region, Chile

Yasna Rojas ^{a*} , Víctor Gerding ^b ,
Rodrigo Sagardía ^a , Eduardo Molina ^a 

*Autor de correspondencia: ^aInstituto Forestal (INFOR), Sede Los Ríos, Valdivia, Chile, tel.: +56 632335226, yrojas@infor.cl

^bUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Bosques y Sociedad, Valdivia, Chile.

RESUMEN

Las estimaciones de carbono del suelo específicas de un país posibilitan el mejoramiento de sus inventarios de gases de efecto invernadero. En Chile, especialmente en la Patagonia, existe poca información sobre acumulación de carbono en el suelo de los ecosistemas forestales nativos. Este trabajo estimó la acumulación de carbono orgánico en el suelo y en la biomasa aérea arbórea a partir de datos de INFOR de 72 bosques nativos de la región de Aysén, en función del tipo forestal y del tipo de suelo. El carbono orgánico en el suelo (0-30 cm) promedió $93,6 \text{ t ha}^{-1} \pm 34,1 \text{ t ha}^{-1}$ y fue independiente del tipo de suelo, pero estuvo influido por el tipo forestal, siendo menor el promedio en el tipo forestal lenga y mayor en el siempreverde; en coihue de Magallanes el promedio no se diferenció de los otros dos tipos forestales. En la biomasa aérea, el carbono acumulado promedió $119,2 \text{ t ha}^{-1} \pm 61,8 \text{ t ha}^{-1}$, sin efectos significativos del tipo de suelo ni del tipo forestal. El 55 % de los rodales presentó más carbono en la biomasa aérea que en el suelo. Las cantidades de carbono de la biomasa aérea y del suelo variaron en forma independiente entre ellas. El muestreo realizado hasta ahora es reducido, pero sus resultados destacan como un avance en la información de carbono del suelo y la biomasa aérea de bosques nativos en Aysén. Se requiere avanzar en la ampliación del muestreo con una mejor definición de la taxonomía del suelo.

Palabras claves: lenga, coihue de Magallanes, siempreverde, Andisol, Inceptisol.

SUMMARY

Country-specific soil carbon estimates improve the greenhouse gas inventories. In Chile, especially in Patagonia, information on soil carbon stocks in natural forest ecosystems is scarce. This study estimated soil organic carbon stocks and aboveground biomass of 72 natural forests in the Aysen region as a function of forest and soil type, based on data from INFOR. The organic carbon stocks in mineral soils (0-30 cm) averaged $93,6 \text{ t ha}^{-1} \pm 34,1 \text{ t ha}^{-1}$ and was independent of the soil type, however it was influenced by forest type, with the average being lower for the lenga forest type and higher in the siempreverde forest type; for coihue de Magallanes the average did not differ from the other two forest types. For the aboveground biomass, the carbon stock averaged $119,2 \text{ t ha}^{-1} \pm 61,8 \text{ t ha}^{-1}$ without significant effects from soil and forest types. 55 % of the stands showed more carbon in the aboveground biomass than in the soil. The carbon stocks in the soil and aboveground biomass varied independently. The sampling carried out so far is limited, but its results stand out as a progress for soil carbon and aboveground biomass information of Aysen native forests. Sampling expansion with a better definition of soil taxonomy is required.

Keywords: lenga, coihue de Magallanes, siempreverde, Andisol, Inceptisol.

INTRODUCCIÓN

En los acuerdos internacionales por el cambio climático, como la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y el Acuerdo de París, se establece que los países tienen que informar regularmente so-

bre su nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (United Nations 2015). En este contexto, es importante que los países cuenten con datos específicos de sus depósitos de carbono y factores de emisión que les permitan reportar de manera más precisa su nivel de emisiones y apoyar en la toma de decisiones en la formulación de es-

estrategias de mitigación y adaptación (FAO 2017). El establecimiento de valores de referencia de carbono del suelo específicos de un país es una posibilidad para el mejoramiento de los inventarios de gases de efecto invernadero (Bernoux *et al.* 2002). Con ello es posible entregar valores más precisos y representativos en el contexto de los acuerdos internacionales. En este escenario, el Instituto Forestal (INFOR) busca contribuir a establecer valores de referencia de carbono del suelo específicos para el país en bosques naturales (Rojas *et al.* 2020). Para ello se levantan datos en terreno anualmente en conjunto con el Inventario Forestal Nacional (INFOR 2023) y así desarrollar un muestreo más eficiente.

Existe poca información sobre ecosistemas forestales de la zona sur y austral en Chile, especialmente en Aysén, que den cuenta de su acumulación de carbono en el suelo. La literatura concerniente a las regiones político-administrativas de Los Ríos y Magallanes se basa en mediciones puntuales que entregan valores de carbono del suelo en bosques nativos de *Nothofagus pumilio* (Poepp *et* Endl.) Krasser (lenga), *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oerst. (coihue de Magallanes), *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (roble) y *Fitzroya cupressoides* (Molina) I. M. Johnston. (alerce) y en plantaciones forestales, principalmente de *Pinus radiata* D. Don (pino radiata) y *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws (pino ponderosa) (Gerding y Thiers 2002, Klein *et al.* 2008, Dube *et al.* 2012, Valdés 2012, Urrutia *et al.* 2015, Rojas *et al.* 2020, Perez-Quezada *et al.* 2021, González *et al.* 2022, Parra 2022). También deriva de combinaciones de mediciones puntuales con expansión en el territorio a través de modelación para casos de plantaciones, bosque nativo y otros usos del suelo (Olmedo *et al.* 2020, Pfeiffer *et al.* 2020, Cortés 2021, Perez-Quezada *et al.* 2023).

