

# Estimation and spatial analysis of aerial biomass and carbon capture in native forests in the south of Chile: county of Valdivia

## Estimación y análisis espacial de biomasa aérea y captura de carbono en bosques nativos al sur de Chile: comuna de Valdivia

Gastón Vergara-Díaz<sup>1\*</sup> & Miguel Á. Herrera-Machuca<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Instituto de Estadística. Los Laureles núm. 35. Valdivia, Chile.

<sup>2</sup>Universidad de Córdoba, Departamento de Ingeniería Forestal. Edificio Leonardo Da Vinci, Campus de Rabanales, Carretera Nacional IV, km 396. 14071. Córdoba, España.

\*Corresponding author: [gastonvergara@uach.cl](mailto:gastonvergara@uach.cl); tel.: +56 (63) 229 3549.

### Abstract

**Introduction:** Native forest reserves in southern Chile are the largest carbon sinks in the country, but the amount and level of grouping of the polygons that form these coverages is unknown.

**Objective:** To estimate aerial biomass (AB) and carbon content in native forests in the county of Valdivia, Los Rios region, as well as the degree of grouping of polygons containing carbon in aerial biomass.

**Materials and methods:** 21 land plots of 50 x 10 m were installed. Tree species were identified, and their diameter and height were measured. The AB was calculated using allometric equations, and the carbon content was calculated relating the AB to the factor 0.5. The degree of grouping of polygons with carbon content was calculated using the Getis-Ord G statistic.

**Results and discussion:** The total carbon content in AB was estimated at 599.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Carbon is concentrated in three forest types, Evergreen being the most important (63.3 %). The most abundant species was *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (18.34 %). There is a clustered spatial dependence on carbon-containing polygons in areas with forest reserves; the rest of the territory showed random distribution. Spatial dependence is related to the physiographic characteristics of the study area.

**Conclusions:** The use of allometric functions for the estimation of aerial biomass and factors to obtain the carbon content is a valid methodology. The carbon polygons of the native forests in Valdivia have grouped spatial distribution.

### Resumen

**Introducción:** Las reservas de bosques nativos al sur de Chile son los mayores sumideros de carbono del país, pero se desconoce la cantidad y el nivel de agrupamiento de los polígonos que forman estas coberturas.

**Objetivo:** Estimar la biomasa aérea (BA) y el contenido de carbono en bosques nativos en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, así como el grado de agrupamiento de los polígonos que contienen carbono en la biomasa aérea.

**Materiales y métodos:** Se instalaron 21 parcelas de 50 x 10 m. Se identificaron las especies de los árboles y se midió su diámetro y altura. La BA se calculó utilizando ecuaciones alométricas, y el contenido de carbono, relacionando la BA con el factor 0.5. El grado de agrupamiento de los polígonos con contenido de carbono se calculó aplicando el estadístico G de Getis-Ord.

**Resultados y discusión:** El contenido de carbono total en la BA se estimó en 599.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>. El carbono se concentra en tres tipos forestales, siendo Siempreverde el más importante (63.3 %). La especie más abundante fue *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (18.34 %). Existe dependencia espacial agrupada de los polígonos que contienen carbono en áreas con reservas forestales; el resto del territorio presentó distribución aleatoria. La dependencia espacial se relaciona con las características fisiográficas de la zona de estudio.

**Conclusiones:** El uso de funciones alométricas para la estimación de biomasa aérea y de factores para obtener el contenido de carbono es una metodología válida. Los polígonos de carbono de los bosques nativos de Valdivia tienen distribución espacial agrupada.

**Key words:** Forest fragmentation; Getis-Ord statistic; polygon grouping; Evergreen; *Nothofagus obliqua*.

**Palabras clave:** Fragmentación del bosque; estadístico Getis-Ord; agrupamiento de polígonos; Siempreverde; *Nothofagus obliqua*.

## Introduction

Significant concentrations of greenhouse gases in the atmosphere, including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), occur because of human activity. The increases have generated significant impacts on global climate change in recent decades (Grafton, Nelson, Lambie, & Wyrwoll, 2012; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014).

Forest ecosystems play a predominant role in the global carbon cycle, because they store large amounts in vegetation and soil and exchange this element with the atmosphere through photosynthesis, respiration, degradation, and decomposition. In this way, forest ecosystems contribute to the mitigation of the effects of climate change, through carbon sequestration in their biomass (IPCC, 2014).

Globally, in the period 1991-2015, forest land as a net source of CO<sub>2</sub> emissions averaged 1.52 Gg·year<sup>-1</sup>, corresponding to deforestation emissions of 4.04 Gg·year<sup>-1</sup>, offset by net forest removals of -2.52 Gg·year<sup>-1</sup> (Federici, Tubiello, Salvatore, Jacobs, & Schmidhuber, 2015; Food and Agriculture Organization [FAO], 2016). Over the same period, average global emissions of forest degradation were 0.80 Gg year<sup>-1</sup>; and net carbon emissions, due to deforestation, ranged from 4.68 Gg·year<sup>-1</sup> (1991-2000) to 3.95 Gg·year<sup>-1</sup> (2001-2010) and finally to 2.94 Gg·year<sup>-1</sup> (2011-2015) (FAO, 2016). According to Canadell and Raupach (2008), there are four main actions that would allow for the mitigation of carbon emissions from forests: increasing forest area through policies of afforestation or reforestation; increase in carbon stocks in existing forests; non-use of fossil fuels emitting CO<sub>2</sub>; and, finally, reducing emissions from deforestation and forest degradation.

In southern central Chile, for the period 1998-2003, native forests decreased by 44 % with a deforestation rate of 4.1 % per year. These were mainly replaced by bush coverages and plantations of exotic species (Altamirano & Lara, 2010). This decrease contracted over time; thus, the Los Ríos region reduced its native forests by 557 ha in the period 2006-2013, with a rate of change of -0.1 % (Corporación Nacional Forestal [CONAF], 2014).

The temperate forests in southern Chile have become one of the most important places for global biodiversity due to the endemism of the species it hosts, resulting in the only sample of this biome in South America. Other important factors that characterize them are related to their ecosystem services such as water production and quality,

## Introducción

Concentraciones importantes de gases de efecto invernadero en la atmósfera, incluidos el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), se producen a causa de la actividad humana. Los incrementos han generado repercusiones importantes para el cambio climático global en las últimas décadas (Grafton, Nelson, Lambie, & Wyrwoll, 2012; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014).

Los ecosistemas forestales cumplen un rol preponderante en el ciclo global del carbono, debido a que almacenan cantidades grandes en la vegetación y en el suelo e intercambian dicho elemento con la atmósfera, a través de la fotosíntesis, respiración, degradación y descomposición. De esta manera, los ecosistemas forestales contribuyen a la mitigación de los efectos del cambio climático, a través del secuestro de carbono en su biomasa (IPCC, 2014).

A nivel mundial, en el periodo 1991-2015, las tierras forestales como fuente neta de emisiones de CO<sub>2</sub> representaban en promedio 1.52 Gg·año<sup>-1</sup>, lo cual corresponde a las emisiones de la deforestación de 4.04 Gg·año<sup>-1</sup>, contrarrestadas por la absorción neta en el bosque de -2.52 Gg·año<sup>-1</sup> (Federici, Tubiello, Salvatore, Jacobs, & Schmidhuber, 2015; Food and Agriculture Organization [FAO], 2016). En el mismo periodo, las emisiones globales de degradación promedio de los bosques fueron de 0.80 Gg·año<sup>-1</sup>; y las emisiones netas de carbono, debido a la deforestación, variaron de 4.68 Gg·año<sup>-1</sup> (1991-2000) a 3.95 Gg·año<sup>-1</sup> (2001-2010) y, finalmente, a 2.94 Gg·año<sup>-1</sup> (2011-2015) (FAO, 2016). De acuerdo con Canadell y Raupach (2008), existen cuatro acciones principales que permitirían la mitigación de las emisiones de carbono de los bosques: aumento del área forestal a través de políticas de forestación o reforestación; aumento de las reservas de carbono en los bosques actuales; no uso de combustibles fósiles emisores de CO<sub>2</sub>; y, finalmente, reducción de las emisiones por deforestación y degradación de los bosques.

En el centro sur de Chile, para el periodo 1998-2003, los bosques nativos disminuyeron 44 % con una tasa de deforestación de 4.1 % anual. Estos fueron reemplazados principalmente por coberturas de matorral y plantaciones de especies exóticas (Altamirano & Lara, 2010). Dicha disminución se contrajo en el tiempo; es así, como la región de Los Ríos redujo sus bosques nativos en 557 ha en el periodo 2006-2013, con una tasa de cambio de -0.1 % (Corporación Nacional Forestal [CONAF], 2014).

Los bosques templados al sur de Chile se han transformado en uno de los lugares más importantes

temperature regulation, soil protection, oxygen production and CO<sub>2</sub> sinks (Smith-Ramirez, 2004).

In Chile, some studies have been developed to calculate the carbon content in native forests (Gayoso & Guerra, 2005; Moreno, Herrera, & Ferreira, 2011; Ordóñez & Mansera, 2001); however, they have focused on small areas and include only some native species and, in other cases, the purpose has been the construction of allometric functions. These investigations do not allude to the type of spatial distribution of C content in the plant cover. Knowing the spatial distribution maps of carbon content allows to develop a baseline that will serve for the implementation of future actions of mitigation, reduction of emissions from deforestation and forest degradation, sustainable management of forests, conservation and improvement of carbon reserves. According to the background and given the conditions in which native forests in southern Chile are found, the objective of this research was to estimate the aerial biomass and carbon content in native forests of the city of Valdivia, using allometric functions, and to determine the degree of grouping of polygons with carbon content, using spatial statistics techniques.

## Materials and methods

### Description of the study area

The study area corresponds to the county of Valdivia, region of Los Ríos (39° 48' 30" LS y 73° 14' 30" LO), at an average altitude of 14 m; the area of 102 100 ha represents 5.57 % of the region. The climate is temperate rainy with Mediterranean influence, with an average annual temperature between 9 and 10 °C. The average annual rainfall is 2 588 mm·year<sup>-1</sup>. The area is occupied mainly by land with native forest (33 949 ha), mixed forest (5 550 ha) and fast growing exotic plantations of pine and eucalyptus (27 230 ha), together reaching 65.36 % of the total area of the county and, finally, the urban and industrial areas constitute only 2.31 % of the total county (CONAF, 2014).

