



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Programa de doctorado:

RECURSOS NATURALES Y GESTIÓN SOSTENIBLE

***ANÁLISIS DEL CAMBIO TEMPORAL Y ESPACIAL DE USO DEL SUELO Y
SU MANIFESTACIÓN EN EL PAISAJE DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS, SUR
DE CHILE***

***ANALYSIS OF THE TEMPORAL AND SPATIAL LAND USE CHANGE AND ITS
MANIFESTATION IN THE LANDSCAPE OF THE REGION OF LOS RÍOS, SOUTHERN
CHILE***

Autor de la tesis: Gastón Vergara Díaz

Director: Dr. Miguel Ángel Herrera Machuca. Tutor UCO

CÓRDOBA – ESPAÑA

2021

TITULO: *Análisis del cambio temporal y espacial de uso del suelo y su manifestación en el paisaje de la región de Los Ríos, sur de Chile*

AUTOR: *Gaston Vergara Díaz*

© Edita: UCOPress. 2022
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es

Fecha de depósito tesis en el Idep: (25-01-2022)



TÍTULO DE LA TESIS
ANÁLISIS DEL CAMBIO TEMPORAL Y ESPACIAL DE USO DEL SUELO Y SU
MANIFESTACIÓN EN EL PAISAJE DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS, SUR DE CHILE

ANALYSIS OF THE TEMPORAL AND SPATIAL LAND USE CHANGE AND ITS
MANIFESTATION IN THE LANDSCAPE OF THE REGION OF LOS RÍOS, SOUTHERN
CHILE

DOCTORANDO: Gastón VERGARA DIAZ

INFORME RAZONADO DEL DIRECTOR DE LA TESIS

La tesis doctoral realizada por D. Gastón Vergara Díaz, es una importante y novedosa contribución al conocimiento de los cambios temporales y espaciales que se han llevado a cabo en torno al uso del suelo en el centro sur de Chile y de cómo este proceso ha afectado a las características del paisaje. Como espacio de estudio se ha seleccionado la región de Los Ríos englobándose en la región del Bio-Bio y se han utilizado herramientas de sistemas de información geográfica, así como técnicas bioestadísticas. La tesis tiene un gran nivel de innovación, porque se ha realizado un enfoque de análisis con nuevas herramientas tecnológicas y se espera que los resultados puedan servir como elementos de referencia en la definición de políticas medioambientales dentro de los paradigmas del desarrollo sostenible. Como resultado de la tesis, se han originado diversas publicaciones, en las que el doctorando es primer autor. Se ha realizado un análisis espacial y temporal en relación con la fragmentación del uso del suelo por incorporación de plantaciones forestales que incluían el desarrollo de indicadores locales. Asimismo, fue objeto de estudio la estimación de la biomasa aérea y el contenido de carbono de bosques autóctonos para poder en el futuro disponer de mapas de distribución espacial del carbono, que facilitará el desarrollo de acciones de mitigación, reducción de emisiones CO², contribuyéndose así a la lucha contra el cambio climático.

Por todo lo anterior, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 10 de diciembre de 2021

Firma del director

HERRERA MACHUCA
MIGUEL ANGEL -
44276323N

Firmado digitalmente por
HERRERA MACHUCA MIGUEL
ANGEL - 44276323N
Fecha: 2021.12.10 18:30:48
+01'00'

Fdo.: Miguel Angel Herrera Machuca

A Marisol, mi esposa

A mi hija, Valeria

A mi hija, Daniela

A mi hijo, Gastón

A mis padres, Luz y Edmundo

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

A mi director Dr. Miguel Ángel Herrera, por su apoyo extraordinario y la tremenda disposición para ayudar a resolver múltiples problemas que se van presentando en el transcurso de los estudios de doctorado, sin su colaboración hubiese sido muy difícil terminar todo este desafío.

Al Dr. Víctor Sandoval (Q.E.P.D.), por invitarme a participar como investigador doctorando en su proyecto de investigación “Monitoreo del uso del suelo en las Regiones de Chile” y el apoyo permanente en el desafío académico.

A la Corporación Nacional Forestal (CONAF) que me han permitido publicar parte de los datos disponibles en el Monitoreo del uso del suelo en las Regiones de Chile.

Al Dr. Hernán Peredo, por involucrarme en este desafío y su apoyo permanente en la revisión de los escritos antes de enviarlos a las revistas.

RESUMEN / ABSTRACT

RESUMEN

El objetivo general de esta tesis ha sido analizar aspectos relacionados con el cambio espacial y temporal del uso del suelo y su efecto en el paisaje en la región de Los Ríos y en términos globales en la región del Bío-Bío, utilizando sistemas de información geográficos y técnicas geoestadísticas.

La tesis se encuentra estructurada en tres capítulos, cada uno de ellos se ha transformado en un artículo científico, publicado en una revista indexada de corte internacional, abordando aspectos específicos, permitiendo de esta forma dar cumplimiento al objetivo general descrito previamente.

El primer artículo se titula “**Spatial distribution of forest plantations in southern Chile, an area with a pulp mill**”. Este trabajo se centra en los siguientes aspectos: a) realizar un análisis espacial para probar la hipótesis de que los polígonos que fragmentan el uso del suelo con plantaciones forestales no se relacionan espacialmente, lo cual explicaría que la industria forestal realiza reconversiones de uso del suelo sin seguir un patrón sobre el uso existente y que los propietarios privados realizan esta acción en forma aislada; b) construir indicadores locales para determinar la relevancia de los polígonos de plantaciones con similitudes en su entorno; c) explicar el efecto de las plantaciones en la dinámica del cambio de uso del suelo, que probaría la presión a la que los diferentes usos del territorio, en especial los bosques nativos, han estado sometidos a través de la sustitución por plantaciones forestales con especies exóticas.

El segundo trabajo se titula “**Temporal and spatial analysis of land use change in the south central region of Chile**”. En este artículo se evaluó a escala espacial y temporal la dinámica de los cambios de uso del suelo ocurridos en la región centro-sur de Chile, por ser la más poblada e industrializada y que presenta las tasas de forestación más alta del país. Se construyeron indicadores que permitieron analizar los cambios de la cobertura de uso del suelo, realizando un

análisis de los cambios de la cobertura de uso del suelo a nivel global regional y a nivel provincial.

El tercer artículo se denominó **“Estimation and spatial analysis of aerial biomass and carbon capture in native forests in the south of Chile: County of Valdivia”**.

Según las dos investigaciones previas 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 el contenido de carbono en bosques nativos en la comuna de Valdivia, utilizando funciones alométricas, y determinar el grado de agrupación de los polígonos con contenido de carbono, utilizando técnicas de estadística espacial. Al conocer los mapas de distribución espacial del carbono, será posible 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.

ABSTRACT

The general objective of this thesis has been to analyze aspects related to the spatial and temporal change of land use in the Los Ríos region and its effect on the landscape, using geographic information systems and geostatistical techniques.

The thesis is structured in three chapters, each of them has been transformed into a scientific article, published in an international indexed journal, addressing specific aspects, thus allowing to fulfill the general objective previously described.

The first article is entitled “Spatial distribution of forest plantations in southern Chile, an area with a pulp mill”. This paper focuses on the following aspects: a) conducting a spatial analysis to test the hypothesis that the polygons fragmenting land use with forest plantations are not spatially related, which would explain that the forest industry carries out land use reconversions without following a pattern on the existing use and that private landowners carry out this action in isolation; b) to construct local indicators to determine the relevance of plantation polygons with similarities in their surroundings; c) to explain the effect of plantations on the dynamics of land use change, which would prove the pressure to which different land uses, especially native forests, have been subjected through the substitution of forest plantations with exotic species.

The second paper is entitled “Temporal and spatial analysis of land use change in the south-central region of Chile”. In this article the dynamics of land use changes in the central-southern region of Chile, which is the most populated and industrialized region with the highest forestation rates in the country, was evaluated on a spatial and temporal scale. Indicators were constructed to analyze changes in land-use cover, analyzing changes in land-use cover at the global, regional and provincial levels.