Para la región de Aysén, el reconocimiento de suelos y su respectiva cartografía cubre aproximadamente el 25 % de la superficie regional, abarcando suelos de los órdenes Andisol, Mollisol e Inceptisol, como también algunas asociaciones que pueden contener a los anteriores y a otros suelos no clasificados (CIREN 2005, 2019). En esta región también se presentan suelos del orden Histosol (Villaruel *et al.* 2021) y es de esperar que también se encuentren Entisoles y Spodosoles. Los suelos en la región pueden almacenar distintos niveles de carbono en función de su evolución pedogénica, con una tendencia natural de concentración decreciente hacia estratos más profundos, como se observó en la región de Los Ríos (Rojas *et al.* 2020). Por otra parte, la región de Aysén presenta 4,4 millones de hectáreas de bosques nativos identificados en cuatro tipos forestales (CONAF 2021), los cuales explican su distribución natural en función, primero, del clima y, segundo, por particularidades de la fertilidad del suelo, donde el régimen de aire es decisivo para permitir o limitar a las especies que conforman estos bosques (Donoso 1981). Así, estos tipos forestales se ubican en gradientes de humedad climática y edáfica crecientes en la siguiente

secuencia: lenga, coihue de Magallanes, siempreverde y ciprés de las Guaitecas. Entonces, se plantea la hipótesis que el carbono edáfico se explica tanto por el tipo de bosque como por el tipo de suelo, por sus relaciones con el clima y la fertilidad del suelo en esta zona patagónica. En consecuencia, los objetivos de este estudio son: i) estimar la acumulación de carbono orgánico en el suelo (0-30 cm) y en la biomasa aérea arbórea de bosques nativos de la región de Aysén; y ii) analizar la distribución y variabilidad de este carbono en el suelo y en la biomasa aérea en función del tipo forestal y del tipo de suelo.

MÉTODOS

Características de los bosques. La información de los bosques provino de las parcelas del Inventario Forestal Nacional de INFOR, que se levantaron en los años 2021 y 2022 (Sagardía *et al.* 2022), y de parcelas levantadas en 2020 y 2021 por la línea de investigación de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático de INFOR. La unidad de muestreo fue un conglomerado de tres parcelas circulares de 500 m² organizadas como parcelas de muestreo circular anidadas y concéntricas (INFOR 2023). De esta base de datos sólo fueron consideradas aquellas parcelas en las cuales también se obtuvo información del suelo.

Los 72 conglomerados del estudio en la región de Aysén (figura 1) están clasificados en los tipos forestales lenga, coihue de Magallanes y siempreverde (cuadro 1), sin representación del tipo forestal ciprés de las Guaitecas. Los bosques del tipo forestal lenga, en promedio, fueron los más densos y de menores diámetros. En coihue de Magallanes, el 53 % de las parcelas tenía DAP medio < 20,1 cm, con densidades entre 860 y 1905 árboles ha⁻¹, y solo 23 % de las parcelas presentaron árboles con DAP medio > 50 cm, con densidades menores a 190 árboles ha⁻¹. Los bosques del tipo forestal siempreverde tuvieron la mayor participación de árboles con DAP > 20 cm. Los tres tipos forestales presentaron, en promedio, similares volúmenes comerciales de madera (310 a 324 m³ ha⁻¹), pero con una alta variabilidad (51 – 53 % de coeficiente de variación). La variabilidad de los distintos atributos dasométricos de cada tipo forestal (cuadro 1) refleja que los respectivos bosques presentaron amplios rangos de estructuras.

Estimación de la cantidad de carbono del suelo. Se contó con muestras de 72 perfiles de suelo, uno por cada bosque inventariado, a los cuales se les determinó el contenido de carbono para las profundidades 0-15 cm y 15-30 cm (144 muestras en total). En el laboratorio, el carbono orgánico fue determinado mediante análisis por oxidación de la materia orgánica con una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico y medición colorimétrica (Sadzawka *et al.* 2006). La densidad aparente del suelo se determinó utilizando el método del cilindro de volumen conocido (MacDicken 1997). La cantidad de carbono por hectárea se calculó mediante la expresión [1]:

$$Qc = C \times DA \times E \times \left(1 - \frac{P}{100}\right) \quad [1]$$

Donde: Qc = cantidad de carbono (t ha⁻¹) del estrato de suelo; C = contenido de carbono orgánico del suelo (%); DA = densidad aparente del suelo (t m⁻³); E = espesor del estrato de suelo (cm); P = pedregosidad en el estrato de suelo (%).

La clasificación de los suelos se obtuvo de la cartografía y descripción de suelos de CIREN (2005, 2019) y,

como se aprecia en la figura 1, sólo una pequeña proporción de la región cuenta con información de la taxonomía del suelo. La identificación de los tipos forestales se realizó según la actualización del Catastro de Usos Vegetacionales de CONAF (2021).