### Source of Cartographic Information

Data were obtained from a broader project that consisted of updating the land-use cover of the Los Ríos region in the period 2006-2013 (CONAF, 2014), and high-resolution images available on Google Earth were used. In the georeferencing, control points obtained from the vectorial covers from the cadastre and national land-use monitoring (CONAF, 2008) were used. The polygons with the classification of uses were digitized on the georeferenced images of the year 2013, assigning a unique identification number to each new polygon and, for the already assigned, the cover number of the previous period.

para la biodiversidad mundial, debido al endemismo de las especies que alberga, dando lugar a la única muestra de este bioma en Sudamérica. Otros factores importantes que los caracteriza tienen relación con sus servicios ecosistémicos como la producción y calidad del agua, regulación de la temperatura, protección del suelo, producción de oxígeno y sumideros de CO<sub>2</sub> (Smith-Ramírez, 2004).

En Chile se han desarrollado algunos estudios para calcular el contenido de carbono en bosques nativos (Gayoso & Guerra, 2005; Moreno, Herrera, & Ferreira, 2011; Ordóñez & Mansera, 2001); sin embargo, se han enfocado en áreas pequeñas y contemplan solo algunas especies nativas y, en otros casos, el propósito ha sido la construcción de funciones alométricas. Estas investigaciones no hacen alusión al tipo de distribución espacial del contenido de C existente en la cobertura vegetal. Conocer los mapas de distribución espacial del contenido de carbono permite desarrollar una línea base que servirá para la implementación de futuras acciones de mitigación, reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal, manejo sostenible de los bosques, conservación y mejoramiento en las reservas de carbono. Según los antecedentes y dadas las condiciones en que se encuentran los bosques nativos al sur de Chile, el objetivo de esta investigación fue estimar la biomasa aérea y contenido de carbono en bosques nativos de la ciudad de Valdivia, utilizando funciones alométricas, y determinar el grado de agrupación de los polígonos con contenido de carbono, utilizando técnicas de estadística espacial.

## Materiales y métodos

### Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la comuna de Valdivia, región de Los Ríos (39° 48' 30" LS y 73° 14' 30" LO), a una altitud promedio de 14 m; la superficie de 102 100 ha representa 5.57 % de la región. El clima es templado lluvioso con influencia mediterránea, con temperatura media anual entre 9 y 10 °C. Las precipitaciones medias anuales son de 2 588 mm·año<sup>-1</sup>. El área está ocupada principalmente por terrenos con bosque nativo (33 949 ha), bosque mixto (5 550 ha) y plantaciones exóticas de rápido crecimiento de pino y eucalipto (27 230 ha), alcanzando en conjunto 65.36 % de la superficie total de la comuna y, por último, las áreas urbanas e industriales constituyen solo 2.31 % del total comunal (CONAF, 2014).

### Fuente de información cartográfica

Los datos se obtuvieron de un proyecto más amplio que actualiza la cobertura del uso del suelo de toda la región de Los Ríos en el periodo 2006-2013 (CONAF, 2014), y se utilizaron imágenes de alta resolución

Land-use cover was classified using the methodology developed by the Center for Phytosociological and Ecological Studies L. Emberger (CEPE Montpellier, France), known as the Land Occupancy Chart. This chart was adapted (Etienne & Prado, 1982), validated and extended to 44 subcategories in the Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (Corporación Nacional Forestal [CONAF] & Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA], 1999). The main land uses were classified into (1) urban and industrial areas: sectors occupied by cities or industrial facilities; (2) agricultural land: areas used for agricultural production; (3) grasslands and shrublands: areas with formations of herbaceous, shrub, and shrub-herbaceous; (4) plantation forest: areas with artificial establishment of exotic species; (5) native forest: ecosystem in which the tree stratum is composed of native species that have a height of  $\geq 2$  m and tree crown cover of  $\geq 25$  %; (6) mixed forest: a mix of native forest (adult or second-growth) and planted exotic species; (7) wetlands: areas of marsh, swamps and peat bogs, surfaces covered by water in general, whether natural or artificial, permanent or temporary, stagnant or flowing, and fresh or brackish waters; (8) areas devoid of vegetation: sectors with vegetation cover less than 25 %; (9) snow/glaciers: areas covered by snow, eternal snow, glaciers and ice fields; and (10) water bodies: areas covered by the sea, rivers, lakes, ponds, and reservoirs. Forest types were classified based on the methodology used in the cadastre and assessment of native vegetation resources of Chile (CONAF, 2009; CONAF & CONAMA, 1999) (Table 1).

Cabinet's cartographic Information was validated through field visits prioritizing the sectors with the greatest pressure for change in land use, due to natural or anthropogenic causes. This allowed the ratification of the classification and, through a form, the detailed description of the composition of the polygons with land-use changes. At each polygon, the current use, causes of change and the presence of species at the level of trees and shrubs were recorded. The terrain information was validated and then joined to the graphical database through the unique polygon identifier, using the ArcMap 10.1 software (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012). Using map algebra, the 2006 land-use information coverage was intersected with the updated 2013 coverage and the coverage with the administrative boundaries of the region. Thus, an alphanumeric and graphical basis was obtained with the current land use in Los Ríos region. To perform the comparative analysis, two polygons were generated in shape file format, one for 2006 and one for 2013. In the study area there are only three forest types: (1) Oak-Rauli-Coihue, (2) Coihue-Rauli-Tepa and (3) Evergreen (CONAF, 2014), each with their respective subtypes and structures, giving rise to 18 forest classifications (Table 1; Figure 1).

disponibles en Google Earth. En la georreferenciación se usaron puntos de control obtenidos de las coberturas vectoriales provenientes del catastro y monitoreo nacional de uso de suelo (CONAF, 2008). Sobre las imágenes georreferenciadas del año 2013 se digitalizaron los polígonos con la clasificación de los usos, asignando un número de identificación a cada nuevo polígono y, para los ya existentes, el número de polígono de la cobertura del periodo anterior.

La cobertura de uso del suelo se clasificó con la metodología desarrollada por el Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos L. Emberger (CEPE de Montpellier, Francia), conocida como Carta de Ocupación de las Tierras. Esta fue adaptada (Etienne & Prado, 1982), validada y ampliada a 44 subcategorías en el Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (Corporación Nacional Forestal [CONAF] & Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA], 1999). Los principales usos de la tierra se clasificaron en (1) áreas urbanas e industriales: sectores ocupados por ciudades o instalaciones industriales; (2) terrenos agrícolas: zonas destinadas a la producción agropecuaria; (3) praderas y matorrales: zonas con formaciones herbáceas, arbustivas y arbustivas-herbáceas; (4) plantaciones forestales: zonas con establecimiento artificial de especies exóticas; (5) bosque nativo: ecosistema en el que el estrato arbóreo está constituido por especies nativas que presentan altura  $\geq 2$  m y cobertura de copas  $\geq 25$  %; (6) bosque mixto: mezcla de bosque nativo (adulto o renoval) y especies exóticas plantadas; (7) humedales: extensiones de marismas, pantanos y turberas, en general superficies cubiertas de agua, ya sean naturales o artificiales, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, y dulces o salobres; (8) áreas desprovistas de vegetación: sectores con cobertura de vegetación menor de 25 %; (9) nieves/glaciales: zonas cubiertas por nieve, nieves eternas, glaciales y campos de hielo; y (10) cuerpos de agua: zonas cubiertas por el mar, ríos, lagos, lagunas y embalses. Los tipos forestales se clasificaron con base en la metodología utilizada en el catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile (CONAF, 2009; CONAF & CONAMA, 1999) (Cuadro 1).

La información cartográfica de gabinete se validó mediante visitas a terreno priorizando los sectores con mayor presión de cambio en el uso del suelo, por causas naturales o antrópicas. Lo anterior permitió la ratificación de la clasificación y, a través de un formulario, la descripción detallada de la composición de los polígonos con cambios de uso del suelo. A cada polígono se registró el uso actual, causales de cambio y la presencia de especies a nivel de árboles y arbustos. La información del terreno se validó y después se unió a la base de datos gráfica, a través del identificador único del polígono, utilizando el *software* ArcMap 10.1 (Environmental Systems Research Institute



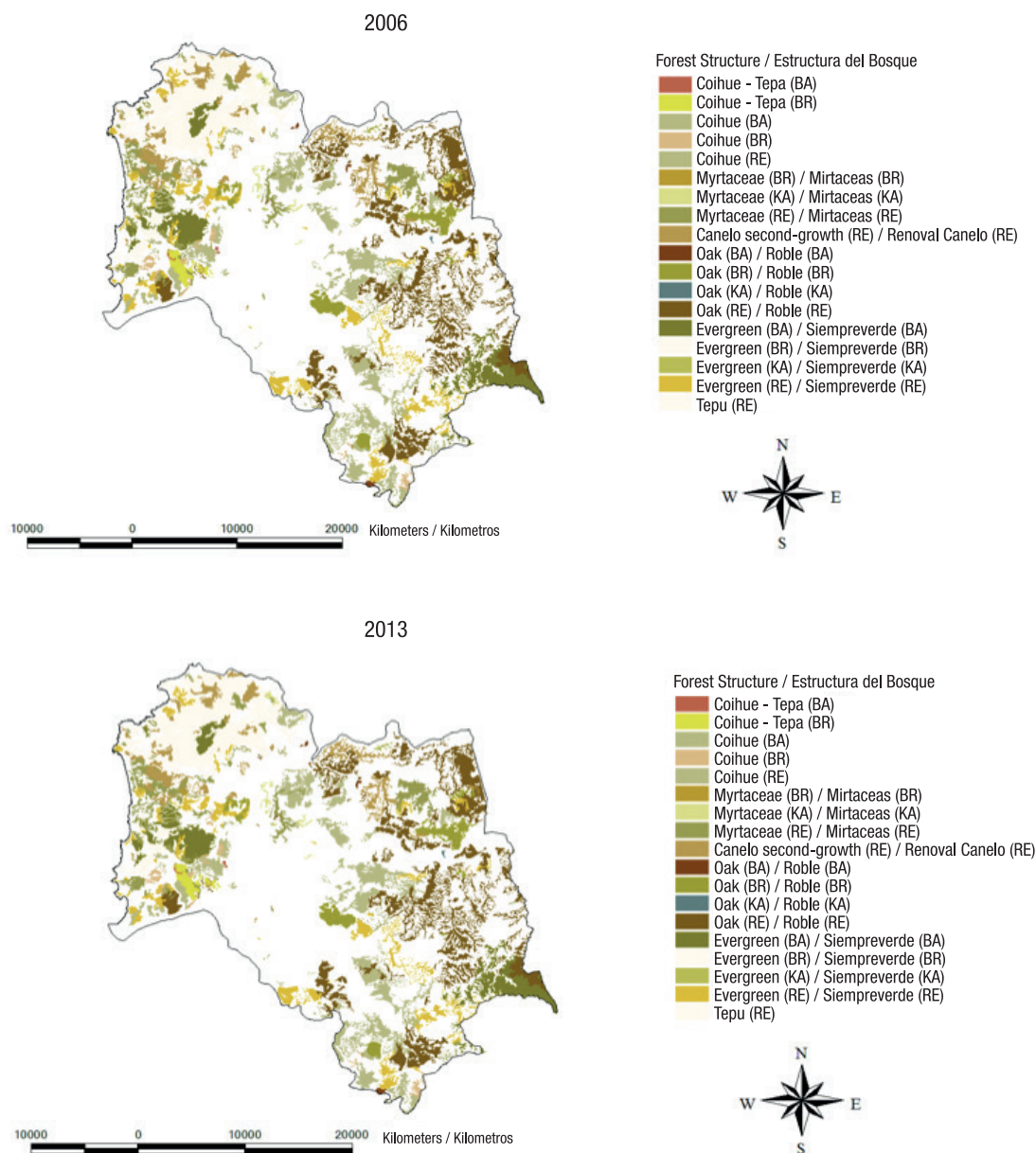
**Table 1. Presence of species and forest structure to determine forest type and subtype in native forests in the county of Valdivia, Los Rios region, Chile.**