The third article is entitled “Estimation and spatial analysis of aerial biomass and carbon capture in native forests in the south of Chile: County of Valdivia”. According to the two previous investigations and given the conditions of native forests in

southern Chile, the objective of this investigation was to estimate aerial biomass and carbon content in native forests in Valdivia County. Allometric functions and spatial statistics techniques, were used to determine the degree of clustering of polygons with carbon content. With the spatial distribution of carbon, it will be possible to develop a baseline for the implementation of future mitigation actions, reducing emissions from deforestation and forest degradation, sustainable management of forests, conservation, and improvement of carbon stocks.

ÍNDICE

ÍNDICE

Capítulo I	
Introducción.....	1
Objetivo.....	3
Estructura.....	4
Metodología.....	5
Capítulo II	
Distribución espacial de las plantaciones forestales al sur de Chile, zona con presencia de una planta de celulosa..	
Spatial distribution of forest plantations in southern Chile an area with a pulp mill.....	8
Resumen.....	9
Palabras claves.....	9
2.1 Introducción.....	10
2.2 Material y métodos.....	12
2.3 Resultados y discusión.....	17
2.4 Conclusiones.....	24
2.5 Agradecimientos.....	24
2.6 Referencias.....	25
Capítulo III	
Análisis del cambio temporal y espacial del uso del suelo en la región centro-sur de Chile.....	
Temporal and spatial analysis of land use change in the south central region of Chile.....	29
Resumen.....	30

Palabras claves.....	30
3.1 Introducción.....	31
3.2 Material y métodos.....	33
3.3 Resultados.....	37
3.4 Discusión.....	44
3.5 Conclusiones.....	46
3.6 Agradecimientos.....	47
3.7 Referencias.....	47

Capítulo IV

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

Estimation and spatial analysis of aerial biomass and carbon capture in native forests in the south of Chile: county of Valdivia.....	50
Resumen.....	51
Palabras claves.....	52
4.1 Introducción.....	52
4.2 Material y métodos.....	54
4.3 Resultados.....	64
4.4 Discusión.....	69
4.5 Conclusiones.....	72
4.6 Agradecimientos.....	72
4.7 Referencias.....	72

Capítulo V

Discusión General.....	78
Limitaciones y futuras líneas de investigación.....	82
Conclusiones.....	84

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Una de las grandes preocupaciones en las últimas décadas de los científicos e investigadores se relaciona con el cambio de uso del suelo y el efecto que se provoca en la alteración de los ciclos y procesos naturales. La interacción inadecuada entre el ser humano y la naturaleza repercute finalmente en el cambio global y reducción de la biodiversidad (Lambin *et al.*, 1999; Lambin *et al.*, 2003; Turner *et al.*, 2007; Marhaento *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2019; Krause *et al.*, 2019; Thellmann *et al.*, 2019; Hasan *et al.*, 2020).

A nivel mundial la destrucción de los bosques templados y tropicales, además del deterioro de la biodiversidad que albergan ha traído como consecuencia la desaparición de gran parte de los recursos capaces de capturar carbono y controlar el calentamiento global (Lambin *et al.*, 2001; Sheeran, 2006; Kasim *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Bühne *et al.*, 2021; Azadi *et al.*, 2021).

El cambio global corresponde a manifestaciones a nivel del mundial gatilladas por cambios que generan alteraciones en la atmósfera y los océanos. Este fenómeno es provocado por múltiples cambios locales relacionados con el clima, la composición del agua y el aire, la biodiversidad y el uso de la tierra; siendo este último el componente más significativo en el cambio global, debido a que más de la mitad de las especies de la tierra se encuentran solo en el 1.4 % de la superficie terrestre (Vitousek, 1992; Rockström *et al.*, 2009, Lambin *et al.*, 2003; Habibullah *et al.*, 2021; Trew y Maclean, 2021).

Las demandas humanas están generando grandes cambios en los ecosistemas y paisajes en todo el mundo, afectando de manera dramática su vulnerabilidad. Solo

pequeñas zonas en lugares muy remotos no muestran alguna evidencia de la intervención del ser humano, situación que hace imprescindible la fijación de políticas que permitan un adecuado uso de la tierra, es así como tenemos que a nivel mundial que, el 61,31% del área con vegetación terrestre es capaz de mitigar los impactos del cambio climático y esas áreas se concentran en regiones polares, bosques boreales, selvas tropicales y bosques intactos. (Lambin y Meyfroidt, 2011; Sharma *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2018).

A nivel global, se estima que en las últimas décadas los cambios de uso del suelo han provocado grandes transformaciones a nuestros sistemas ambientales, estos impactos se relacionan con las transformaciones y muchas veces desaparición de los ecosistemas boscosos y praderas naturales, los cuales son explotados y habilitados para el desarrollo de la agricultura, ganadería, forestal y áreas urbanas e industriales (Sala *et al.*, 2000; Rudel *et al.*, 2005; Baude *et al.*, 2019).

Estudiar los cambios en la cobertura del uso del suelo en una región es de vital importancia para determinar las tendencias que tendrán factores tales como: la deforestación, desertificación, degradación, cambios en la vegetación natural y la pérdida de biodiversidad (Lambin *et al.*, 2003; Baude *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2020; Rijal *et al.*, 2021).

A nivel mundial la superficie forestal total disminuyó en un 3,0 %, pasando de 4.128 millones (M) ha en 1990 a 3.999 M ha el 2015 (Food and Agriculture Organization [FAO], 2016; 2018; 2020). En el este mismo periodo se presentaron incrementos en Asia oriental, El Caribe, Asia Occidental y Central, América del Norte, Europa y Oceanía. Por otro lado, se produjo una disminución en América Central, África Oriental y Meridional, Asia del Sur y Sudeste, África del Norte, África Occidental y Central y América del Sur. Las mayores disminuciones se produjeron en Centroamérica (16,1%) y África oriental y meridional (12,6%) (Köhl *et al.*, 2015). La tasa anual de pérdidas neta de bosques se redujo, existiendo en los 90 una tasa de 7,3 M ha anuales, pasando a 3,3 M ha por año entre 2010 y 2015. La superficie

de bosque natural disminuyó de 3.961 M ha a 3.721 M ha entre 1990 y 2015, sin embargo, las plantaciones forestales aumentaron pasando de 168 M ha a 278 M ha (Keenan *et al.*, 2015; FAO, 2016).

En el periodo 2010 y 2015 la superficie de los bosques tropicales disminuyó a una tasa de 5,5 M ha anual, mientras que la superficie de los bosques templados se expandió a una tasa de 2,2 M ha anual. La principal disminución de bosques ocurrió en Centroamérica, Sudamérica, Sur y Sudeste Asiático y en las tres regiones de África, sin embargo, el resto del mundo se mantuvo o expandió (Keenan *et al.*, 2015; FAO, 2016, 2018).

En Chile, existe una desconexión entre los requerimientos de la sociedad y la fragilidad de los ecosistemas que están siendo sometidos a diferentes cambios de usos (Altamirano *et al.*, 2020; Alvarez-Garreton *et al.*, 2019). Lo anterior influye principalmente en los bosques templados, los cuales están siendo explotados en primera instancia para satisfacer la demanda internacional de productos asociados a la madera y papel y en segundo lugar para habilitar terrenos agrícolas y preparación de praderas (Echeverría *et al.*, 2006; 2008; Jensen, 2021; Jullian *et al.*, 2018).

Los bosques templados lluviosos al sur de Chile están catalogados como uno de los remanentes boscosos más grandes Sudamérica, constituyéndose en la única muestra del bioma de bosques templado, transformándose así en uno de los lugares más importantes de la biodiversidad a nivel mundial debido al endemismo de sus especies (Armesto *et al.*, 1998; Smith-Ramírez, 2004). Los principales factores asociados a estos tipos de bosques se relacionan con la provisión de servicios ecosistémicos como la producción y calidad del agua, regulación de la temperatura, protección del suelo, producción de oxígeno, recursos genéticos, sumideros de carbono y la belleza del paisaje natural (Lara *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2017; Becerra-Rodas *et al.*, 2019).

OBJETIVO

El objetivo general de la tesis ha sido describir para el periodo 2006 - 2013 las coberturas de uso del suelo en la Región de Los Ríos, al sur de Chile.

De acuerdo con lo anterior, el objetivo global de la investigación es analizar espacialmente los cambios de uso de la tierra que se han presentado en el territorio. En esta dirección, para cada uno de los periodos y haciendo uso de los tipos de usos de suelo, tipologías forestales y superficies, se generaron estadísticos espaciales y representaciones geográficas que permitieron describir el comportamiento del territorio. Se calcularon además las tasas de cambios para el periodo con los diferentes tipos de usos del suelo y clasificaciones forestales. Finalmente, para las coberturas de bosques nativos se calculó la biomasa aérea, el carbono y su representación espacial.