Estimación de la cantidad de carbono de la biomasa aérea. De acuerdo con la información reportada por el Inventario Forestal Nacional (Sagardía *et al.* 2022), se evaluaron 72 conglomerados para estimar la biomasa aérea arbórea o

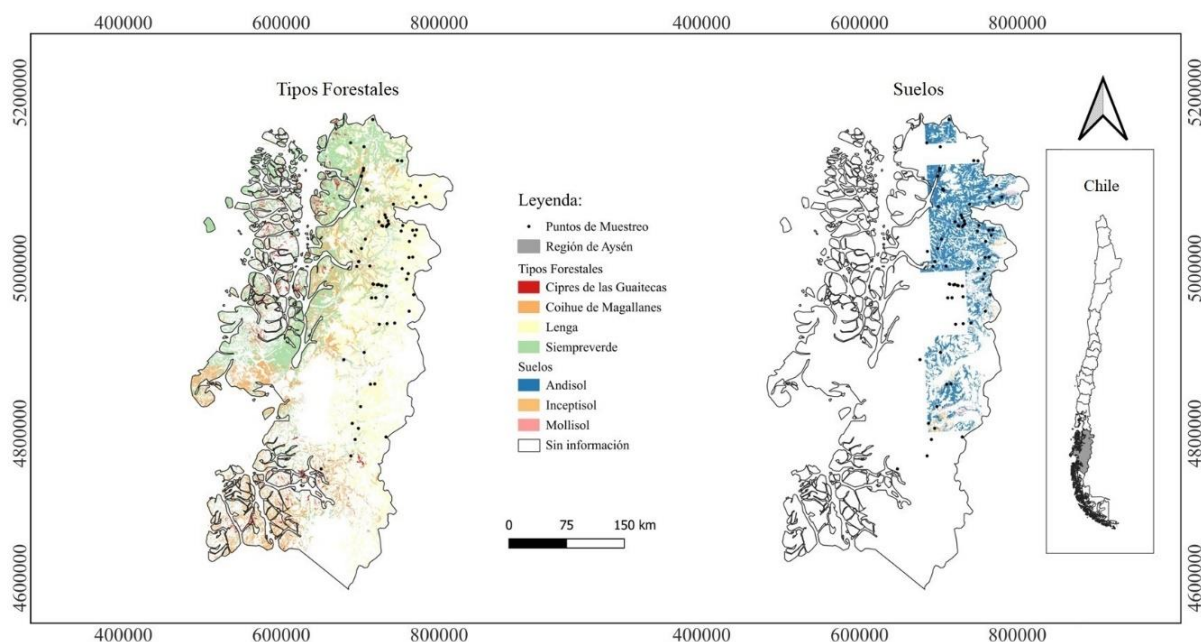


Figura 1. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo en relación con los bosques (INFOR 2023) y los suelos (CIREN 2019) en la región de Aysén.

Geographic location of the sampling spots related to the forests (INFOR 2023) and soils (CIREN 2019) in Aysen region.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los bosques por tipo forestal.

Descriptive statistics of forests for each forest type.

Tipo forestal (número de rodales)	Parámetro	DAP [DMC] (cm)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Densidad (n ha ⁻¹)	Volumen comercial (m ³ ha ⁻¹)
Lenga (25)	Media	21,0 [19,0]	36,4	1287	316
	Desviación estándar*	7,8 (37,3)	16,1 (44,2)	896 (70)	167 (53)
	Rango	12,3; 36,5	8,1; 72,3	263; 3035	37; 732
Coihue de Magallanes (13)	Media	27,9 [23,6]	40,7	928	324
	Desviación estándar*	17,4 (62,6)	18,6 (45,8)	584 (63)	165 (51)
	Rango	12,0; 65,1	10,5; 80,4	93; 1905	46; 713
Siempreverde (34)	Media	29,4 [28,1]	37,1	598	310
	Desviación estándar*	10,8 (36,7)	17,1 (46,0)	412 (69)	158 (51)
	Rango	13,9; 54,8	9,0; 95,5	80; 1893	93; 769

*En paréntesis: coeficiente de variación (%).

vuelo. Luego, la cantidad de carbono en dicha biomasa se estimó mediante la expresión [2]:

$$Bc = V \times BEF \times D \times Cf \quad [2]$$

Donde: Bc = carbono de la biomasa por especie ($t\ ha^{-1}$); V = volumen comercial ($m^3\ ha^{-1}$) por especie; BEF = factor de expansión a biomasa aérea [1,41 = tipo forestal lenga (Gayoso y CONAF 2013) y fue determinado considerando bosques de las regiones político-administrativas de Biobío, Los Ríos y Aysén, con una representación de un 33,7 % para la región de Aysén (30 árboles de un total de 89); 1,74 = tipos forestales siempreverde y coihue de Magallanes factor desarrollado para bosque siempreverde distribuido entre las regiones político-administrativas de Los Ríos y Los Lagos (Schlegel 2001)]; D = densidad de la madera [$0,5\ t\ m^{-3}$ (Ministerio del Medio Ambiente 2023)]; Cf = fracción de carbono de la biomasa [0,47 (IPCC 2006)].

Se calculó el cociente (Cv/s) entre la cantidad de carbono del vuelo ($t\ ha^{-1}$) y la cantidad de carbono del suelo 0-30 cm ($t\ ha^{-1}$) como indicador simplificado del índice de reserva de la vegetación; mientras menor sea su valor, mayor será la estabilidad del ecosistema con respecto al carbono (Gerding y Schlatter 1999).

Análisis estadístico. Comprendió estadísticas descriptivas, se realizó verificación de supuestos de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks y, dado que los datos no presentaron distribución normal, se aplicó análisis de varianza no paramétrica (Kruskal-Wallis) en comparación de medias con (nivel de significancia de 0,05), para identificar los efectos significativos del tipo forestal y del tipo de suelo sobre el carbono. Además, se realizó análisis de correlación no paramétrico (coeficiente de Spearman) para explorar las relaciones entre pares de variables y análisis de regresión lineal para especificar el efecto de una variable sobre otra. Estos análisis se realizaron con el *software* estadístico Infostat (Di Renzo *et al.* 2020).