**Cuadro 1. Presencia de especies y estructura del bosque para determinar tipo y subtipo forestal en bosques nativos en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.**

Forest type/ Tipo forestal	Forest subtype/ Subtipo forestal	Presence of species /Presencia de especies	Forest structure/ Estructura del bosque
Roble - Rauli - Coihue	Coihue	<i>Nothofagus dombeyi</i> (Mirb.) Oerst. and <i>Nothofagus alpina</i> (Poepp. & Endl.) Oerst.	RE
	Oak/Roble	<i>Nothofagus obliqua</i> (Mirb.) Oerst.	BA, BR, KA and RE/ BA, BR, KA and RE
Coihue - Rauli - Tepa	Coihue	<i>N. dombeyi</i> and <i>N. obliqua</i>	BA, BR and KA
	Coihue - Tepa	<i>N. dombeyi</i> and <i>Laurelia philippiana</i> Looser	BA, BR, KA and RE/ BA, BR, KA and RE
Evergreen/ Siempreverde	Second-growth Canelo/ Renoval Canelo	<i>Drimys winteri</i> J. R. Forst. & G. Forst.	RE
	Tepu	<i>Tepualia stipularis</i> (Hook. & Arn.) Griseb.	BA, BR, KA and RE/ BA, BR, KA and RE
	Myrtaceae/Mirtaceas	<i>Myrceugenia exsucca</i> (DC.) O. Berg; <i>Myrceugenia planipes</i> (Hook. & Arn.) O. Berg; <i>Luma apiculata</i> (DC.) Burret; <i>Amomyrtus luma</i> (Molina) D. Legrand & Kausel; <i>Amomyrtus meli</i> (Phil.) D. Legrand & Kausel; <i>Blepharocalyx cruckshanks</i> (Hook. & Arn.) Nied.; <i>Caldcluvia paniculata</i> (Cav.) D. Don	BA, BR, KA and RE/ BA, BR, KA and RE
	Evergreen/ Siempreverde	<i>Eucryphia cordifolia</i> Cav.; <i>Laurelia sempervirens</i> (Ruiz & Pav.) Tul.; <i>Weinmannia trichosperma</i> Cav.; <i>Saxegothaea conspicua</i> Lindl.; <i>Podocarpus nubigena</i> Lindl.; <i>Aextoxicon punctatum</i> Ruiz & Pav.; <i>L. philippiana</i> , <i>D. winteri</i> , <i>Lomatia hirsuta</i> (Lam.) Diels; <i>Gevuina avellana</i> Molina; <i>Persea lingue</i> (Ruiz & Pav.) Nees; <i>Embothrium coccineum</i> J. R. Forst. & G. Forst.	BA, BR, KA and RE/ BA, BR, KA and RE

RE = forest of second-growth structure; BA = forest of adult structure; BR = forest of adult-second-growth structure; KA = forest of stunted structure.

RE = bosque de estructura renoval; BA = bosque de estructura adulto; BR = bosque de estructura adulto-renoval; KA = bosque de estructura achaparrado.



**Figure 1. Spatial distribution of forest structures in 2006 and 2013 in the county of Valdivia, Los Rios region, Chile.**

**Figura 1. Distribución espacial de las estructuras de bosque en los años 2006 y 2013 en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.**

### Fieldwork on plots

A stratified biphasic sampling was designed from a larger project called the National biomass and Forest Carbon Monitoring System. The first phase consisted of a network of points of 1 x 1 km on the surface of native forests from the regions of Coquimbo to Magellan and the Chilean Antarctic (Sandoval & Vergara, 2014). The second phase consisted of a subsample where permanent plots were established (McRoberts, Tomppo, & Czaplewski, 1992; Moscovich & Brena, 2006). In the region of Los Rios, 327 plots of 50 x 10 m, and 21

[ESRI], 2012). Haciendo uso del álgebra de mapas, las coberturas con información del uso del suelo del 2006 se cruzaron con la cobertura actualizada del 2013 y la cobertura con los límites administrativos de la región. De esta forma, se obtuvo una base alfanumérica y gráfica con el uso actual del suelo en la región de Los Ríos. Para realizar el análisis comparativo se generaron dos coberturas de polígonos en formato *shape file*, una para el 2006 y otra para el 2013. En el área de estudio se encuentran solo tres tipos forestales: (1) Roble-Raulí-Coihue, (2) Coihue-Raulí-Tepa y (3) Siempreverde (CONAF, 2014), cada uno con sus respectivos subtipos

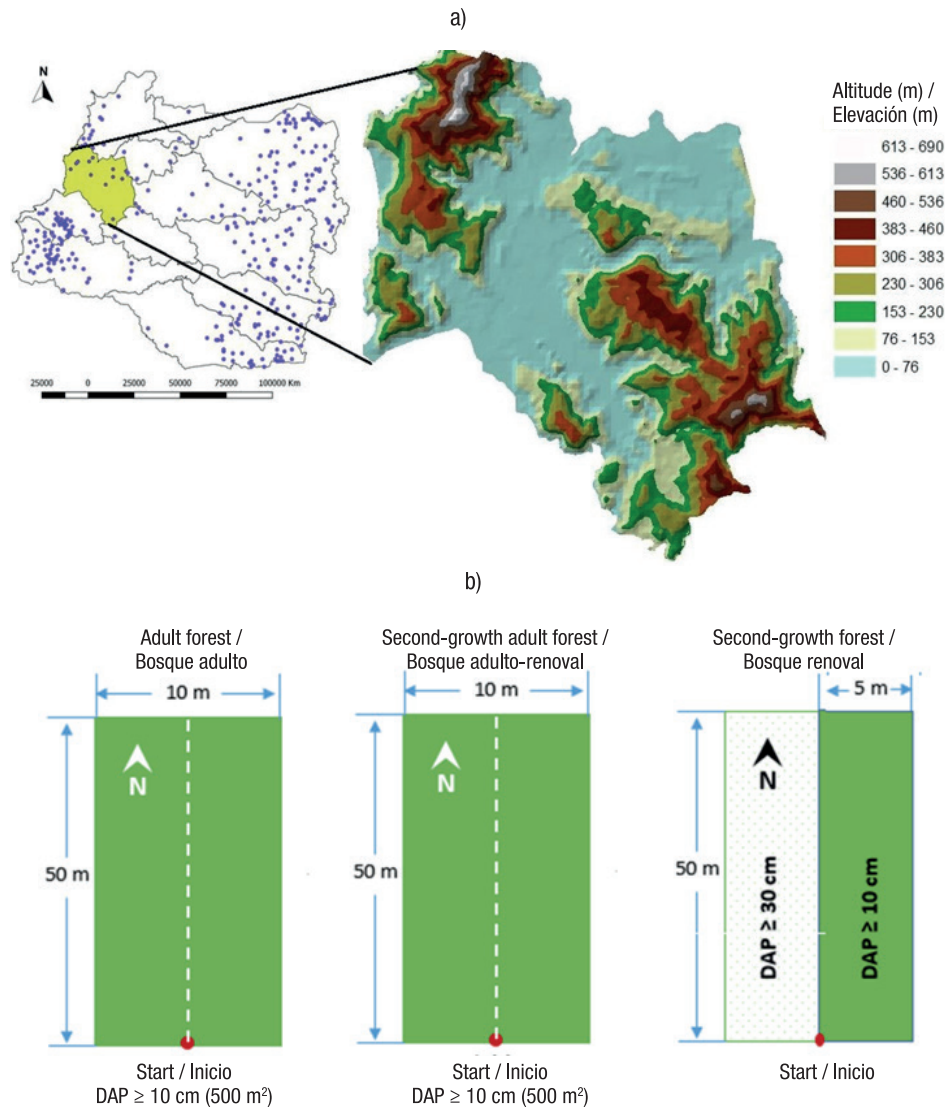
plots for the county under study were established, distributed in all forest structures: adult, adult-second-growth and second-growth (Figure 2).

In the plots of 500 m<sup>2</sup>, corresponding to the structures of adult forest and adult forest-second-growth, all living or dead trees with diameter at chest height (DAP; 1.3 m)  $\geq$  10 cm were measured. In the renewal forest structure, trees with DAP  $\geq$  10 cm were measured on the right side of the plot, while on the left side, trees with DAP  $\geq$  30 cm were measured (Figure 2).

y estructuras, originando 18 clasificaciones de bosques (Cuadro 1; Figura 1).

### Trabajo de campo en las parcelas

A partir de un proyecto más amplio, denominado Sistema de Monitoreo Nacional de Biomasa y Carbono Forestal, se diseñó un muestreo del tipo bifásico estratificado. La primera fase consistió en una red de puntos de 1 x 1 km sobre la superficie de bosques nativos desde las regiones de Coquimbo hasta Magallanes y la Antártica Chilena (Sandoval & Vergara, 2014). La segunda fase consistió



**Figure 2. a) Distribution of plots in the study area Los Ríos region and b) size of plots and measurement form according to forest structure.**

**Figura 2. a) Distribución de parcelas en el área de estudio región de Los Ríos y b) tamaño de parcelas y forma de medición según la estructura del bosque.**

The species of living trees was recorded and, where possible, dead trees were also identified. The DAP was measured with a diametric pitch and the total height of living trees was measured with a hypsometer on a minimum subsample of 10 trees per plot. The selected trees had to present quality of straightness and absence of bifurcations, distributed in the diametric classes, and including at least three trees per species.