ESTRUCTURA

La tesis se ha estructurado en tres capítulos, donde cada uno de ellos se ha publicado en una revista internacional. Todas las revistas en las que se han publicado los artículos pertenecen a *Scimago Journal Rank – SJR*, situándose en el segundo y tercer cuartil, una de ellas corresponde al área temática *Agricultural and Biological Sciences* en la categoría *Forestry* y la otra además de contener área temática y categoría anterior, incluye el área temática *Environmental Science* en la categoría *Ecology*.

Cada artículo aborda un aspecto específico con el propósito de cumplir el objetivo general de la tesis.

El primer artículo se titula ***“Spatial distribution of forest plantations in southern Chile, an area with a pulp mill”*** y se ha publicado en la **Revista Chapingo, Serie de las Ciencias Forestales y del Ambiente**. La investigación se focaliza en estudiar los patrones de la distribución espacial de las plantaciones forestales industriales con especies exóticas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus*, en una zona al sur

de Chile con presencia de una planta de celulosa. Se investiga además la sustitución y cambios de uso del suelo que se genera en el área de estudio en el periodo 2006 al 2013, utilizando mapas, índices de distribución espacial, tasas de cambios y matrices de transición de los usos. Las ventajas de esta metodología y su uso permiten detectar la dinámica del cambio que se está produciendo en el territorio y la alteración en zonas con biodiversidad sensible como por ejemplo los bosques nativos, cursos de agua y humedales.

El segundo artículo que constituye la tesis se denomina ***“Temporal and spatial analysis of land use change in the south central region of Chile”*** publicado en la revista **Ciência Florestal** indexada y clasificada en el segundo cuartil de JSR.

Chile tiene una división administrativa basadas en regiones. Realizar un análisis espacial y temporal del cambio de uso de suelo en una región completa al sur de Chile es un gran desafío de investigación. En este artículo se realiza un análisis de los cambios de la cobertura uso del suelo desde el punto de vista espacial y temporal, tanto a nivel regional como de provincias. La metodología consiste en un conjunto de indicadores que describen el cambio de uso del suelo.

El tercer artículo, titulado ***“Estimation and spatial analysis of aerial biomass and carbon capture in native forests in the south of Chile: county of Valdivia”*** ha sido publicado en la **Revista Chapingo, Serie de las Ciencias Forestales y del Ambiente** indexada y clasificada en el tercer cuartil de JSR.

En este artículo se desarrolla una metodología para localizar y describir la ubicación espacial de la biomasa y carbono que albergan los bosques nativos. Se realiza un análisis con las coberturas de uso de los bosques nativos, el inventario de dendroenergía, funciones alométricas, indicadores de estadística espacial y la construcción de mapas. Los resultados finales consisten en la cuantificación de la biomasa y carbono de la zona en estudio y la representación de clústeres espaciales que determinan el nivel y ubicación geográfica de los sumideros de carbonos presentes en el territorio.

METODOLOGÍA

Técnicas de análisis

En el desarrollo de la tesis y la investigación asociada se han utilizado variadas técnicas de medición asociadas al cambio de uso de suelo, modelos para estimación de biomasa y carbono, y técnicas geoespaciales, permitiendo de esta forma cumplir con los objetivos planteados en los diferentes artículos, dentro de las principales podemos destacar:

El análisis que permite cuantificar el cambio del uso del suelo en el tiempo se ha realizado a través de las “Matrices de transición”, lo que ha permitido determinar la evolución, transición, ganancias y pérdidas del cambio de uso del suelo.

La distribución espacial de usos específicos del suelo y la formación de clústeres en el territorio se ha realizado a través de técnicas geoespaciales, específicamente se han usado: el índice de Moran global y el índice de asociación local (Anselin, 1995), el estadístico G (Ord y Getis, 1995) y tasas de cambio.

La biomasa aérea y carbono se calcularon con ecuaciones alométricas y factores recomendados por IPCC (2014), todo a partir de los datos de las variables dasométricas obtenidas en las parcelas permanentes de 500 m² en las estructuras de bosque adulto y bosque adulto-renoval. La distribución espacial (clústeres) se obtuvo a partir del estadístico G (Ord y Getis, 1995).

Bases de datos

En el artículo relacionado con el cambio temporal y espacial del uso del suelo en la región centro-sur de Chile y publicado en la revista Ciencia Florestal, se ha utilizado la base de datos del proyecto “Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile 1998” y su actualización al 2008, incluyendo nueve tipos de usos y una superficie total de 3.706.003 ha.

El segundo artículo que analiza la distribución espacial de las plantaciones forestales en torno de una planta de celulosa al sur de Chile, utilizó la base de datos del proyecto “Actualización del cambio de uso del suelo en la región de los Ríos, periodo 2006-2013”, incluyendo nueve tipos de usos y una superficie total de 132.134 ha.

En el artículo en el que se realiza una estimación y análisis espacial de la biomasa aérea y la captura de carbono en bosques nativos al sur de Chile, se han utilizado dos bases de datos. La primera corresponde a la empleada en el segundo artículo “Actualización del cambio de uso del suelo en la región de los Ríos, periodo 2006-2013” y además la base de datos del proyecto “Sistema de Monitoreo Nacional de Biomasa y Carbono Forestal”, con un total de 327 parcelas de 50 x 10 m distribuidas en la región de Los Ríos y 21 en la comuna en estudio, distribuidas en todas las estructuras de bosques: adulto, adulto-renoval y renoval.

***CAPÍTULO II DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS
PLANTACIONES FORESTALES AL SUR
DE CHILE, ZONA CON PRESENCIA DE UNA
PLANTA DE CELULOSA***

CAPÍTULO II

Distribución espacial de las plantaciones forestales al sur de Chile, zona con presencia de una planta de celulosa

Artículo

SPATIAL DISTRIBUTION OF FOREST PLANTATIONS IN SOUTHERN CHILE, AN AREA WITH A PULP MILL

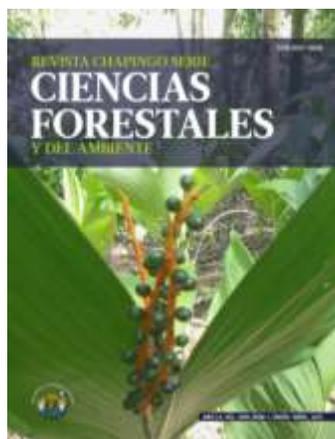
Autores:

Gastón Vergara-Díaz, Víctor A. Sandoval-Vásquez y Miguel A. Herrera-Machuca

Publicado en: **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**

Año 2017, Volumen 23, número 1, pp. 121-135

DOI: 10.5154/r.rchscfa.2015.09.045



Indexada en:

WoS (Science Citation Index, SCImago Journal Rank, SJR)

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PLANTACIONES FORESTALES AL SUR DE CHILE, ZONA CON PRESENCIA DE UNA PLANTA DE CELULOSA

RESUMEN

El incremento de las plantaciones forestales industriales en el sur de Chile y la alteración del paisaje, han sido una preocupación permanente para los investigadores. En este trabajo se utilizaron técnicas estadísticas espaciales para describir la composición de los patrones territoriales de las plantaciones forestales en una zona con presencia de una planta de celulosa y con alta demanda de especies exóticas como *Pinus radiata* y *Eucalyptus*. El software GeoDa se utilizó para calcular los índices de Moran global y local. Se utilizaron los datos de cobertura de uso del suelo y la superficie de los polígonos de plantaciones forestales actualizadas en el periodo 2006-2013. El índice de Moran global indica que la distribución de las plantaciones ocurre como un fenómeno aleatorio en todo el territorio. En su interior se observan distintas estructuras representadas por enclaves de grandes superficies, polígonos pequeños rodeados por otros de gran tamaño y polígonos grandes rodeados por pequeños, además de una fragmentación a través de todo el territorio, compuesta por polígonos de diversos tamaños y sin vecindad. La dinámica del cambio en el periodo 2006-2013 indica que la cobertura de plantaciones presentó el mayor incremento (6,578 ha) a causa del desmedro de las coberturas de bosque nativo y praderas-matorrales.