RESULTADOS

Para el conjunto de bosques analizados en la región de Aysén, el porcentaje de carbono orgánico del suelo superficial (0-15 cm) tuvo un valor promedio \pm desviación estándar de $8,23\ \% \pm 5,99\ \%$ y en el estrato inferior (15-30 cm) fue de $5,71\ \% \pm 5,25\ \%$, con la natural tendencia decreciente en profundidad. En ambos estratos de suelo, los rangos de variación del contenido de carbono orgánico estuvieron entre 1 % y 30 %.

El carbono orgánico acumulado en el suelo del estrato de 0-30 cm (cuadro 2) alcanzó un promedio de $93,6\ t\ ha^{-1} \pm 34,1\ t\ ha^{-1}$, variando en un rango de $29,8\ t\ ha^{-1}$ a $196,5\ t\ ha^{-1}$. El estrato de suelo de 0-15 cm de profundidad, en promedio, acumuló el $59,2\ \% \pm 9,7\ \%$ del carbono del estrato 0-30 cm y resultó ser un buen estimador de la cantidad

de carbono del suelo en la profundidad 0-30 cm (figura 2A y 2B). La cantidad de carbono del suelo fue independiente del tipo de suelo ($P = 0,484$), pero estuvo influida por el tipo forestal ($P = 0,005$), siendo menor en el tipo forestal lenga que en los tipos forestales coihue de Magallanes y siempreverde; entre estos dos últimos no hubo diferencia significativa (cuadro 2).

En la biomasa aérea, el carbono acumulado (cuadro 2) mostró un promedio de $119,2\ t\ ha^{-1} \pm 61,8\ t\ ha^{-1}$, fluctuando entre $12,2\ t\ ha^{-1}$ y $311,9\ t\ ha^{-1}$, sin presentar efectos significativos del tipo forestal ($P = 0,398$) ni del tipo de suelo ($P = 0,229$).

La cantidad de carbono retenida en los bosques de Aysén, considerando la biomasa aérea y el suelo, alcanzó un promedio de $212,8\ t\ ha^{-1} \pm 73,4\ t\ ha^{-1}$, variando entre $76,8$ y $424,9\ t\ ha^{-1}$, sin diferencias significativas entre tipos forestales ($P = 0,061$) ni tipos de suelos ($P = 0,239$) (cuadro 2). Esta acumulación correlacionó positivamente más con la cantidad de carbono de la biomasa aérea ($r = 0,887$, $P < 0,001$) (figura 2C) que con la del suelo ($r = 0,546$, $P < 0,001$), coincidiendo con la importancia de la biomasa aérea en la variación del cociente Cv/s (figura 2D).

El cociente Cv/s (cuadro 2) alcanzó un promedio de $1,44 \pm 0,89$, con un rango entre 0,14 y 3,95, y tampoco presentó efectos significativos del tipo forestal ($P = 0,672$) ni del tipo de suelo ($P = 0,238$). En el 35 % de los rodales se obtuvo un Cv/s < 1 , es decir, se presentó más carbono en el suelo que en el vuelo; en el 10 %, el Cv/s estuvo torno a $1 \pm 0,1$, mostrando similares cantidades de carbono en el vuelo y en el suelo; en el 33 %, el Cv/s fluctuó sobre 1 y hasta un valor de 2, y en el 22 % superó el valor de 2. En la mayoría de los casos (55 %), el vuelo presentó más carbono acumulado que el suelo de 0-30 cm de profundidad. Como era de esperar, el cociente Cv/s fue directamente proporcional a la cantidad de carbono del vuelo e inversamente proporcional a la cantidad de carbono del suelo (figura 2D y 2E). La variación de la cantidad de carbono del vuelo fue independiente de la variación de la cantidad de carbono del suelo ($r = 0,095$; $P = 0,425$).

DISCUSIÓN

Las cantidades de carbono por hectárea acumuladas en el suelo de 0-30 cm bajo bosques nativos en Aysén (cuadro 2) son de similares magnitudes a las informadas por Pfeiffer *et al.* (2020) para la misma zona en cada tipo forestal: lenga $75,4\ t\ ha^{-1} \pm 34,5\ t\ ha^{-1}$, coihue de Magallanes $94,7\ t\ ha^{-1} \pm 34,9\ t\ ha^{-1}$ y siempreverde $107,4\ t\ ha^{-1} \pm 37,2\ t\ ha^{-1}$. También muestran valores comparables, en el mismo rango latitudinal, con las estimaciones de Doetterl *et al.* (2015) para suelos ubicados en Chile (32 a $67\ t\ ha^{-1}$ en 0-10 cm de suelo). Sin embargo, las estimaciones del IPCC (2019) informan cantidades mayores que las encontradas en el presente estudio (cuadro 2) en los suelos Andisoles ($136\ t\ ha^{-1} \pm 19\ t\ ha^{-1}$), aunque semejantes en los Inceptisoles ($81\ t\ ha^{-1} \pm 4\ t\ ha^{-1}$).

Cuadro 2. Carbono acumulado en todos los sitios y según tipo forestal y orden de suelo.

Carbon stocks in all sites, for each forest type and soil order.