### Aerial biomass and carbon database

For the calculations of aerial biomass (BA) per individual, allometric equations described by Milla, Emanuelli, Sartori, and Emanuelli (2013) were used (Table 2). Subsequently, the sum of all individuals per sampling unit (UM) was expanded to one hectare ( $\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). The final result was divided by 1000 to obtain the BA in  $\text{Mg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ . The carbon content was obtained by multiplying the BA content by 0.5 ( $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), as established by the IPCC (2014). A summary file was created in DBF format with the attributes of forest type, forest structure, biomass and carbon. These data were transferred to the polygons of the shape file databases for the years 2006 and 2013. To transfer the biomass and carbon data, a program was built in Visual-Fox language, which contained in its algorithm the weighting of the surface.

### Spatial analysis

Using the GeoDa software (Anselin, Syabri, & Kho, 2006), the G statistic (Ord & Getis, 1992) was calculated on the coverage of both periods. This is done in order to determine whether the units composed of carbon polygons in native forest are grouped into high or low carbon values and thus generate the maps of clusters or conglomerates by periods (Ord & Getis, 1995). Statistic G is determined as follows:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall i \neq j$$

where,

$n$  = number of cases

$x_i$  = value of the variable at a given location

$x_j$  = value of the variable in another location ( $i \neq j$ )

$w_{ij}(d)$  = weight applied to the comparison between the distance of locations  $i$  and  $j$ , determined by  $d$ .

The value of  $w_{ij}(d)$  is equal to 1 if location  $j$  is within the location distance, measured from point  $i$  and  $w_{ij}(d)$  is equal to zero if the above assumption is not met. The array of spatial weights  $\{w_{ij}(d)\}$  has a diagonal with a value of zero and the elements outside of this value zero or one, depending on whether they are within or outside the distance  $d$ .

en una submuestra donde se establecieron las parcelas permanentes (McRoberts, Tomppo, & Czaplowski, 1992; Moscovich & Brena, 2006). En la región de Los Ríos se establecieron 327 parcelas de 50 x 10 m, y 21 parcelas para la comuna en estudio, distribuidas en todas las estructuras de bosques: adulto, adulto-renoval y renoval (Figura 2).

En las parcelas de 500  $\text{m}^2$ , correspondientes a las estructuras de bosque adulto y bosque adulto-renoval, se midieron todos los árboles vivos o muertos con diámetro a la altura de pecho (DAP; 1.3 m)  $\geq 10$  cm. En la estructura de bosque renoval, se midieron los árboles con DAP  $\geq 10$  cm al lado derecho de la parcela, mientras que, al lado izquierdo, se midieron los árboles con DAP  $\geq 30$  cm (Figura 2).

La especie de los árboles vivos se registró y, cuando fue posible, los árboles muertos también se identificaron. El DAP se midió con una cinta diamétrica y la altura total de los árboles vivos se midió con hipsómetro en una submuestra mínima de 10 árboles por parcela. Los árboles seleccionados debían presentar calidad de rectitud y ausencia de bifurcaciones, distribuyéndose en las clases diamétricas e incluyendo mínimo tres árboles por especie.

### Base de datos para la biomasa aérea y carbono

Para los cálculos de biomasa aérea (BA) por individuo, se utilizaron ecuaciones alométricas descritas por Milla, Emanuelli, Sartori, y Emanuelli (2013) (Cuadro 2). Posteriormente, la sumatoria de todos los individuos por unidad de muestreo (UM) se expandió a una hectárea ( $\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). El resultado final se dividió entre 1000 para obtener la BA en  $\text{Mg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ . El contenido de carbono se obtuvo multiplicando el contenido de BA por 0.5 ( $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), como lo establece el IPCC (2014). Se creó un archivo resumen en formato DBF con los atributos de tipo forestal, estructura del bosque, biomasa y carbono. Estos datos se transfirieron a los polígonos de las bases de datos relacionadas con los *shape file* de los años 2006 y 2013. Para transferir los datos de biomasa y carbono se construyó un programa en lenguaje Visual-Fox, el cual contenía en su algoritmo la ponderación de la superficie.

### Análisis espacial

Mediante el *software* GeoDa (Anselin, Syabri, & Kho, 2006) se calculó el estadístico G (Ord & Getis, 1992) sobre las coberturas de ambos periodos. Lo anterior con el fin de determinar si las unidades compuestas por polígonos de carbono en bosque nativo están agrupadas en valores de carbono altos o bajos y así generar los mapas de *clusters* o conglomerados por periodos (Ord & Getis, 1995). El estadístico G está determinado de la manera siguiente:



**Table 2. Allometric equations to calculate the total aerial biomass in species of the native forest of the county of Valdivia.****Cuadro 2. Ecuaciones alométricas para calcular la biomasa aérea total en especies del bosque nativo de la comuna de Valdivia.**

Source/Fuente	Native species/Especie nativa	Allometric equation/Ecuación alométrica
Gayoso, Guerra, and Alarcon (2002)	<i>Amomyrtus luma</i>	$BA = -6.14565 + EXP (1.92947 + 0.13732 * DAP + 0.04875 * HT)$
	<i>Drimys winteri</i>	$BA = -5.73651 + EXP (3.25257 + 0.07943 * DAP)$
	<i>Eucryphia cordifolia</i>	$BA = EXP [-1.45875 + 2.23536 * LN(DAP)]$
	<i>Gevuina avellana</i>	$BA = EXP [-1.84774 + 2.23221 * LN(DAP)]$
	<i>Laurelia philippiana</i>	$BA = EXP [-0.88067 + 2.00017 * LN(DAP)]$
	<i>Podocarpus nubigena</i>	$BA = EXP [-0.49120 + 1.90639 * LN (DAP)]$
	<i>Rhaphithamnus spinosus</i> (Juss.) Moldenke	$BA = 0.0381 + 0.4731 * DAP^2 * (- 5.081 + 0.7704 * HT)$
	<i>Laurelia sempervirens</i> (a)	$BA = EXP [-2.9149 + 1.9711 * LN (DAP) + 0.7442 * LN (HT)]$
	<i>Aextoxicon punctatum</i> (a)	$BA = EXP [-2.9149 + 1.9711 * LN(DAP) + 0.7442 * LN(HT)]$
	<i>Lomatia ferruginea</i> (Cav.) R. Br. (a)	$BA = 0.2977 * DAP^2.1521$
	<i>Persea lingue</i> (a)	$BA = 0.2977 * DAP^2.1521$
	<i>Podocarpus saligna</i> D. Don (a)	$BA = 0.2977 * DAP^2.1521$
	<i>Lomatia dentata</i> (Ruiz & Pav.) R. Br. (a)	$BA = 0.2977 * DAP^2.1521$
	Gayoso (2001)	<i>Tepualia stipularis</i>
<i>Pseudopanax laetevirens</i> (Gay) Dusén		$BA = EXP[-1.835 + 2.291 * LN( DAP)]$
Gyenge et al. (2009)	<i>Lomatia hirsuta</i>	$BA = -43 875 + 7 155 * DAP$
Gayoso (2013)	<i>Nothofagus obliqua</i>	$BA = -202.182 + EXP (4.7384 + 0.0344919 * DAP + 0.0314178 * HT)$
Gayoso, Guerra, and Alarcon (2002)	<i>Sophora cassioides</i> (Phil.) Sparre	$BA = -6.14565 + EXP (1.92947 + 0.13732 * DAP + 0.04875 * HT)$
Ortega (2002)	<i>Embothrium coccineum</i> (b)	$BA = EXP (2.080 + 0.154 * DAP)$
Schlegel (2001)	<i>Nothofagus dombeyi</i>	$BA = EXP[-2.935 + 1.974 * LN(DAP) + 0.762 * LN(HT)]$
	<i>Luma apiculata</i> (b)	$BA = EXP[-2.647 + 2.104 * LN (DAP) + 0.502 * LN(HT)]$
	<i>Myrceugenia exsucca</i> (b)	$BA = EXP[-1.897 + 2.309 * LN(DAP)]$
	<i>Dasyphyllum diacanthoides</i> (Less.) Cabrera (b)	$BA = EXP[-1.835 + 2.291 * LN(DAP)]$
	<i>Saxegothaea conspicua</i> (b)	$BA = EXP[-1.835 + 2.291 * LN(DAP)]$
	<i>Myrceugenia planipes</i> (b)	$BA = EXP[-1.897 + 2.309 * LN(DAP)]$
	<i>Amomyrtus meli</i> (b)	$BA = EXP[-1.897 + 2.309 * LN( DAP)]$
Pardé and Buchon (1994)	Dead trees with unidentified species/ Árboles muertos con especie no identificada	$BA = \pi * (DAP/2)^2 * HT * FF$

FF: form Factor (0.35, neyloid); BA: aerial biomass, LN: natural logarithm, DAP: diameter at chest height (cm), HT: total height (m). a: allometric equation not available for the species, common equation was used to estimate adjusted BA for the Oak – Rauli – Coigüe forest type; b: allometric equation not available for the species, common equation was used to estimate adjusted BA for the evergreen forest type.

FF: Factor de forma (0.35, neiloide); BA: biomasa aérea, LN: logaritmo natural, DAP: diámetro a la altura del pecho (cm), HT: altura total (m). a: ecuación alométrica no disponible para la especie, se usó ecuación común para estimar BA ajustada para el tipo forestal Roble – Rauli – Coigüe; b: ecuación alométrica no disponible para la especie, se usó ecuación común para estimar BA ajustada para el tipo forestal Siempreverde.

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} < d \\ 0 & \text{si } d_{ij} > d \end{cases}$$

To determine the significant difference between the estimated value of  $G$  and its expected value, the  $Z_G$  standardization was calculated:

$$Z_G = \frac{G - E[G]}{\sqrt{V[G]}}$$

where,

$$E[G] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}{n(n-1)}, \forall i \neq j$$

$$V[G] = E[E^2] - E[G]^2$$

The scores that are obtained from  $Z_G$  are simply standardization of  $G$ , associated with a standard normal distribution.  $Z_G$  scores can be positive or negative, indicating the presence of low or high groups and their location at one or the other end of the distribution, associating a probability that will determine the significance in the formation of conglomerates.

The neighborhood between polygons with the carbon content was defined in the first order of contiguity by the criterion of "Reyna"; that is, if any part of the edges or vertices that make up the irregular polygons of carbon touch each other, then they are considered neighbors.