PALABRAS CLAVE

Índice Moran, autocorrelación, cluster territorial, uso del suelo.

2.1 INTRODUCCIÓN

Los subsidios otorgados a las plantaciones forestales en Chile se incrementaron a partir de 1974 con la creación del Decreto Ley 701, cuyo objetivo principal fue desarrollar plantaciones de alta productividad, cubriendo entre 75 y 90 % de los costos de plantación. Inicialmente, los principales beneficiados fueron grandes terratenientes, posteriormente en 1998, el Decreto Ley 19.561 reformuló el sistema de subsidios para que los pequeños propietarios pudieran obtener los beneficios y fortalecer en alguna medida la conservación de los suelos. Debido a la falta de disponibilidad de grandes extensiones de tierra e incremento de su valor comercial, se crearon las granjas forestales incentivando a las ocupaciones de terrenos marginales del sector agrícola con plantaciones de tipo forestal. De esta forma, en el 2004, los pequeños propietarios tenían más de 40,000 ha plantadas y estaban organizados para aprovechar economías de escala durante los procesos de plantación, manutención y cosecha (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico [OCDE] & Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2005).

Las exportaciones de productos forestales ocupan el tercer lugar con 13 %, después de la minería y la industria de alimentos con sus derivados, constituyendo 3.5 % del producto interno bruto (Donoso & Otero, 2005). La celulosa representa 47.5 % de las exportaciones forestales, seguida por la madera aserrada con 43.1 %, y papeles y cartones con 9.4 % (Banco Central de Chile, 2015; OCDE & CEPAL, 2005). La demanda de productos forestales generó el incremento de las plantaciones exóticas de pino y eucalipto, es así como las plantaciones forestales en Chile crecieron a una tasa anual de 2.17 % en los últimos 14 años (Corporación Nacional Forestal [CONAF], 2011). Estas plantaciones ocupaban 2,119,005 ha en 1997, que representaban 13.55 % de la cubierta boscosa; en 2011, la superficie aumentó a 2,872,007 ha, representando 17.22 % de la cubierta (CONAF, 2011).

El principal demandante de plantaciones forestales es la industria de celulosa

y papel. Esta industria abarca desde la Región del Maule hasta la Región de los Ríos con un total de nueve plantas productoras con una capacidad de producción de 6 millones de toneladas anuales. La región del Maule se caracteriza por concentrar la mayor actividad forestal con presencia de industrias de celulosa. Por otra parte, la Región de los Ríos, declarada zona turística y caracterizada por su riqueza en bosque nativo y biodiversidad, no ha estado fuera del proceso de instalación de plantas de celulosa. En 1995 comenzó el proyecto de construcción de la planta Valdivia en la comuna de Mariquina, a 10 km del centro de la ciudad. La planta inició en el 2004 con una capacidad de $550,000 \text{ t}\cdot\text{año}^{-1}$ de celulosa Kraft blanqueada, derivada de pino radiata y eucalipto, demandando grandes extensiones de plantaciones de bosque como materia prima (Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región de los Lagos, 1998).

Los bosques templados lluviosos al sur de Chile constituyen la única muestra del bioma de bosques templados de Sudamérica, transformándose en uno de los lugares más importantes de la biodiversidad a nivel mundial, debido al endemismo de sus especies (Armesto, Rozzi, Smith-Ramirez, & Arroyo, 1998; Smith- Ramírez, 2004). Otros factores importantes de estos bosques se relacionan con la provisión de servicios ecosistémicos como la producción y calidad del agua, regulación de la temperatura, protección del suelo, producción de oxígeno, sumideros de CO_2 y belleza del paisaje.

Según Donoso y Otero (2005), Chile aún tiene una tarea pendiente respecto a los niveles de sustentabilidad ambiental por falta de una institucionalidad fuerte que regule el buen manejo de plantaciones industriales y bosque nativo, resguardando la biodiversidad, productividad y servicios domésticos. En la presente investigación se describe el uso del suelo de plantaciones forestales de pino y eucalipto en una zona al sur de Chile con presencia de una planta de celulosa que opera desde el 2005. Los objetivos fueron a) realizar un análisis espacial para probar la hipótesis de que los polígonos que fragmentan el uso

del suelo con plantaciones forestales no se relacionan espacialmente, lo cual explicaría que la industria forestal realiza reconversiones de uso del suelo sin seguir un patrón sobre el uso existente y que los propietarios privados realizan esta acción en forma aislada; b) construir indicadores locales para determinar la relevancia de los polígonos de plantaciones con similitudes en su entorno; c) explicar el efecto de las plantaciones en la dinámica del cambio de uso del suelo, que probaría la presión a la que los diferentes usos del territorio, en especial los bosques nativos, han estado sometidos a través de la sustitución por plantaciones forestales con especies exóticas.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la comuna de Mariquina, situada en la Región de los Ríos al sur de Chile (Figura 1). La comuna se localiza entre los 39° 31' 0'

LS y 72° 58' 0' LO, a una altitud promedio de 1,430 m; limita al norte con las comunas de Lanco y Loncoche, al sur con la comuna de Valdivia, al oeste con el océano Pacífico y al este con la comuna de Máfil. La población es de 19,823 habitantes en una superficie de 132,100 ha (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2002). La zona se caracteriza por tres unidades fisiográficas representadas por la cordillera de los Andes, la Depresión Intermedia y la cordillera de la Costa, orientadas de norte a sur. El clima es lluvioso con influencia mediterránea y las temperaturas anuales oscilan entre 9 y 10 °C en la costa y las zonas cordilleranas. El área se caracteriza por un gradiente de precipitación oeste-este que varía entre 1,200 y 1,600 mm promedio anual, concentrándose principalmente entre los meses de marzo a agosto, existiendo un periodo más seco entre enero y febrero, donde la precipitación no sobrepasa los 60 mm.

Los bosques nativos del tipo templado-lluvioso se caracterizan por la presencia de especies arbóreas endémicas con dominancia de especies clasificadas como bosque del tipo forestal siempre verde; su mayor presencia es transversal entre

la cumbre andina y la cordillera de la Costa. Existen además bosques mixtos compuestos por especies nativas y exóticas. Las condiciones ambientales del territorio han permitido el aprovechamiento para la proliferación de plantaciones forestales, basadas en especies exóticas de rápido crecimiento como el eucalipto y el pino. En la Depresión Intermedia se encuentra una superficie importante (45 %) constituida por praderas y matorrales (CONAF et al., 1999).

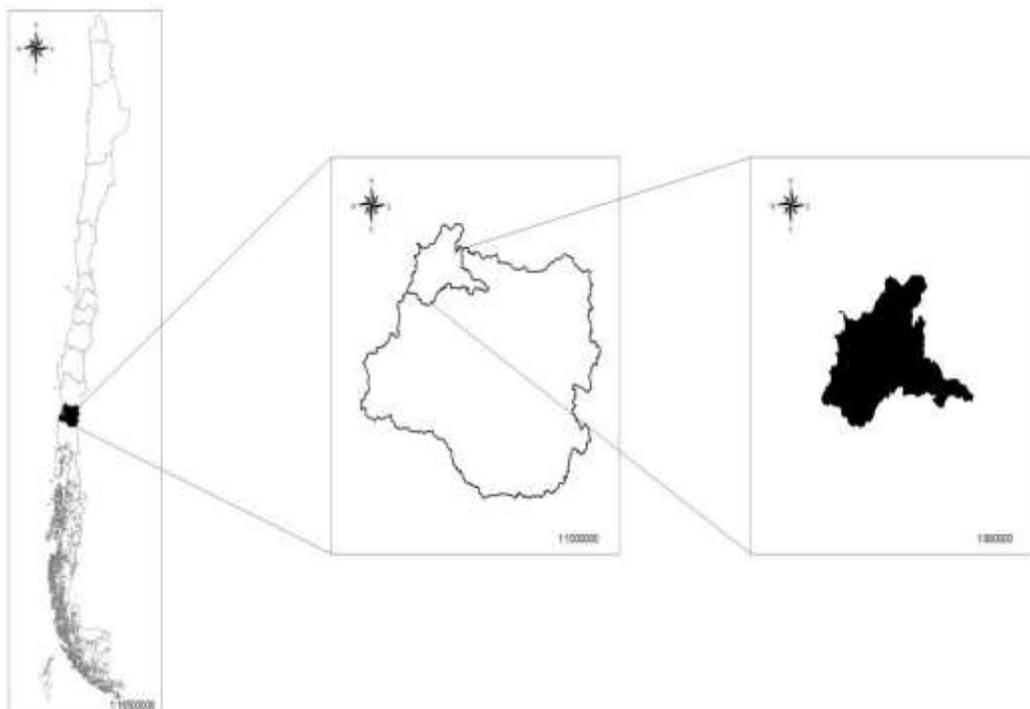


Figura 1. Ubicación de la comuna de Mariquina (área de estudio). A la izquierda se muestra la localización de la Región de los Ríos al sur de Chile y a la derecha la comuna en estudio.