Variable	Parámetro estadístico	Todos los sitios	Tipo forestal			Orden de suelo		
			Lenga	Coihue de Magallanes	Siempreverde	Andisol	Inceptisol	Orden no reconocido
	n	72	25	13	34	48	2	22
Carbono acumulado en el suelo de 0-30 cm (t ha ⁻¹)	Media*	93,6	78,5 ^a	97,4 ^{ab}	103,3 ^b	90,0	83,9	102,4
	D.E.	34,1	30,0	34,8	33,8	29,6	18,0	43,0
	CV %	36,5	38,2	35,7	32,7	32,9	21,5	42,0
	Mínimo	29,8	29,8	51,2	37,6	29,8	71,1	37,6
	Máximo	196,5	161,2	180,0	196,5	161,2	96,6	196,5
	Mediana	86,1	76,1	87,0	96,7	85,1	83,9	98,3
Carbono acumulado en la biomasa aérea (t ha ⁻¹)	Media	119,2	103,7	131,5	125,9	120,4	52,6	122,7
	D.E.	61,8	54,9	66,9	64,1	58,9	35,2	68,1
	CV %	51,8	52,9	50,8	50,9	48,9	66,8	55,5
	Mínimo	12,2	12,2	18,5	37,9	12,2	27,8	13,0
	Máximo	311,9	240,6	289,4	311,9	311,9	77,5	300,0
	Mediana	113,5	105,9	126,8	111,2	114,4	52,6	116,0
Carbono acumulado en la biomasa aérea y en el suelo (t ha ⁻¹)	Media	212,8	182,2	228,9	229,2	210,4	136,5	225,1
	D.E.	73,4	57,7	74,6	77,9	64,8	53,2	89,3
	CV %	34,5	31,6	32,6	34,0	30,8	39,0	39,7
	Mínimo	76,8	76,8	123,5	109,0	96,8	98,9	76,8
	Máximo	424,9	324,1	387,6	424,9	424,9	174,1	420,8
	Mediana	205,0	178,9	224,5	230,3	205,0	136,5	228,3
Cociente de carbono suelo/suelo (Cv/s)	Media	1,44	1,54	1,52	1,33	1,51	0,60	1,36
	D.E.	0,89	1,00	0,99	0,77	0,90	0,29	0,89
	CV %	61,8	64,7	64,8	58,1	59,4	48,8	65,0
	Mínimo	0,14	0,14	0,17	0,44	0,14	0,39	0,17
	Máximo	3,95	3,81	3,95	3,31	3,95	0,80	3,31
	Mediana	1,25	1,55	1,27	1,08	1,40	0,60	1,15

Letras distintas identifican medias diferentes entre tipos forestales: * $P = 0,005$.

La cantidad promedio de carbono por hectárea en el suelo (0-30 cm) de los bosques de la región de Aysén equivale al 66 % de la encontrada en los bosques de la región de Los Ríos (Rojas *et al.* 2020), proporción que se aprecia en cada orden de suelo. A escala regional, el almacenamiento de carbono en el suelo está principalmente determinado por el clima más que por las variaciones de la cubierta vegetal (Meersmans *et al.* 2016, Gonçalves *et al.* 2021). Esta tendencia de menor presencia de carbono en los suelos de la región austral se explica por la menor productividad general debido al clima más frío (Centro de Agricultura y Medioambiente 2017a,b) y los suelos menos desarrollados de Aysén (CIREN 2005) con respecto a Los Ríos.

En la región de Aysén, la cantidad de carbono del suelo presenta una tendencia asociada con los tipos forestales (cuadro 2), los cuales están determinados fundamentalmente por variaciones climáticas. Así, se observa una menor acumulación de carbono donde domina el tipo forestal lenga, de clima más seco en general, en comparación con los tipos forestales coihue de Magallanes y siempreverde, de climas más húmedos (Donoso y Donoso 2006, González *et al.* 2006). La acumulación de carbono en el suelo (0-30 cm) no presenta variación significativa con el tipo de suelo, por una parte, debido a la insuficiente identificación del orden taxonómico de los suelos abarcados, ya que el 30 % de los casos no contó con esta información, pudien-