When forming statistically significant spatial conglomerates, a polygon is considered part of a hot spot if it has a high carbon content and neighbors also have high values. Similar considerations are made to analyze cold spots with those neighboring polygons with low carbon content. When the local sum has a very different value than expected and the difference is very large in a random selection, the statistically significant value  $Z_G$  is constituted as the result.

To test randomness, the global Moran autocorrelation coefficient (Moran, 1950) was calculated for both carbon coverages. The index varies between -1 and 1, where values near zero indicate the presence of a random pattern. Negative values indicate a spatial cluster of territorial units with different analysis values, and positive values indicate a spatial cluster of territorial units with similar analysis values.

## Results

### Forest composition and carbon content

Table 3 shows the characteristics of the species that make up the native forest of the county of Valdivia.

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall i \neq j$$

donde,

$n$  = número de casos

$x_i$  = valor de la variable en un lugar determinado

$x_j$  = valor de la variable en otro lugar ( $i \neq j$ )

$w_{ij}(d)$  = peso aplicado a la comparación entre la distancia de las localizaciones  $i$  y  $j$ , determinada por  $d$ .

El valor de  $w_{ij}(d)$  es igual a 1 si la ubicación  $j$  se encuentra dentro de la distancia de localización, medida a partir del punto  $i$  y  $w_{ij}(d)$  es igual a cero si no se cumple el supuesto anterior. La matriz de pesos espaciales  $\{w_{ij}(d)\}$  tiene una diagonal que vale cero y los elementos fuera de esta valen cero o uno, dependiendo de si se encuentra dentro o fuera de la distancia  $d$ .

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} < d \\ 0 & \text{si } d_{ij} > d \end{cases}$$

Para determinar la diferencia significativa que se produce entre el valor estimado de  $G$  y su valor esperado, se calculó la estandarización  $Z_G$ :

$$Z_G = \frac{G - E[G]}{\sqrt{V[G]}}$$

donde,

$$E[G] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}{n(n-1)}, \forall i \neq j$$

$$V[G] = E[E^2] - E[G]^2$$

Las puntuaciones que se obtienen de  $Z_G$  son simplemente estandarizaciones de  $G$ , asociadas a una distribución normal estándar. Las puntuaciones  $Z_G$  pueden ser positivas o negativas, indican la presencia de grupos bajos o altos y su ubicación en uno u otro extremo de la distribución, asociando una probabilidad que determinará la significancia en la formación de los conglomerados.

La vecindad entre polígonos con el contenido de carbono se definió en primer orden de contigüidad por el criterio de "Reyna"; es decir, si cualquier parte de los bordes o vértices que conforman los polígonos irregulares de carbono se tocan, entonces se consideran vecinos.

Al formar los conglomerados espaciales estadísticamente significativos, un polígono es considerado parte de un punto caliente si tiene un contenido alto de carbono y los vecinos también presentan valores altos.

**Table 3. Characteristics of the species under study in the county of Valdivia, Los Ríos region, Chile.**  
**Cuadro 3. Características de las especies en estudio en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.**

Species / Especie	DAP (cm)	Total height (m) / Altura total (m)	Height where tree top starts (m) / Altura comienzo de copa (m)	Basal area (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) / Área basal (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Density (tree·ha <sup>-1</sup> ) / Densidad (árbol·ha <sup>-1</sup> )	Composition (%) / Composición (%)
<i>Nothofagus obliqua</i>	21.8 ± 2.7	13.4 ± 1.6	6.6 ± 0.7	80.07	2 160	18.34
<i>Eucryphia cordifolia</i>	23.7 ± 6.0	14.2 ± 2.1	7.6 ± 1.0	55.70	1 020	8.66
<i>Gevuina avellana</i>	15.9 ± 1.7	8.9 ± 0.7	4.5 ± 0.4	18.53	900	7.64
<i>Drimys winteri</i>	21.6 ± 2.6	11.8 ± 1.3	6.3 ± 0.7	33.26	880	7.47
<i>Myrceugenia exsucca</i>	12.4 ± 0.6	7.6 ± 0.6	4.1 ± 0.3	10.25	840	7.13
<i>Laurelia sempervirens</i>	19.6 ± 3.1	13.0 ± 2.1	5.7 ± 0.6	24.76	800	6.79
<i>Saxegothaea conspicua</i>	28.7 ± 5.9	11.6 ± 1.8	5.7 ± 0.9	54.45	720	6.11
<i>Embothrium coccineum</i>	13.7 ± 1.7	9.3 ± 1.2	4.4 ± 0.8	10.02	640	5.43
<i>Podocarpus saligna</i>	16.2 ± 3.7	10.4 ± 1.9	4.6 ± 1.0	9.84	460	3.90
<i>Tepualia stipularis</i>	11.7 ± 0.9	9.4 ± 0.5	5.8 ± 0.3	4.81	440	3.74
<i>Aextoxicon punctatum</i>	23.9 ± 8.4	11.6 ± 3.1	5.2 ± 1.2	14.55	300	2.55
<i>Amomyrtus luma</i>	17.7 ± 3.3	9.1 ± 1.5	5.1 ± 0.9	7.25	280	2.38
<i>Amomyrtus meli</i>	28.7 ± 14.2	11.5 ± 3.0	5.0 ± 1.3	18.62	280	2.38
<i>Rhaphithamnus spinosus</i>	12.1 ± 1.0	6.6 ± 0.8	3.1 ± 0.6	3.26	280	2.38
<i>Luma apiculata</i>	11.2 ± 1.0	8.3 ± 1.8	4.6 ± 1.0	1.99	200	1.70
<i>Laurelia philippiana</i>	76.6 ± 17.9	21.6 ± 7.1	8.6 ± 2.7	92.41	200	1.70
<i>Nothofagus dombeyi</i>	30.9 ± 13.0	22.0 ± 0.7	11.3 ± 0.8	14.48	200	1.70
<i>Dasyphyllum diacanthoides</i>	24.0 ± 19.8	10.4 ± 5.2	5.7 ± 1.2	8.32	160	1.36
<i>Lomatia ferruginea</i>	12.0 ± 2.1	6.7 ± 0.3	3.5 ± 1.2	1.86	160	1.36
Dead trees*	49.2 ± 42.5	4.6 ± 2.1	2.5 ± 1.1	34.33	160	1.36
<i>Sophora microphylla</i>	12.2 ± 2.1	7.8 ± 1.6	3.5 ± 0.4	1.91	160	1.36
<i>Caldcluvia paniculata</i>	15.2 ± 7.7	9.0 ± 4.0	6.3 ± 0.5	1.53	80	0.68
<i>Myrceugenia planipes</i>	26.8 ± 2.4	10.5 ± 3.0	4.0 ± 1.0	4.52	80	0.68
<i>Persea lingue</i>	19.6 ± 4.4	12.5 ± 5.0	5.0 ± 0.0	2.44	80	0.68
<i>Pseudopanax laetevirens</i>	18.2 ± 5.8	10.3 ± 2.7	5.5 ± 1.4	2.14	80	0.68
<i>Lomatia hirsuta</i>	16.2 ± 10.8	9.1 ± 4.7	4.9 ± 2.7	1.10	60	0.51
<i>Podocarpus nubigena</i>	43.7 ± 15.9	17.0 ± 7.0	7.0 ± 2.3	9.61	60	0.51
<i>Lomatia dentata</i>	13.1 ± 0.6	7.7 ± 0.3	4.2 ± 0.2	0.54	40	0.34

DAP: diameter at chest height. ± Standard mean error with 95 % confidence interval. \*Dead trees of unidentified species.

DAP: diámetro a la altura del pecho. ± Error estándar de la media con intervalo de confianza de 95 %. \*Árboles muertos de especie no identificada.

Based on the number of sampled trees, the estimated density was 11 720 trees·ha<sup>-1</sup>. The most abundant species was *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (18.34 %), followed by *Eucryphia cordifolia* Cav. (8.66 %), *Gevuina avellana* Molina (7.64 %), *Drimys winteri* J. R. Forst. & G. Forst. (7.47 %) and *Myrceugenia exsucca* (DC.) O. Berg (7.13 %) which together concentrated 49.24 % (5,800

Consideraciones similares se realizan para analizar los puntos fríos con aquellos polígonos vecinos con baja cantidad de carbono. Cuando la suma local tiene un valor muy diferente del esperado y la diferencia es muy grande en una selección aleatoria, el valor estadísticamente significativo  $Z_c$  se constituye como el resultado.

trees). The least developed species was *Luma apiculata* (DC.) Burret with DAP of 11.2 cm, total height of 8.3 m and basal area of 1.99 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>.

The total C content in aerial biomass was estimated at 599.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>. According to Table 4, the type of forest with the largest representation was Evergreen with 63.3 % (379.5 Mg C·ha<sup>-1</sup>) and its most iconic structures corresponded to Evergreen adult-second-growth forest with 44.8 % (169.9 Mg C·ha<sup>-1</sup>) and Evergreen adult forest with 19.8 % (75.3 Mg C·ha<sup>-1</sup>). The second most represented forest type was Roble-Rauli-Coihue with 29.3 % (175.8 Mg C·ha<sup>-1</sup>) and its structures with greater representativeness were second-growth Oak and second-growth Coihue with 52.5 and 33.9 %, respectively.

Table 5 shows the change in land use in the study area over the period 2006-2013. Meadows and shrublands decreased at an annual rate of change of -0.4 %, forest plantations increased at a rate of 0.4 % and native forest showed a small loss equivalent to 127 ha. The annual loss rate experienced by grasslands and shrublands as a result of the natural transition to the native forest is worrisome. On the other hand, it is important to highlight the growth rate of industrial forest plantations, being this land use the second most representative (24.5 %) of the area under study.

### Spatial patterns

The global Moran index ( $I = 0.152$ ,  $P < 0.01$ ) indicated that the distribution of carbon-storing polygons in BA native forest is random (Figure 3a). G statistic indicates spatial dependence of observations in terms of the formation of clusters with high values in specific areas (Figure 3b). This indicates statistically significant grouping ( $P \leq 0.05$ ) of polygons with high carbon content values (red color), most of which correspond to protected areas (Figure 3b and 3c). A second conglomerate consists of areas with low-carbon polygons (blue color). Finally, isolated polygons that due to fragmentation of the forest have no neighborhoods to form common areas are found. The observed spatial dependence is related to physiographic characteristics; at one end, there are native forests at higher altitudes with concentrated polygon units, and at the other end, separated by wetlands and rivers, there is a place with similar altitudes, but with heterogeneous and more isolated areas in native forest polygons (Figure 3b).