Bases de datos

Los datos se obtuvieron a partir de un proyecto más amplio que consistió en la actualización de la cobertura del uso del suelo de la Región de los Ríos en el periodo 2006-2013. Se utilizaron imágenes de alta resolución disponibles en Google Earth (<http://earth.google.com>); 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). Los polígonos con la clasificación de los usos se digitalizaron sobre las imágenes georreferenciadas del año 2013, asignando un número de identificación único a cada nuevo polígono, además del número de la cobertura del periodo anterior.

La tipología para la clasificación de la cobertura de uso del suelo se basó en la metodología desarrollada por el Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos Louis Emberger (CEPE/CNRS de Montpellier, Francia), conocida como Carta de Ocupación de la Tierra (Etienne & Prado, 1982). Esta carta se adaptó y validó en Chile, ampliándola a 44 subcategorías en el catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile (CONAF et al., 1999). Las tipologías principales de uso corresponden a las áreas urbanas e industriales, terrenos agrícolas, praderas y matorrales, plantaciones forestales, bosque nativo, bosque mixto, humedales, áreas desprovistas de vegetación, nieves, glaciales y cuerpos de agua.

Las visitas a terreno permitieron ratificar la clasificación cartográfica de los polígonos y describirlos con cambios de uso del suelo. Se utilizaron formularios para describir cada polígono con relación al uso actual, causales de cambio y presencia de especies (Sandoval, 2008). Los formularios se ingresaron en un sistema de información construido para el monitoreo y actualización del cambio de uso del suelo (Vergara & Sandoval, 2010). La información de terreno se validó y posteriormente se unió a la base de datos gráfica a través del identificador único poligonal, utilizando el software ArcMap 10.1 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2016). Se cruzaron ambas coberturas y se incluyó además una cobertura con los límites administrativos, obteniendo una base alfanumérica y gráfica con el uso actual del suelo en la Región de los Ríos. También se generó una cobertura de polígonos en formato "Shape file" para el área de estudio. Los datos en cada polígono con la superficie de plantación forestal se usaron para medir autocorrelación espacial a través del índice de Moran, utilizando el software GeoDa (Anselin, 2003). La vecindad entre polígonos de plantaciones se definió en primer orden de contigüidad por el

criterio tipo reina; es decir, si cualquier parte de los bordes o vértices que conforman los polígonos irregulares de plantaciones se tocan, entonces se consideran vecinos.

Análisis espacial

El coeficiente de autocorrelación de superficie de Moran global (I) (Moran, 1950) es similar al coeficiente de correlación propuesto por Pearson (1896), pero incluye el concepto espacial, indicando la covarianza entre diferentes zonas en el numerador, varianza en el denominador y una matriz con ponderaciones de distancia o contigüidad que define las zonas vecinas. El índice varía entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 0 indican falta de relación espacial o presencia de un patrón aleatorio, lo que probaría nuestra hipótesis; otros valores indican la presencia de autocorrelación. Los valores negativos indican un conglomerado espacial de unidades territoriales con valores de análisis distintos, y los valores positivos indican un conglomerado espacial de unidades territoriales con valores de análisis similares, sean altos o bajos. El índice Moran global (I) se obtuvo a partir de:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d)(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

donde:

n = Número de caso

x_i = Valor de la variable en un lugar determinado

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

\bar{x} = Media de la variable de análisis

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

El valor de $w_{ij}(d)$ es igual a 1 si la localización j está dentro de la distancia de localización medida a partir del punto i , mientras que $w_{ij}(d)$ es igual a 0 si no se

cumple el supuesto anterior. La matriz de pesos espaciales $\{w_{ij}(d)\}$ tiene una diagonal que vale 0 y los elementos fuera de ésta valen 0 o 1, dependiendo de si se encuentra dentro o fuera de la distancia d (Anselin, 2003).

El índice de Moran global representa un resumen estadístico, indicando la intensidad de autocorrelación entre grupos territoriales, pero no identifica el patrón de las relaciones espaciales. El índice de Moran local (I_i), índice local de asociación espacial (LISA), se calculó para conocer la relevancia de los valores similares con respecto a su entorno. Para caracterizar la configuración espacial de las plantaciones, el índice que permite evaluar el grado de agrupación de las observaciones similares y disímiles se define como:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sum_{j=1}^n w_{ij}(d)(x_j - \bar{x})$$

Este índice permite identificar polígonos en el territorio donde los valores de análisis (superficie de plantaciones [ha]) altos o bajos se agrupan espacialmente, así también polígonos con superficie de plantaciones muy distinta a las de las áreas circundantes (Anselin, 1995).

Análisis temporal

Los cambios del uso del suelo en el periodo 2006-2013 se cuantificaron con una matriz de transición de doble entrada, donde las filas y columnas representan los tipos de uso del suelo para ambos periodos; cada celda, la superficie de las áreas que presentaron cambios en el periodo; y la diagonal queda representada por la superficie de los tipos de usos que no presentaron cambios (Aguayo, Pauchard, Azocar, & Parra, 2009). La matriz se construyó con un sistema de información desarrollado en el laboratorio de geomática de la Universidad Austral de Chile (Vergara & Sandoval, 2010). La tasa de cambio en el periodo se calculó utilizando

la fórmula propuesta por Puyravaud (2003):

$$P = \frac{100}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

P = Tasa de cambio anual (%)

A_1 = Superficie de la clase de uso en el tiempo inicial (ha)

A_2 = Superficie de la clase de uso en el tiempo final (ha)

t_1 = Año de evaluación inicial

t_2 = Año de evaluación final

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que las plantaciones forestales se extienden a través de todo el territorio, con énfasis hacia el sector norte (comunas de Lanco y Loncoche) y el sector este con el límite de la comuna de Máfil, donde se encuentra la mejor red caminera y hay cercanía con la planta de celulosa. Se observaron plantaciones cercanas a humedales y en algunos casos deslindan sin corredores de separación; existe una penetración en forma de espina de pescado hacia el interior del bosque nativo, generando degradación, donde el uso de bosque permanece como tal, pero pierde densidad en su cobertura de copa (v. g. de bosque nativo pasó a matorral arborescente y a bosque mixto), y además está fragmentado con polígonos de diferentes tamaños (Figura 2). Nahuelhual, Carmona, Lara, Echeverría, y González (2012) realizaron un estudio en el centro sur de Chile, para evaluar la vulnerabilidad de los bosques nativos en áreas no protegidas y propensas para su conversión en plantaciones forestales. Los autores determinaron que las plantaciones forestales no tienen un patrón de distribución, sino que se expanden en diferentes direcciones, estableciéndose en el bosque nativo secundario, generando además pérdida de biodiversidad. Coincidente con los resultados en esta investigación, Wilson, Newton, Echeverría, Weston, y Burgman (2005) determinaron que el clima, topografía, suelo, cercanía a caminos, ciudades y áreas industriales son factores

de distribución especial relevantes en la sustitución.