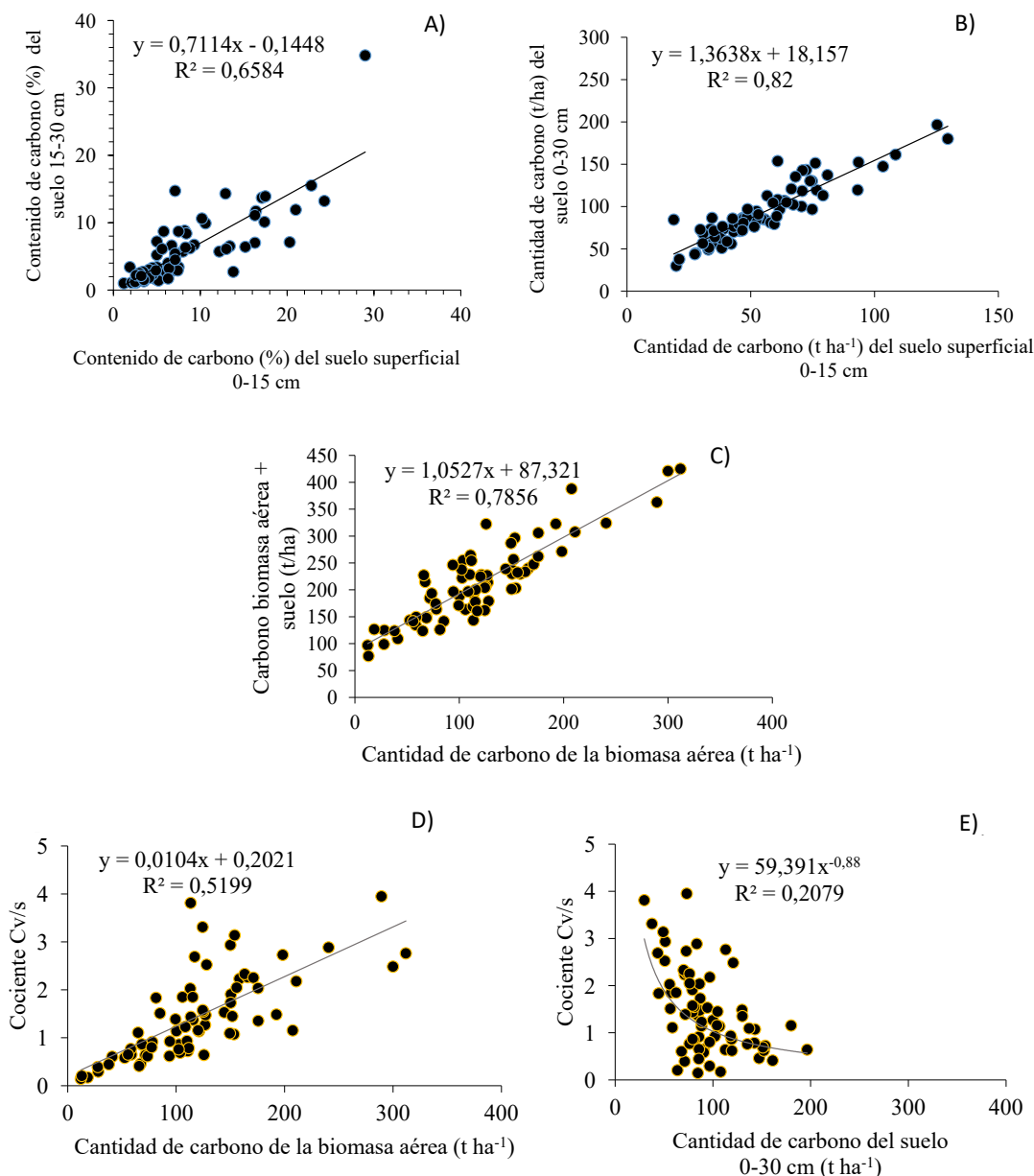


Figura 2. A) Contenido de carbono del suelo del estrato inferior (15-30 cm) en función del contenido de carbono del suelo del estrato superior (0-15 cm). B) Cantidad de carbono del suelo (0-30 cm) en función de la cantidad de carbono del suelo del estrato superior (0-15 cm). C) Cantidad de carbono de la biomasa aérea más el suelo en función de la cantidad de carbono de la biomasa aérea. D) Cociente de carbono suelo/suelo (Cv/s) en función de la cantidad de carbono de la biomasa aérea. E) Cociente Cv/s en función de la cantidad de carbono del suelo 0-30 cm.

A) Soil carbon content in the 15-30 cm depth as a function of the soil carbon content in the 0-15 cm depth. B) Soil carbon stocks in 0-30 cm depth as a function of soil carbon stocks in 0-15 cm depth. C) Carbon stocks in above-ground biomass plus soil as a function of carbon stocks in above-ground biomass. D) Above-ground biomass/soil (Cv/s) carbon proportion as a function of the above-ground biomass carbon stocks. E) Above-ground biomass/soil (Cv/s) carbon proportion as a function of the soil carbon stocks in 0-30 cm depth.

do haber una mezcla de órdenes taxonómicos que genere dispersión de los datos. Por otra parte, podría ser más importante la variación climática y de fertilidad del suelo que la de taxonomía edáfica. Hasta ahora la información taxonómica de suelos de CIREN (2005) se ha concentrado principalmente en áreas que no están bajo bosques (figu-

ra 1), privilegiando los usos agropecuarios de los suelos; esto representa una debilidad general de las bases de datos generadas por el Estado de Chile para informar sobre el carbono en los ecosistemas forestales. En todo caso, una ampliación del muestreo y mejor definición de la taxonomía del suelo podrían mejorar la capacidad de estimar

tanto el carbono del suelo como del vuelo. Especial efecto podrá tener la incorporación de Histosoles, por sus elevados contenidos de carbono, y del tipo forestal ciprés de Las Guaitecas, por su relativa baja productividad y presencia en suelos de alta acumulación de materia orgánica (Donoso 1981).

El carbono acumulado en la biomasa aérea es variable según la estructura y estado de desarrollo de cada rodal muestreado. En el presente estudio, se observó la variación de estos atributos forestales (cuadro 1), con coeficientes de variación cercanos al 50 % para el carbono acumulado en la biomasa aérea, con valores mínimos de 12,2 t ha⁻¹ y valores máximos de 311,9 t ha⁻¹. Una situación similar se aprecia en los datos publicados por Pfeiffer *et al.* (2020), Perez-Quezada *et al.* (2021, 2023) los cuales muestran amplia variación con magnitudes comparables a las de este estudio.

El cociente Cv/s muestra que, en promedio, la cantidad de carbono del vuelo acumula en torno a 1,4 veces la cantidad de carbono que se encuentra en el estrato de 0-30 cm de profundidad del suelo. En el 55 % de los rodales, la cantidad de carbono del vuelo supera a la del suelo, tornando más frágiles a estos ecosistemas de baja proporción de carbono edáfico (Gerding y Schlatter 1999). El carbono del vuelo presenta mayor riesgo de perderse del sitio por causas antrópicas, como la cosecha de madera e incendios forestales, mientras que el carbono del suelo es más estable en el largo plazo. Es decir, la estabilidad del ecosistema forestal aumenta cuando la cantidad de carbono acumulado en el suelo aumenta. En el presente estudio, no se observa una tendencia de este cociente con respecto al tipo de suelo ni al tipo forestal, posiblemente debido a la alta variabilidad de suelos y estructuras de los bosques como también a una muestra de rodales relativamente pequeña en ese contexto.