### Discussion

#### Carbon content

Three forest types were identified: Oak-Rauli-Coihue, Coihue-Rauli-Tepa, and Evergreen, with a content of 599.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>. The predominant forest type

Para probar aleatoriedad, el coeficiente de autocorrelación de Moran global (Moran, 1950) se calculó para ambas coberturas de carbono. El índice varía entre -1 y 1, donde los valores cercanos a cero indican la presencia de un patrón aleatorio. Los valores negativos indican un conglomerado espacial de unidades territoriales con valores de análisis distintos, y los positivos indican un conglomerado espacial de unidades territoriales con valores de análisis similares.

### Resultados

#### Composición del bosque y contenido de carbono

El Cuadro 3 contiene las características de las especies que conforman el bosque nativo de la comuna de Valdivia. Con base en el número de árboles muestreados, la densidad estimada fue 11 720 árboles·ha<sup>-1</sup>. La especie más abundante fue *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst. (18.34 %), seguida por *Eucryphia cordifolia* Cav. (8.66 %), *Gevuina avellana* Molina (7.64 %), *Drimys winteri* J. R. Forst. & G. Forst. (7.47 %) y *Myrceugenia exsucca* (DC.) O. Berg (7.13 %) que en conjunto concentraron 49.24 % (5 800 árboles). La especie con menor desarrollo fue *Luma apiculata* (DC.) Burret con DAP de 11.2 cm, altura total de 8.3 m y área basal de 1.99 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>.

El contenido de C total en la biomasa aérea se estimó en 599.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>. De acuerdo con el Cuadro 4, el tipo forestal con mayor representación fue Siempreverde con 63.3 % (379.5 Mg C·ha<sup>-1</sup>) y sus estructuras más representativas correspondieron a bosque Siempreverde adulto-renoval con 44.8 % (169.9 Mg C·ha<sup>-1</sup>) y Siempreverde bosque adulto con 19.8 % (75.3 Mg C·ha<sup>-1</sup>). El segundo tipo forestal más representado fue Roble-Raulí-Coihue con 29.3 % (175.8 Mg C·ha<sup>-1</sup>) y sus estructuras con mayor representatividad fueron Roble renoval y Coihue renoval con 52.5 y 33.9 %, respectivamente.

El Cuadro 5 muestra el cambio de uso del suelo de la zona de estudio en el periodo 2006-2013. Las praderas y matorrales disminuyeron a una tasa de cambio anual de -0.4 %, las plantaciones forestales incrementaron a una tasa de 0.4 % y el bosque nativo presentó una pequeña pérdida equivalente a 127 ha. Es preocupante la tasa de pérdida anual que las praderas y matorrales experimentaron, como resultado de la transición natural hacia el bosque nativo. Por otra parte, es importante destacar la tasa de crecimiento de las plantaciones forestales industriales, siendo este uso de suelo el segundo más representativo (24.5 %) de la zona en estudio.

#### Patrones espaciales

El índice de Moran global ( $I = 0.152$ ,  $P < 0.01$ ) indicó que la distribución de los polígonos que almacenan el



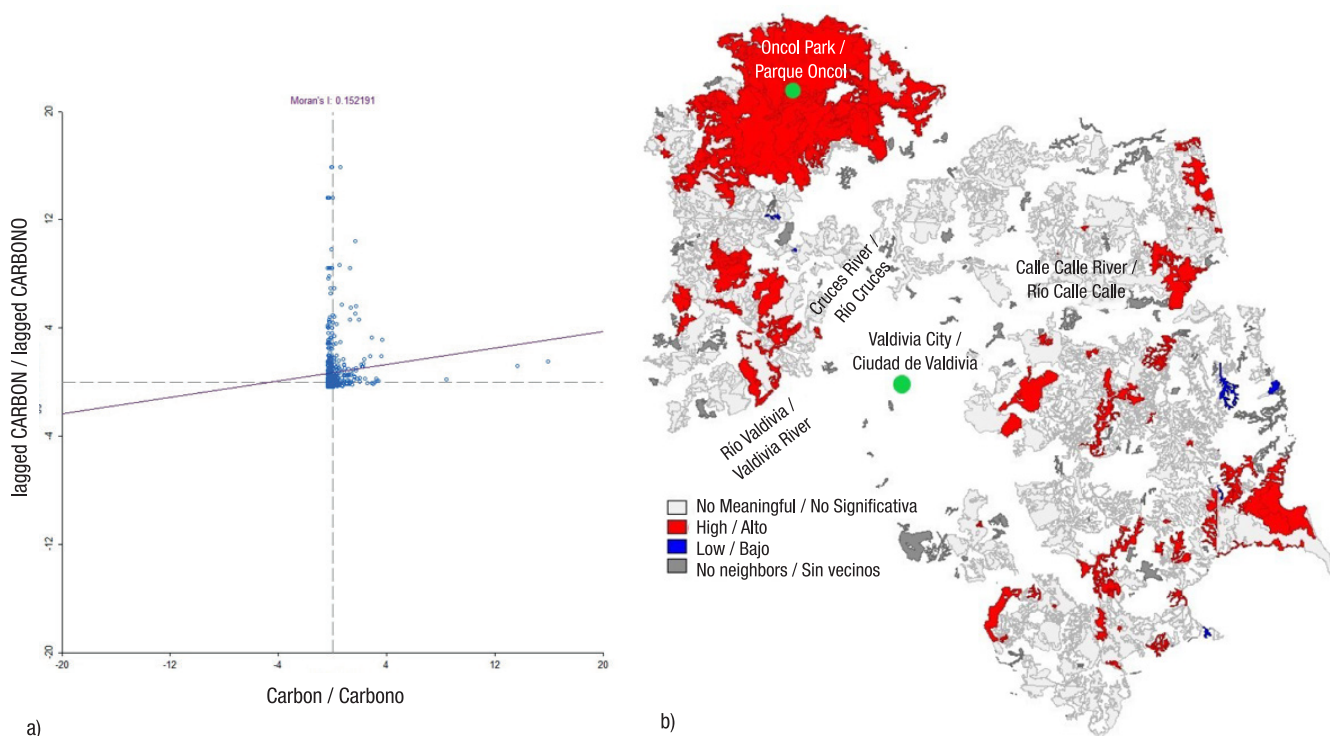
**Table 4. Surface, aerial biomass and carbon in native forest structures in the county of Valdivia, for the years 2006 and 2013, Los Rios region, Chile. Cuadro 4. Superficie, biomasa aérea y carbono en las estructuras de bosques nativos en la comuna de Valdivia, para los años 2006 y 2013, región de Los Ríos, Chile.**

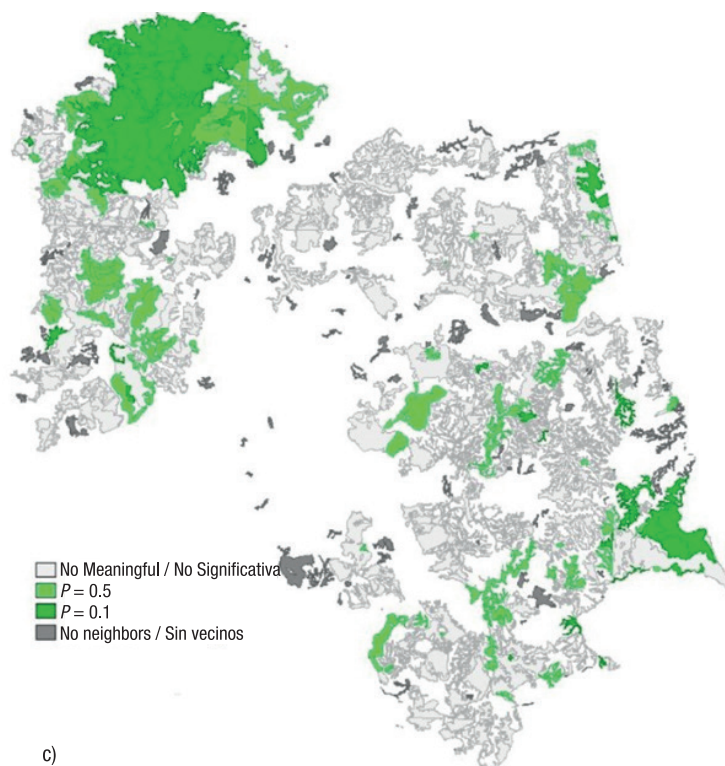
Forest type / Tipo forestal	Subtype and structure / Subtipo y estructura	2006				2013			
		Area (ha)/ Superficie (ha)	Aerial biomass (Mg·ha <sup>-1</sup> )/ Biomasa aérea (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Carbon (Mg·ha <sup>-1</sup> )/ Carbono (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Area (ha)/ Superficie (ha)	Aerial biomass (Mg·ha <sup>-1</sup> )/ Biomasa aérea (Mg·ha <sup>-1</sup> )	Carbon (Mg·ha <sup>-1</sup> )/ Carbono (Mg·ha <sup>-1</sup> )		
Oak - Rauli - Coihue/ Roble - Rauli - Coihue	Coihue (second-growth)/Coihue (renoval)	6 017	119.28	59.64	6 016	119.26	59.63		
	Oak (adult)/Roble (adulto)	79	2.23	1.12	79	2.23	1.12		
	Oak (adult-second-growth)/Roble (adulto-renoval)	1 625	45.35	22.68	1 625	45.35	22.68		
	Oak (stunted)/Roble (achaparrado)	12	0.12	0.06	12	0.12	0.06		
	Oak (second-growth)/Roble (renoval)	8 987	186.04	93.02	8 919	184.64	92.32		
Coihue - Rauli - Tepa	Coihue (adult)/Coihue (adulto)	643	46.87	23.43	643	46.84	23.42		
	Coihue (adult-second-growth)/ Coihue (adulto-renoval)	440	21.65	10.82	440	21.65	10.82		
	Coihue - Tepa (adult)/Coihue-Tepa (adulto)	27	1.34	0.67	27	1.34	0.67		
	Coihue-Tepa (adult-second-growth)/ Coihue-Tepa (adulto-renoval)	425	18.77	9.38	426	18.81	9.40		
	Evergreen/Siempreverde	2 606	81.29	40.65	2 599	81.05	40.52		
Evergreen/Siempreverde	Second-growth Canelo (second-growth)/ Renoval Canelo (renoval)	2 606	81.29	40.65	2 599	81.05	40.52		
	Tepu (second-growth)/Tepu (renoval)	601	21.99	10.99	601	21.99	10.99		
	Myrtaceae (adult-second-growth)/ Mirtaceas (adulto-renoval)	35	0.77	0.39	35	0.77	0.39		
	Myrtaceae (stunted)/Mirtaceas (achaparrado)	224	2.29	1.15	224	2.29	1.15		
	Myrtaceae (second-growth)/Mirtaceas (renoval)	2 916	54.43	27.21	2 927	54.63	27.31		
	Evergreen (adult)/Siempreverde (adulto)	3 480	151.33	75.66	3 461	150.50	75.25		
	Evergreen (adult-second-growth)/ Siempreverde (adulto-renoval)	7 176	341.40	170.70	7 141	339.76	169.88		
	Evergreen (stunted)/Siempreverde (achaparrado)	10	0.10	0.05	10	0.10	0.05		
	Evergreen (second-growth)/Siempreverde (renoval)	3 164	108.21	54.11	3 155	107.92	53.96		
	Total	38 466	1 203.46	601.73	38 339	1 199.25	599.62		