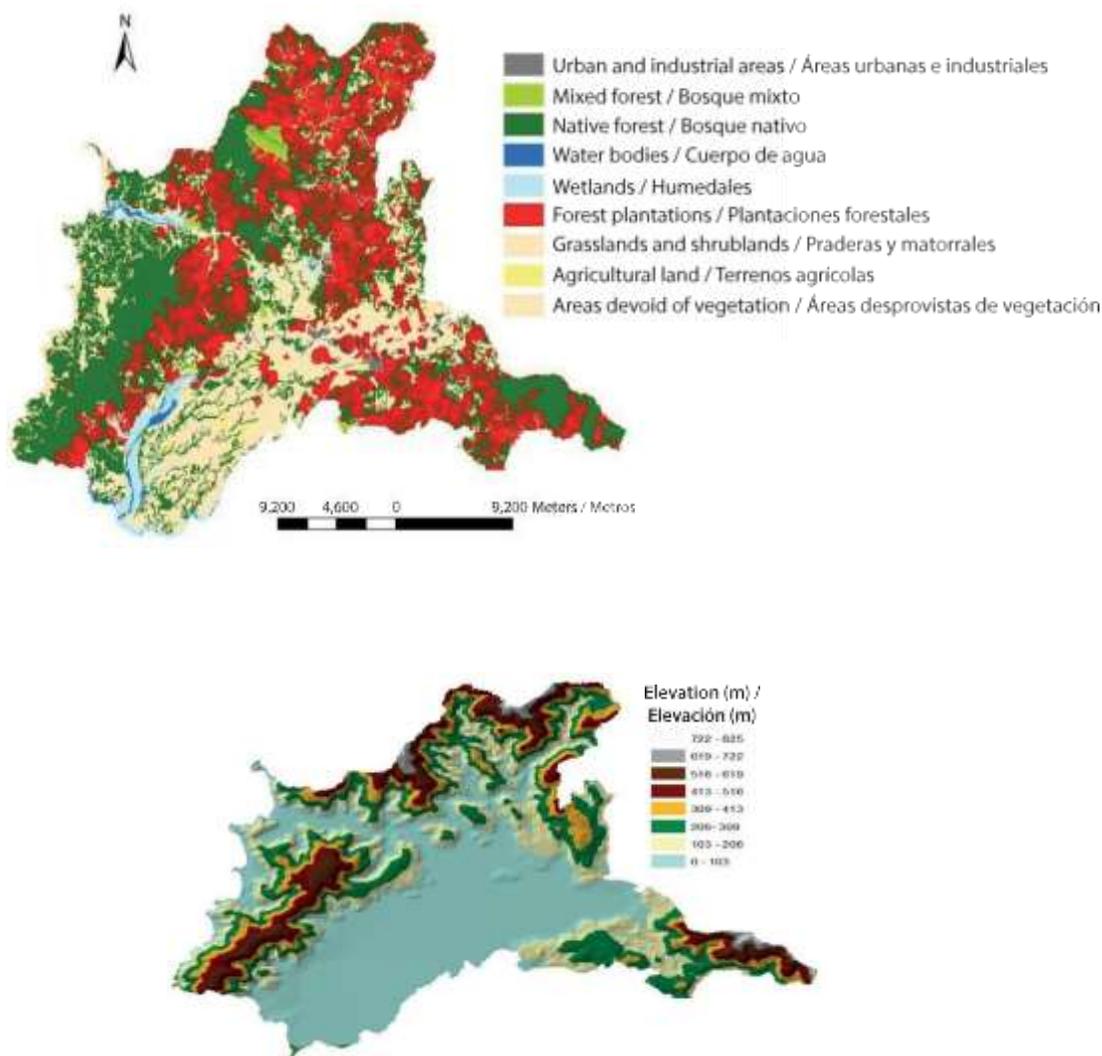
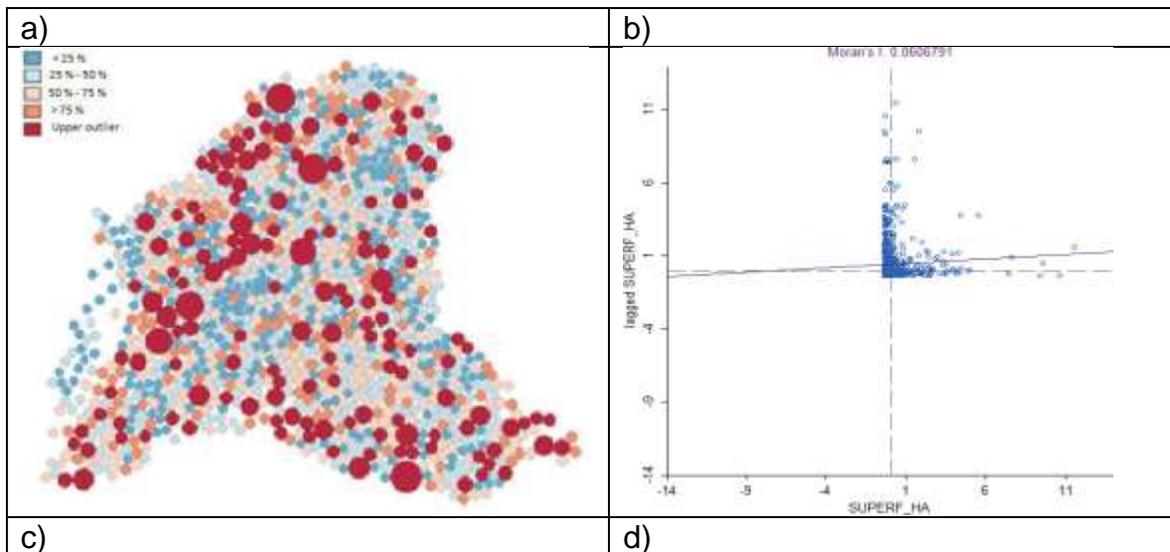


Figura 2. Coberturas de uso del suelo y curvas de elevación en la comuna de Mariquina, Chile.

En la Figura 3 se puede apreciar que el índice de Moran global para las plantaciones forestales es de 0.06 ($P < 0.01$), indicando presencia de un patrón aleatorio a través de todo el territorio con la existencia de muchos polígonos aislados de diversos tamaños y sin vecindad. Van Holt, Binford, Portier, y Vergara (2016) analizaron una zona amplia de dos regiones del sur de Chile y comprobaron que las plantaciones se establecieron en cuencas esencialmente agrícolas, en

cuencas hidrográficas dominadas por bosque nativo y en zonas planas dedicadas a la agricultura.

La distribución aleatoria de especies exóticas por regeneración natural ocurrió también en la Patagonia chilena, donde inicialmente se establecieron plantaciones exóticas para controlar la erosión causada por los incendios y la ganadería. Posteriormente dichas plantaciones se introdujeron para fines comerciales, y por la facilidad de adaptación a las condiciones locales se produjo una regeneración natural que invadió los bosques nativos y generó diferentes patrones espaciales (Langdon, Pauchard, & Aguayo, 2010). Una situación similar se reportó en la Patagonia argentina, donde las especies exóticas con fines productivos como el pino murrayana mostró una expansión invasora sobre la estepa, y el pino oregón sobre los cipresales (Sarasola, Rusch, Schlichter, & Ghera, 2006).



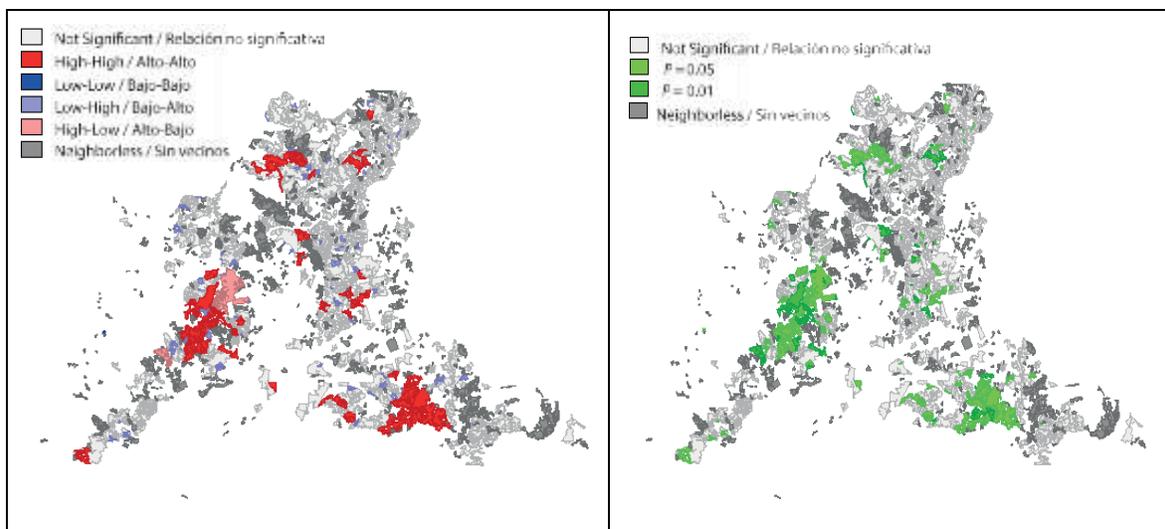


Figura 3. a) Fragmentación territorial y tamaño de los polígonos de plantaciones forestales en la comuna de Mariquina, Chile, b) Índice de Moran global para la variable polígono de plantación, c) Mapa de conglomerados de los polígonos de plantaciones, d) Mapa de significancia de los polígonos de plantaciones.