La cantidad de carbono por hectárea de los rodales (suelo + vuelo) es un buen estimador de la cantidad total de carbono que almacenan estos ecosistemas forestales, porque representan la mayor parte de ellos (Perez-Quezada *et al.* 2021). Como la tendencia de estos bosques de Aysén es a contener mayor cantidad de carbono en el vuelo que en el suelo (0-30 cm), la biomasa aérea representa mejor al total de carbono acumulado por hectárea en el ecosistema, lo que se refleja en una muy alta relación entre estas variables (figura 2C).

CONCLUSIONES

Las cantidades de carbono por hectárea acumuladas en el suelo bajo bosques nativos en Aysén son de similares magnitudes a las determinadas en otros estudios para la región, pero menores a las encontradas más al norte de Chile, en la región de Los Ríos.

La variación del carbono edáfico se explica por el tipo forestal, lo cual es consecuencia de su relación con el clima y la fertilidad del suelo. Sin embargo, la insuficiente

identificación taxonómica de los suelos abarcados en el estudio no permite relacionar la acumulación de carbono edáfico con el orden taxonómico del suelo.

La acumulación de carbono en la biomasa aérea de los bosques presenta variaciones independientes del tipo forestal y del tipo de suelo, pudiéndose explicar mediante la estructura de los bosques.

Si bien la muestra obtenida hasta ahora es reducida, los resultados presentados destacan como un avance en la información de carbono edáfico para la región de Aysén. No obstante, se requiere avanzar en la ampliación del muestreo con una mejor definición de la taxonomía del suelo, para contar con información que represente adecuadamente las distintas condiciones del país donde crecen los bosques.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

YR: diseñó el trabajo, contribuyó al análisis y síntesis de datos, presentación e interpretación de resultados y discusión. VG: contribuyó al análisis y síntesis de datos, presentación e interpretación de resultados y discusión. RS: contribuyó al procesamiento y cura de los datos de biomasa del bosque y preparación del manuscrito. EM: contribuyó al procesamiento de los datos de suelo y preparación del manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con fondos del Ministerio de Agricultura de Chile. Agradecimientos a los técnicos e investigadores de INFOR, Luis Barrales, Marco Barrientos y Rodrigo Guíñez por la toma de muestras en terreno y a Carlos Bahamondez y Marjorie Martin por la revisión de los datos y del manuscrito.

REFERENCIAS

- Bernoux M, MD Carvalho, B Volkoff, CC Cerri. 2002. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal* 66: 888-896. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.8880>
- Centro de Agricultura y Medioambiente. 2017a. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo V: Regiones de Los Ríos y Los Lagos. Santiago de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 128 p.
- Centro de Agricultura y Medioambiente. 2017b. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo VI: Regiones de Aysén y Magallanes. Santiago de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 132 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). 2005. Descripciones de suelos y materiales y símbolos. Estudio agrológico de la XI Región. Santiago de Chile. CIREN. 125 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). 2019. Estudio agrológico sobre ortoimágenes 1:20.000, Región de Aysén, año 2019. Cobertura cartográfica digital. Consultado 15 may. 2020. Disponible en: <https://ide.mina-gri.gob.cl>

- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). 2021. Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile al año 2020. Santiago de Chile. Departamento de Monitoreo de Ecosistemas Forestales CONAF. 76 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: https://sit.conaf.cl/variados/Catastros_Recur-sos_Vegetacionales_Nativos_de_Chile_Nov2021.pdf
- Cortés V. 2021. Acumulación de carbono en suelos de las regiones del Maule y de Los Ríos. Tesina ingeniería forestal. Valdivia. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 32 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2021/fifc828a/doc/fifc828a.pdf>
- Di Renzo JA, F Casanoves, MG Balzarini, L Gonzalez, M Tablada, CW Robledo. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- Doetterl S, A Stevens, J Six, R Merckx, K Van Oost, M Casanova Pinto, A Casanova-Katny, C Muñoz, M Boudin, E Zagal Venegas, P Boeckx. 2015. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate. *Nature Geoscience* 8(10): 780-783. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2516>
- Donoso C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Investigación y desarrollo forestal. Santiago. Corporación Nacional Forestal y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Documento de trabajo N° 38, FO: 003. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ak256s/ak256s.pdf>
- Donoso C, P Donoso. 2006. *Nothofagus betuloides* (Mirb) Oerst. Coigüe de Magallanes, Ouchpaya (onas), Guindo (zona Austral), Coigüe Colorado (Tierra del Fuego). In Donoso Zegers C ed. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia. Marisa Cuneo Ediciones. p. 411-422.
- Dube F, M Espinosa, N Stolpe, E Zagal, N Thevathasan, A Gordon. 2012. Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. *Agroforestry Systems* 86: 113–128. DOI <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9471-7>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. 90 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i6937es/i6937ES.pdf>
- Gayoso J, Corporación Nacional Forestal. 2013. Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser (Lenga). Santiago de Chile. CONAF. 39 p.
- Gerding V, JE Schlatter. 1999. Estabilidad nutritiva de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en cinco sitios característicos de la VIII Región. *Bosque* 20(2): 107–115. DOI: <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n2-10>
- Gerding V, O Thiers. 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 75: 819-833. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2002000400015>
- Gonçalves DRP, U Mishra, S Wills, S Gautam. 2021. Regional environmental controllers influence continental scale soil carbon stocks and future carbon dynamics. *Scientific Report* 11: 6474. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85992-y>
- González M, C Donoso, P Ovalle, G Martínez-Pastur. 2006. *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl) Krasser. Lenga, roble blanco, leñar, roble de Tierra del Fuego. In Donoso Zegers C ed. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia. Marisa Cuneo Ediciones. p. 486-500.
- González M, A Lara, R Urrutia-Jalabert, A Bustos-Salazar, C Ruiz-Gómez, JC Aravena. 2022. Carbon stocks across different environments, disturbance regimes, and stand age in *Fitzroya cupressoides* forests, the longest-lived species of the southern hemisphere. *Frontiers in Forests and Global Change* 5:960429. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.960429>
- INFOR (Instituto Forestal, CL). 2023. Inventario Forestal Nacional. Los recursos forestales en Chile. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <https://ifn.infor.cl/index.php>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, CH). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston H, L Buendia, K Miwa, T Ngara, K Tanabe eds. Japan. IGES. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 2: Generic methodologies applicable to multiple land use categories. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, CH). 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. E Calvo Buendia, K Tanabe, A Kranjc, J Baasansuren, M Fukuda, S Ngarize, A Osako, Y Pyrozhenko, P Shermanau, S Federici, eds. Switzerland. IPCC. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 2: Generic methodologies applicable to multiple land use categories. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Generic%20Methods.pdf
- Klein D, J Fuentes, A Schmidt, H Schmidt, A Schulte. 2008. Soil organic C as affected by silvicultural and exploitative interventions in *Nothofagus pumilio* forests of the Chilean Patagonia. *Forest Ecology and Management* 225: 3549-3555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.002>
- MacDicken K, 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA. Winrock International Institute for Agricultural Development, Forest Carbon Monitoring Program. 87 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB99143257.xhtml>
- Meersmans J, D Arrouays, A Van Rompaey, C Pagé, S De Baets, TA Quine. 2016. Future C loss in mid-latitude mineral soils: climate change exceeds land use mitigation potential in France. *Scientific Report* 6: 35798. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep35798>
- Ministerio del Medio Ambiente. 2023. Informe del Inventario Nacional de Chile 2022. Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2020. Santiago de Chile. División de Cambio Climático,