**Table 5. Area, percentage and rate of change of land use coverages between the years 2006 and 2013, in the county of Valdivia, Los Rios region, Chile.**

**Cuadro 5. Área, porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo entre los años 2006 y 2013, en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.**

Types of uses / Tipos de usos	2006		2013		Rate / Tasa	Wastage / Pérdida	Profit / Ganancia	Change / Cambio
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(%)	(ha)	(ha)	(ha)
Urban and industrial areas / Áreas urbanas e industriales	2 496	2.4	2 619	2.6	0.7	0	123	123
Agricultural land / Terrenos agrícolas	901	0.9	901	0.9	0.0	0	0	0
Grasslands and shrublands / Praderas y matorrales	18 872	18.4	18 288	17.9	-0.4	613	29	-584
Forest plantations / Plantaciones forestales	24 452	23.9	25 063	24.5	0.4	7	618	611
Native forest / Bosque nativo	38 466	37.6	38 339	37.5	0.0	127	0	-127
Mixed forest / Bosque mixto	6 128	6.0	6 106	6.0	-0.1	23	0	-23
Wetlands / Humedales	5 136	5.0	5 136	5.0	0.0	0	0	0
Areas without vegetation / Áreas sin vegetación	91	0.1	91	0.1	0.0	0	0	0
Water bodies / Cuerpos de agua	5 747	5.6	5 747	5.6	0.0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>102 289</b>	<b>100.0</b>	<b>102 289</b>	<b>100.0</b>				





c)

**Figure 3. Formation of territorial clusters with carbon content in native forest cover in the county of Valdivia, Chile: a) Moran global index, b) cluster map of the G index, c) G index map with cluster levels of significance.**

**Figura 3. Formación de *cluster* territorial con contenido de carbono en coberturas de bosques nativos en la comuna de Valdivia, Chile: a) índice de Moran global, b) mapa de *cluster* del índice G, c) mapa del índice G con niveles de significancia del *cluster*.**

was Evergreen with 379.5 Mg C·ha<sup>-1</sup> and the lowest representation corresponded to the Coihue-Rauli-Tepa type with 44.3 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Estimates of the first two forest types were similar to those obtained by Gayoso and Guerra (2005), who analyzed the carbon content in stem, branches, leaves and bark for the Oak-Rauli-Coihue and Evergreen forest types, finding no significant differences.

The use of allometric functions for the estimation of aerial biomass and factors to obtain carbon content (IPCC, 2014) is a valid methodology (Table 2). This approach is consistent with the results of Moreno et al. (2011), who tested this methodology in forest type Roble-Rauli-Coigüe in the Malleco National Reserve, which is supported by Fonseca (2017), who argues that the estimation of carbon in forest ecosystems, through mathematical models, is a reliable indirect method, of easy application and low cost.

### Space conglomerate

Statistic G was able to identify significant differences ( $P \leq 0.05$ ) between groups of polygons with C content in native forests. In other words, the algorithm discriminates spatial pattern irregularities and clearly establishes the formation of clusters of high or low

carbono en la BA de los bosques nativos es aleatoria (Figura 3a). El estadístico G indica dependencia espacial de las observaciones en términos de la formación de conglomerados con valores altos en áreas específicas (Figura 3b). Esto indica agrupación estadísticamente significativa ( $P \leq 0.05$ ) de polígonos con valores altos en contenido de carbono (color rojo), los cuales en su mayoría corresponden a las áreas protegidas (Figura 3b y 3c). Un segundo conglomerado está formado por áreas con polígonos de bajo contenido de carbono (color azul). Finalmente, se encuentran los polígonos aislados, que a causa de la fragmentación del bosque no tienen vecindades para formar áreas comunes. La dependencia espacial observada se relaciona con las características fisiográficas; en un extremo, hay bosques nativos en altitudes mayores y que presentan unidades de polígonos concentradas y, en el otro extremo, separados por humedales y ríos, existe un lugar con altitudes similares, pero con áreas en polígonos de bosque nativo heterogéneas y más aisladas (Figura 3b).

### Discusión

#### Contenido de carbono

Se identificaron tres tipos forestales Roble-Rauli-Coihue, Coihue-Rauli-Tepa, y Siempreverde,

carbon concentrations (Figure 3b). The above is ratified by Echeverría, Newton, Nahuelhual, Coomes, and Rey-Benayas (2012), who, based on spatial patterning of native forests in various states of alteration and processes of human intervention, demonstrated an increase in the index of patches and a decrease in the indices of approximation, these characteristics being determinant in the formation of conglomerates. Previously, Echeverría et al. (2006) had determined a 67 % reduction in the natural area of forests in South-Central Chile, associating the fragmentation of native forests with a decrease in patch size and an increase in the density of small patches and a decrease in the connectivity area. This situation is consistent with what was pointed out by Lara, Solari, Prieto, and Peña (2012), who showed the existence of fragmentation of the native forest. These authors established that the main changes were associated with the drastic decrease in the area of the native forest (about 50 %) and the increase in grasslands and shrublands, emerging new uses, such as agriculture and forest plantations. This last phenomenon of loss and fragmentation of native forest, due to the proliferation of forest plantations, was previously verified by Aguayo, Pauchard, Azócar, and Parra (2009), who also indicated that plantations expanded into the Andean and coastal mountain ranges. Studies by Nahuelhual, Carmona, Lara, Echeverría, and González (2012) corroborate the expansion that forest plantations have had in all directions, making use of land belonging to native forests. They determined that the main causes of deforestation and biodiversity loss in South-Central Chile have been forest plantations (42.7 %) established on forest-friendly soils, on steep slopes and in the vicinity of cities. In a geospatial analysis, Vergara, Sandoval, and Herrera (2017) ratify the studies and establish that forest plantations are randomly distributed throughout the territory, replacing and fragmenting the native forest in southern Chile. Another cause associated with fragmentation, degradation and decline in quality of native forest is that raised by Reyes (2005) and subsequently confirmed by Bahamondez et al. (2016), who argue that the main cause is the selective extraction of trees to satisfy the wood market.

Statistic G identified a conglomerate with two large groups at extreme locations of the territory and with high concentration of C in native forest polygons. The largest conglomerate is the Oncol Park, which represents the largest carbon sink, located between the ocean and the sanctuary of the Cruces River. The park corresponds to an initiative of the largest forestry company in the area, linked to Celulosa Arauco. Following the acquisition of 3 400 ha for the establishment of forest plantations in a social Responsibility Act, this company allocated 754 ha to a conservation area in 1989 (Ministerio del Medio

con un contenido de 599.6 Mg C·ha<sup>-1</sup>. El tipo forestal predominante fue Siempreverde con 379.5 Mg C·ha<sup>-1</sup> y el de menor representación correspondió al tipo Coihue-Raulí-Tepa con 44.3 Mg C·ha<sup>-1</sup>. Las estimaciones de los dos primeros tipos forestales fueron similares a las obtenidas por Gayoso y Guerra (2005), quienes analizaron el contenido de carbono en fuste, ramas, hojas y cortezas para los tipos forestales Roble-Raulí-Coihue y Siempreverde no encontrando diferencias significativas.

El uso de funciones alométricas para la estimación de biomasa aérea y de factores para obtener el contenido de carbono (IPCC, 2014) es una metodología válida (Cuadro 2). Este enfoque es coherente con los resultados de Moreno et al. (2011), quienes probaron esta metodología en tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe en la Reserva Nacional de Malleco, lo cual es fundamentado por Fonseca (2017), quien sostiene que la estimación del carbono en ecosistemas forestales, a través de modelos matemáticos, es un método indirecto confiable, de aplicación fácil y costo bajo.

### Conglomerado espacial

El estadístico G pudo identificar diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) entre los grupos de polígonos con contenido de C en los bosques nativos. En otras palabras, el algoritmo discrimina las irregularidades de patrones espaciales y establece claramente la formación de conglomerados de altas o bajas concentraciones de carbono (Figura 3b). Lo anterior es ratificado por Echeverría, Newton, Nahuelhual, Coomes, y Rey-Benayas (2012), quienes, con base en los patrones espaciales de los bosques nativos en varios estados de alteración y procesos de intervención humana, demostraron aumento en el índice de parches y disminución en los índices de aproximación, siendo estas características determinantes en la formación de conglomerados. Previamente, Echeverría et al. (2006) habían determinado reducción de la superficie natural del 67 % en bosques del centro-sur de Chile, asociando la fragmentación de los bosques nativos a la disminución en el tamaño de los parches e incremento en la densidad de parches pequeños y disminución del área de conectividad. Esta situación es coherente con lo señalado por Lara, Solari, Prieto, y Peña (2012), quienes mostraron la existencia de la fragmentación del bosque nativo. Estos autores establecieron que los principales cambios estuvieron asociados a la disminución drástica de la superficie del bosque nativo (alrededor del 50 %) y aumento de las praderas y matorrales, emergiendo nuevos usos, como la agricultura y plantaciones forestales. Este último fenómeno de pérdida y fragmentación del bosque nativo, debido a la proliferación de las plantaciones forestales, fue comprobado previamente por Aguayo, Pauchard,



Ambiente [MMA], 2011). Part of the remaining and more fragmented groups correspond to territories of small owners, descendants of indigenous peoples, who allocate their properties to conservation, creating the park Llenhue and Pilunkura; the first with 111 ha for the protection of coastal forest and the second of 150 ha for the protection of the native forest, with the purpose of supplying drinking water to the surrounding towns (Rivera & Vallejos, 2015).