Como el índice de Moran global es solo un resumen estadístico que indica la intensidad de autocorrelación entre los grupos territoriales, es necesario identificar algunos patrones de relaciones espaciales. Por tal motivo, el índice de Moran local se construyó para identificar las unidades territoriales (polígonos de plantaciones) que se agrupan. Los valores de análisis altos (polígonos grandes) o bajos (polígonos pequeños) se agrupan espacialmente, así como también polígonos con valores muy distintos a las áreas circundantes. De esta forma en nuestro estudio podemos distinguir los siguientes tipos de conglomerados espaciales:

Alto-Alto. Polígonos de plantaciones con superficie sobre la media, rodeados significativamente por polígonos vecinos que también tienen una superficie sobre la media; corresponden a superficies de empresas forestales que ocupan espacios grandes del territorio con plantaciones forestales en la comuna (Figura 3). También aparecen algunos conglomerados de este tipo, extendiéndose hacia los límites de las comunas de Máfil en sentido Este y Valdivia hacia el Sur.

Altamirano y Lara (2010) estudiaron la zona precordillerana del centro sur de Chile y determinaron que 63 % de las plantaciones forestales se encontraron en coberturas que correspondían a bosque nativo, zonas con niveles de elevación intermedia y a corta distancia de la red de caminos. González, Lara, Urrutia, y Bosnich (2011) advierten que las superficies extensas de plantaciones forestales y los ecosistemas altamente fragmentados e invadidos por especies exóticas, junto a la disminución de las precipitaciones y el aumento de sequías recurrentes, generan una alta continuidad de combustible propensa a incendios forestales.

Bajo-Alto. Polígonos de plantaciones con una pequeña superficie, rodeada significativamente por polígonos vecinos con superficie con un tamaño superior a la media (Figura 3). Esta situación se presenta cuando los pequeños propietarios, vecinos a las plantaciones forestales, quedan rodeados por las empresas forestales y deciden dedicar sus tierras a la actividad forestal, producto de la degradación previa de bosque nativo por la extracción de leña. El estudio de Aguayo et al. (2009), en el centro sur de Chile, explica la transformación de bosque nativo en matorrales y, posteriormente, un gran porcentaje de estos últimos en plantaciones forestales. Otras investigaciones atribuyen un gran porcentaje del reemplazo del bosque nativo a las plantaciones forestales directamente (Lara, Solari, Prieto, & Peña, 2012; Nahuelhual et al., 2012).

Alto-Bajo. Se refiere a la presencia de polígonos con plantaciones de gran superficie, rodeados significativamente por polígonos de plantaciones vecinas con superficie inferior a la media; es decir, pequeños propietarios que orbitan y deslindan con los grandes propietarios de plantaciones y deciden dedicar su propiedad al uso forestal.

Sin vecinos. Al considerar en el análisis solamente los polígonos con plantaciones forestales, se produce una fragmentación territorial, existiendo muchos polígonos de diferente tamaño sin vecindad. Lo anterior está ratificado por el índice de Moran global, que indica un patrón aleatorio de las plantaciones;

asimismo coincide con el estudio de Nahuelhual et al. (2012), quienes mencionan la proliferación de una serie de polígonos fragmentados en diferentes tamaños y distribuidos a través de todo el paisaje.

Relación no significativa. Se produce por la presencia de polígonos de plantaciones, donde la variable superficie del polígono no se relaciona significativamente con los valores que presentan sus vecinos. Esto sucede por la fragmentación y la presencia de otros usos como vecindad.

Cuadro 1. Superficie y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo entre los años 2006 y 2013 en la comuna de Mariquina, Chile.

TIPOS DE USO	2006		2013		Tasa (%)	Pérdida (ha)	Ganancia (ha)	Cambio (ha)
	(ha)	(%)	(ha)	(%)				
Áreas Urbanas e Industriales	256	0.2	613	0.5	12.5	0	357	357
Terrenos Agrícolas	962	0.7	1,108	0.8	2.0	84	230	146
Praderas y Matorrales	45,211	34.2	40,182	30.4	-1.7	5,091	61	-5,030
Plantaciones Forestales	31,242	23.6	37,820	28.6	2.7	88	6,666	6,578
Bosque Nativo	48,532	36.7	46,481	35.2	-0.6	2,219	169	-2,050
Bosque Mixto	288	0.2	288	0.2	0.0	0	0	0
Humedales	4,484	3.4	4,482	3.4	0.0	2	0	-2
Áreas Desprovistas de Vegetación	510	0.4	510	0.4	0.0	0	0	0
Cuerpos de Agua	650	0.5	650	0.5	0.0	0	0	0
TOTAL	132,134	100	132,134	100				

Cuadro 2. Matriz de cambio de cobertura de uso del suelo entre los años 2006 y 2013 en la comuna de Mariquina, Chile.

	Año 2013									Total 2006 (ha)	
	Áreas	Terrenos	Praderas y	Plantaciones	Bosque	Bosque	Humedales	Áreas sin	Cuerpos		
	Urbanas	Agrícolas	Matorrales	Forestales	Nativo	Mixto	Vegetación	de Agua			
Año 2006	Áreas Urbanas- Industriales	256	0	0	0	0	0	0	0	0	256
	Terrenos Agrícolas	0	878	0	84	0	0	0	0	0	962
	Praderas y Matorrales	280	230	40,120	4,412	169	0	0	0	0	45,211
	Plantaciones Forestales	75	0	14	31,153	0	0	0	0	0	31,242
	Bosque Nativo	3	0	48	2,168	46,312	0	0	0	0	48,532
	Bosque Mixto	0	0	0	0	0	288	0	0	0	288
	Humedales	0	0	0	2	0	0	4,482	0	0	4,484
	Áreas Sin Vegetación	0	0	0	0	0	0	0	510	0	510
	Cuerpos de Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	650	650
	Total 2013 (ha)	613	1,108	40,182	37,820	46,481	288	4,482	510	650	132,134

El análisis espacial, utilizando el índice de Moran, es una técnica no usada ampliamente en el ámbito de los recursos naturales; sin embargo, es necesario destacar investigaciones relacionadas con el análisis espacial de los incendios forestales (Ávila-Flores, Pompa-García, & Vargas-Pérez, 2010; Pompa-García, & Hernández-González, 2012) y de los cambios en la cobertura vegetal (Rodríguez, Pompa-García, Hernández-Díaz, & Juárez-Reyes, 2010). La matriz de cambio revela que las coberturas de uso de suelo que presentaron mayores transformaciones correspondieron a las áreas urbanas e industriales, plantaciones forestales, terrenos agrícolas y praderas-matorrales, dinámica coincidente con la encontrada por Aguayo et al. (2009). Las áreas urbanas e industriales crecieron a una tasa anual de 12.5 %, seguida por las plantaciones forestales con 2.7 % anual (Cuadro 1), lo cual coincide con lo expresado en las cifras oficiales de CONAF (2011). La cobertura de praderas y matorrales tuvo una tasa anual negativa (-1.7 %) (Cuadro 1), siendo su mayor pérdida en superficie (4,412 ha) derivada del uso de plantaciones forestales (Cuadro 2). La cobertura de bosque nativo presentó de igual forma una tasa negativa; la mayor pérdida de superficie (2,168 ha) también fue derivada de las plantaciones forestales. Las situaciones anteriores justifican el incremento de superficie que obtuvieron las plantaciones, pasando de una representación territorial del 23.6 al 28.6 % con una ganancia de 6,666 ha en el

periodo 2006-2013. Aguayo et al. (2009) estudiaron la dinámica del cambio de uso del suelo, entre los años 1979 y 2000, en dos regiones vecinas a la región de los Ríos. Los autores determinaron que las principales transformaciones del paisaje se debieron a la actividad forestal, agropecuaria y al crecimiento urbano; sin embargo, la principal pérdida del bosque nativo la atribuyeron a la expansión de la actividad forestal hacia la cordillera andina y la costera. La tendencia de las transformaciones de uso del suelo y la dirección del cambio en este trabajo también es coincidente con las encontradas por Vergara, Sandoval, y Miranda (2010) en un estudio que abarca toda la Región de los Ríos para el periodo 1998-2007.