- Ministerio del Medio Ambiente. 594 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/04/2022_IIN_CL.pdf
- Olmedo G, M Guevara, H Gilabert, C Montes, E Arellano, B Barría-Knopf, F Gárate, P Mena-Quijada, E Acuña, H Bown, M Ryan. 2020. Baseline of Carbon Stocks in *Pinus radiata* and *Eucalyptus* spp. Plantations of Chile. *Forests* 11(10): 1063. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11101063>
- Parra C. 2022. Almacenamiento de carbono en renovales de *Nothofagus obliqua* en el centro-sur de Chile. Tesina ingeniería forestal. Valdivia. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile. 47 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2022/fifp258a/doc/fifp258a.pdf>
- Perez-Quezada JF, M Moncada, P Barrales, R Urrutia-Jalabert, M Pfeiffer, A Fariás, R Sagardía. 2023. How much carbon is stored in the terrestrial ecosystems of the Chilean Patagonia? *Austral Ecology* 00: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1111/aec.13331>
- Perez-Quezada JF, CA Pérez, CE Brito, JP Fuentes, A Gaxiola, D Aguilera-Riquelme, J Lopatin. 2021. Biotic and abiotic drivers of carbon, nitrogen and phosphorus stocks in a temperate rainforest. *Forest Ecology and Management* 494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119341>
- Pfeiffer M, J Padarian, R Osorio, N Bustamante, G Olmedo, M Guevara *et al.* 2020. CHLSOC: the Chilean soil organic carbon database, a multi-institutional collaborative effort. *Earth System Science Data* 12: 457–468. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-457-2020>
- Rojas Y, V Gerding, C Bahamondez, E Molina, R Sagardía. 2020. Contenido y cantidad de carbono del suelo en bosque nativo de la región de Los Ríos. Valdivia, Chile. Instituto Forestal. Informe Técnico N° 233. 21 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/30394>
- Sadzawka R.; MA Carrasco, R Grez, ML Mora, H Flores, A Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Santiago Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie actas INIA N° 34. 164 p. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/8541>
- Sagardía R, C Bahamondez, A Ávila, R Reyes, G Vergara. 2022. Los Recursos Forestales en Chile 2022. Inventario Forestal Nacional de Bosques Nativos y Actualización de Plantaciones Forestales. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 258. p. 193. Recuperado 14 de noviembre 2023. Disponible en <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/32626>
- Schlegel B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de carbono en ecosistemas forestales. 18 al 20 de octubre del 2001, Valdivia, Chile. 13 p. https://www.researchgate.net/publication/255632322_ESTIMACION_DE_LA_BIOMASA_Y_CARBONO_EN_BOSQUES_DEL_TIPO_FORESTAL_SIEMPREVERDE_1
- United Nations. 2015. Paris agreement. 27 p. Consultado 08 ene. 2024. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Urrutia-Jalabert R, Y Malhi, A Lara. 2015. The Oldest, Slowest Rainforests in the World? Massive biomass and slow carbon dynamics of Fitzroya cupressoides temperate forests in Southern Chile. *PLoS ONE* 10(9): e0137569. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137569>
- Valdés A. 2012 Estimación del contenido y balance de carbono en un bosque de *Nothofagus pumilio* y una turbera de *Sphagnum magellanicum* en tierra del Fuego, Chile. Seminario de Título de Biólogo mención Medio Ambiente. Santiago. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. 60 p. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192665>
- Villarroel D, JM Henríquez, E Domínguez, F Silva, MP Martínez, J Báez. 2021. Distribución geográfica de turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén. Cap. 1 p. 21 - 47. In Domínguez E, MP Martínez eds. Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de *Sphagnum* en la región de Aysén. Colección libros INIA No 41. Coyhaique. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 34. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/67739/NR42559.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Recibido: 08.01.2024

Aceptado: 27.02.2025