## Conclusions

The carbon content in the native forest polygons of the county of Valdivia has a grouped spatial distribution. A conglomerate with two large groups and a high concentration of carbon at the ends of the territory was identified. In the study area, three forest types were identified, with Evergreen being the most represented, followed by Oak-Rauli-Coihue and Coihue-Rauli-Tepa. This study showed that, in the county of Valdivia, the carbon reserve in native forests remains especially in a park; in the rest of the territory, the native forest cover has been replaced mainly by industrial plantations. Future research will need to incorporate other factors to better explain the spatial distribution of carbon in native forests, considering variables related to social and economic conditions, proximity to roads, adjacent uses, and industrial demands.

## Acknowledgements

The authors especially thank the Corporación Nacional Forestal (CONAF) and the Vicerrectoría de Investigación, Desarrollo y Creación Artística de la Universidad Austral de Chile.

### End of English version

## References / Referencias

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3), 361–374. doi: 10.4067/S0716-078X2009000300004
- Altamirano, A., & Lara, A. (2010). Deforestación en ecosistemas templados de la precordillera andina del centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31(1), 53–64. doi: 10.4067/S0717-92002010000100007
- Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006). GeoDa: an introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, 38(1), 5–22. doi: 10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x
- Bahamondez, A., Rivas, E., Roman, B., Lozada, P., Sartori, A., Briceño, N., & Moraga, J. (2016). Bosque nativo,

Azócar, y Parra (2009), quienes también indicaron que las plantaciones se expandieron hacia los cordones montañosos andinos y costeros. Estudios realizados por Nahuelhual, Carmona, Lara, Echeverría, y González (2012) corroboran la expansión que las plantaciones forestales han tenido en todas direcciones y haciendo uso del suelo que pertenecía a bosques nativos. Ellos determinaron que las causas principales de la deforestación y pérdida de biodiversidad en el centro-sur de Chile han sido las plantaciones forestales (42.7%) establecidas en suelos de aptitud forestal, en pendientes pronunciadas y en las cercanías a las ciudades. En un análisis geoespacial, Vergara, Sandoval, y Herrera (2017) ratifican los estudios y establecen que las plantaciones forestales se distribuyen de manera aleatoria por todo el territorio, sustituyendo y fragmentando el bosque nativo al sur de Chile. Otra causa asociada a la fragmentación, degradación y disminución de calidad del bosque nativo es la planteada por Reyes (2005) y posteriormente confirmada por Bahamondez et al. (2016), quienes sostienen que la causa principal es la extracción selectiva de árboles para satisfacer el mercado de la leña.

El estadístico G identificó un conglomerado con dos grupos grandes en lugares extremos del territorio y con alta concentración de C en polígonos de bosques nativos. El conglomerado más grande corresponde al Parque Oncol que representa el mayor sumidero de carbono, ubicado entre el océano y el santuario del río Cruces. El parque corresponde a una iniciativa de la mayor empresa forestal de la zona, ligada a Celulosa Arauco. Esta empresa, posterior a la adquisición de 3400 ha para el establecimiento de plantaciones forestales, en un acto de responsabilidad social, destinó 754 ha a un área de conservación en 1989 (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2011). Parte de los grupos restantes y más fragmentados corresponden a territorios de pequeños propietarios descendientes de pueblos originarios, que destinan sus propiedades a la conservación, creando el parque Llenhue y Pilunkura; el primero con 111 ha para la protección de bosque costero y el segundo de 150 ha de protección del bosque nativo con la finalidad de abastecer de agua potable a las localidades aledañas (Rivera & Vallejos, 2015).

## Conclusiones

El contenido de carbono en los polígonos de bosques nativos de la comuna de Valdivia tiene una distribución espacial agrupada. Se identificó un conglomerado con dos grandes grupos y con una alta concentración de carbono en los extremos del territorio. En el área de estudio se identificaron tres tipos forestales, siendo Siempreverde el de mayor representación, seguido por Roble-Raulí-Coihue y Coihue-Raul-Tepa. Este estudio

- comunidades y cambio climático. Retrieved from [https://bosquenativo.cl/wp-content/uploads/2017/01/2016\\_08\\_libro\\_cambio\\_climatico.pdf](https://bosquenativo.cl/wp-content/uploads/2017/01/2016_08_libro_cambio_climatico.pdf)
- Canadell, J., & Raupach, M. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320(5882), 1456–1457. doi: 10.1126/science.1155458
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2008). Catastro de uso del suelo y vegetación. Monitoreo y actualización Región de los Ríos 1998-2006. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura-CONAF.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2009). Ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal y reglamentos. Retrieved from [http://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1368741650LibroLey\\_Bosque\\_NativoReglamentos.pdf](http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1368741650LibroLey_Bosque_NativoReglamentos.pdf)
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2014). Monitoreo de los cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de los recursos vegetacionales nativos de la región de Los Ríos. Retrieved from [biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/2340/INFORME\\_FINAL\\_LOS\\_RIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/2340/INFORME_FINAL_LOS_RIOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Corporación Nacional Forestal (CONAF) & Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (1999). Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Retrieved from [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/10656/CONAF\\_BD\\_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/10656/CONAF_BD_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation*, 130(4), 481–494. doi: 10.1016/j.biocon.2006.01.017
- Echeverría, C., Newton, A., Nahuelhual, L., Coomes, D., & Rey-Benayas, J. (2012). How landscapes change: Integration of spatial patterns and human processes in temperate landscapes of southern Chile. *Applied Geography*, 32(2), 822–831. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.08.014
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2012). ArcMap 10.1. ArcGIS Resource Center. Desktop 10. Redlands, CA, USA: Author. Retrieved from <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000012000000.htm>
- Etienne, M., & Prado, C. (1982). Descripción de la vegetación mediante la Carta de Ocupación de Tierras. Modificado de Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques Louis Emberger / Centre National de la Recherche Scientifique, France. Chile: Universidad de Chile.
- Federici, S., Tubiello, F., Salvatore, M., Jacobs, H., & Schmidhuber, J. (2015). New estimates of CO<sub>2</sub> forest emissions and removals: 1990–2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 89–98. doi: 10.1016/j.foreco.2015.04.022
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91–109. doi: 10.15359/rca.51-2.5
- evidenció que, en la comuna de Valdivia, la reserva de carbono en bosques nativos permanece especialmente en un parque; en el resto del territorio, la cobertura de bosque nativo ha sido sustituida principalmente por plantaciones industriales. En investigaciones futuras será necesario incorporar otros factores que permitan explicar mejor la distribución espacial del carbono en bosques nativos, considerando variables relacionadas con las condiciones sociales y económicas, cercanías a caminos, usos colindantes y demandas industriales.
- ### Agradecimientos
- Los autores agradecen de forma especial a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y a la Vicerrectoría de Investigación, Desarrollo y Creación Artística de la Universidad Austral de Chile.
- ### Fin de la versión en español
- 
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). *Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing?* (2<sup>nd</sup> ed.). Italy: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4793e.pdf>
- Gayoso, J., & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33–38. doi: 10.4067/S0717-92002005000200005
- Grafton, R., Nelson, H. W., Lambie, N. R., & Wyrwoll, P. R. (2012). *A dictionary of climate change and the environment*. UK: Edward Elgar Publishing Limited.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC. Geneva, Switzerland: Author. Retrieved from [https://epic.awi.de/id/eprint/37530/1/IPCC\\_AR5\\_SYR\\_Final.pdf](https://epic.awi.de/id/eprint/37530/1/IPCC_AR5_SYR_Final.pdf)
- Lara, A., Solari, M., Prieto, M., & Peña, M. (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 (Valdivia)*, 33(1), 13–23. doi: 10.4067/S0717-92002012000100002
- McRoberts, R., Tomppo, E., & Czaplewski, R. (1992). Diseños de muestreo de las evaluaciones forestales nacionales. In FAO (Ed.), *Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales* (pp. 1–21). Roma, Italia: Author. Retrieved from [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/national\\_forest\\_assessment/images/PDFs/Spanish/KR2\\_ES\\_4.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/national_forest_assessment/images/PDFs/Spanish/KR2_ES_4.pdf)
- Milla, F., Emanuelli, P., Sartori, A., Emanuelli, J. (2013). *Compendio de funciones alométricas para la estimación de biomasa de especies forestales presentes en Chile: Elemento clave para la Estrategia Nacional de Bosques y Cambio Climático (ENBCC)*. Chile: Corporación Nacional Forestal. Retrieved from <http://cooperacionsuizaenperu.org>

- pe/images/documentos/cosude/documentos\_interes/compendio-funciones-alometrica\_ucc.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2011). Las áreas protegidas de Chile. Antecedentes, institucionalidad, estadísticas y desafíos. Retrieved from <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/6990/HUM2-0008.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moran, J. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1-2), 17–23. doi: 10.2307/2332142
- Moreno, N., Herrera, M., & Ferreira, R. (2011). Modelo para cálculo estimación del carbono en tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe en la Reserva Nacional Malleco: Chile. *Revista Árvore*, 35(6), 1299–1306. doi: 10.1590/S0100-67622011000700016
- Moscovich, F., & Brena, D. (2006). Comprobación de cinco métodos de muestreo forestal en un bosque nativo de *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 13, 7–16. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48101301>
- Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., & González, M. (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and Urban Planning*, 107(1), 12–20. doi: 10.1016/j.landurbplan.2012.04.006
- Ord, J., & Getis, A. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. doi: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x
- Ord, J., & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 27(4), 286–306. doi: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x
- Ordóñez, J., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3–12. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770102>
- Reyes, R. (2005). Leña: una oportunidad para la conservación de los bosques templados del sur de Chile. *Bosque Nativo*, 37, 16–23. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/270880544\\_Lena\\_una\\_oportunidad\\_para\\_la\\_conservacion\\_de\\_los\\_Bosques\\_Templados\\_del\\_sur\\_de\\_Chile](https://www.researchgate.net/publication/270880544_Lena_una_oportunidad_para_la_conservacion_de_los_Bosques_Templados_del_sur_de_Chile)
- Rivera, C., & Vallejos, A. (2015). La privatización de la conservación en Chile: repensando la gobernanza ambiental. *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 15–25. doi: 10.4067/S0717-92002015000100003
- Sandoval, V., & Vergara, G. (2014). *Sistema de monitoreo nacional de biomasa y carbono forestal*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Smith-Ramírez, C. (2004). The Chilean coastal range: A vanishing center of biodiversity and endemism in South American temperate rainforests. *Biodiversity & Conservation*, 13(2), 373–393. doi: 10.1023/B:BIOC.0000006505.67560.9f
- Vergara, G., Sandoval, V., & Herrera, M. (2017). Distribución espacial de las plantaciones forestales al sur de Chile, zona con presencia de una planta de celulosa. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 121–135. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.09.045