2.4 CONCLUSIONES

El análisis espacial utilizando técnicas estadísticas, a través del índice de Moran, ratifica que la distribución de las plantaciones de especies exóticas como *P. radiata* y *Eucalyptus* en una zona al sur de Chile, y con presencia de una planta de celulosa, es aleatoria. Al interior del territorio se forman conglomerados de distinta forma y tamaño, además de fragmentos de superficies con plantaciones de diferente magnitud y sin vecindad. La dinámica del cambio en el periodo 2006-2013 indicó que las plantaciones forestales presentaron el mayor incremento (6,578 ha) en desmedro de la superficie del bosque nativo y praderas-matorrales. Las técnicas usadas en la investigación generan información relevante para las instituciones encargadas de la protección de los bosques y aplicación de la legislación. Es recomendable a futuro, la incorporación de técnicas de análisis espacial sistematizadas, con periodos más cortos, que permitan detectar los cambios de usos de suelo de manera temprana y así detener la degradación de los bosques nativos en forma oportuna.

2.5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en forma especial al Laboratorio de Geomática de la Universidad Austral de Chile por permitir procesar la información de las coberturas vegetativas de la zona estudiada, a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y también a la Dirección de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Austral de Chile.

2.6 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. (1995). Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 27, 93–115. doi:10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x
- Anselin, L. (2003). GeoDa 0.9 User's Guide. Spatial analysis laboratory, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. Retrieved from <https://s3.amazonaws.com/geoda/software/docs/geoda093.pdf>
- Armesto, J., Rozzi, R., Smith-Ramirez, C., & Arroyo, M. (1998). Conservation targets in South American temperate forests. *Science*, 282(5392), 1271-1272. doi: 10.1126/science.282.5392.1271
- Ávila-Flores, D., Pompa-García, M., & Vargas-Pérez, E. (2010). Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 253-260. doi: 10.5154/r.rchscfa.2009.08.028
- Banco Central de Chile. (2015). Indicadores de comercio exterior. Retrieved from <http://si3.bcentral.cl/ESTADISTICAS/Principal1/Informes/SE/COMEX/ice022015.pdf>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF), Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF), Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, & Universidad Católica de Temuco. (1999). Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe nacional con variables ambientales. Retrieved from <http://bibliotecadigital>.

ciren.cl/bitstream/handle/123456789/10656/CONAF_
BD_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región de los Lagos. (1998). Resolución exenta N° 279/98 del 30 de octubre de 1998 califica favorablemente el proyecto "Valdivia" de Celulosa Arauco y Constitución S. A. Retrieved from http://www.sinia.cl/1292/articles-35170_RCA_RioCruces.pdf
- 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. http://sit.conaf.cl/tmp/obj_490972/171_Catastro_de_los_Recursos_Vegetacionales__1997-2011_.pdf
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2011). Catastro de los recursos vegetacionales de Chile. Informe nacional. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura. Consultado 4 de Julio de 2016. Retrieved from http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articles-66336_documento.pdf
- Donoso, P., & Otero, L. (2005). Hacia una definición de país forestal: ¿Dónde se sitúa Chile? *Bosque (Valdivia)*, 26(3), 5-18. doi: 10.4067/S0717-92002005000300002
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2016). ArcGis Resources. Ayuda de ArcGIS 10.1. Retrieved August 1, 2016 from <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/#/na/006600000000p000000/>
- Etienne M., & Prado, C. (1982). Descripción de la vegetación mediante la Carta de Ocupación de Tierras. Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. Agrarias y Forestales.
- González, M., Lara, A. Urrutia, R., & Bosnich, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 215-219. doi: 10.4067/S0717-92002011000300002.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2002). Boletín estadístico: Estadísticas de Chile. Santiago, Chile: Autor.
- Langdon, B., Pauchard, A., & Aguayo, M. (2010). *Pinus contorta* invasion in the Chilean Patagonia: Local patterns in a global context. *Biological Invasions*, 12(12), 3961-3971. doi: 10.1007/s10530-010-9817-5

- Lara, A., Solari, M. E., Prieto, M. D. R., & Peña, M. P. (2012). Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35° - 43° 30' S). *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 13-23. doi: 10.4067/S0717-92002012000100002
- Moran, P. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1/2), 17-23. doi:10.1093/biomet/37.1-2.17
- 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
- Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) & Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2005). *Evaluación del desempeño ambiental en Chile*. Santiago, Chile: Autor. Retrieved from http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/1288/S0500003_es.pdf?sequence=1
- Pearson, K. (1896). Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 187, 253- 318. doi: 10.1098/rsta.1896.0007
- Pompa-García, M., & Hernández-González, P. (2012). Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 33(1), 63-68. doi:10.4067/S0717-92002012000100007
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1), 593-596. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00335-3
- Rodríguez, F., Pompa-García, M., Hernández-Díaz, C., & Juárez-Reyes, A. (2010). Patrón de distribución espacial de la pérdida, degradación y recuperación vegetal en Durango, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 14(1), 53-65. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83716113004>
- Sandoval, V. (2008). *Manual de operaciones en terreno, monitoreo del uso del suelo en Chile*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Sarasola, M., Rusch, V., Schlichter T., & Ghersa, C. (2006). Invasión de coníferas forestales en áreas de estepa y bosques de ciprés de la cordillera en la Región Andino Patagónica. *Ecología austral*, 16, 143-156. Retrieved from <http://www.scielo.org.ar/pdf/ecoaus/v16n2/v16n2a06.pdf>

- 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:BOC.0000006505.67560.9f
- Van Holt, T., Binford, M., Portier, K., & Vergara, R. (2016). A stand of trees does not a forest make: Tree plantations and forest transitions. *Land Use Policy*, 56, 147-157. doi: 10.1016/j.landusepol.2016.04.015
- Vergara, G., & Sandoval, V. (2010). *Manual del usuario del sistema de actualización del monitoreo nacional del uso del suelo en Chile*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Vergara, G., Sandoval, V., & Miranda, J. C. (2010). Indicadores territoriales: ¿Degradación del patrimonio natural turístico en la Región de los Ríos? periodo 1998-2007. *Gestión turística (Valdivia)*, 14, 55-68. doi: 10.4206/gest.tur.2010.n14-04
- Wilson, K., Newton, A., Echeverría, C., Weston, C., & Burgman, M. (2005). A vulnerability analysis of the temperate forests of south central Chile. *Biological Conservation*, 122(1), 9-21. doi: 10.1016/j.biocon.2004.06.015

***CAPÍTULO III ANÁLISIS DEL CAMBIO TEMPORAL Y
ESPACIAL DEL USO DEL SUELO EN LA
REGIÓN CENTRO-SUR DE CHILE***

CAPÍTULO III

Análisis del cambio temporal y espacial del uso del suelo en la región centro-sur de Chile

Artículo

TEMPORAL AND SPATIAL ANALYSIS OF LAND USE CHANGE IN THE SOUTH CENTRAL REGION OF CHILE

Autores:

Gastón Vergara-Díaz, Víctor A. Sandoval-Vásquez y Miguel A. Herrera-Machuca

Publicado en: *Ciência Florestal*

Año 2018, Volumen 28, número 4, pp. 1831-1844

DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509835342>



Indexada en:

WoS (Science Citation Index, SCImago Journal Rank, SJR)

ANÁLISIS DEL CAMBIO TEMPORAL Y ESPACIAL DEL USO DEL SUELO EN LA REGIÓN CENTRO-SUR DE CHILE

RESUMEN

La investigación estudia el cambio temporal y espacial del uso del suelo en la Región del Bio- Bio (Centro-Sur de Chile), para el periodo 1998 y 2008. Se utilizó la cobertura digital del monitoreo nacional del año 1998 y fotografías aéreas para el año 2008, posteriormente se construyeron matrices que explican el cambio y transiciones entre los diferentes usos del territorio. Las superficies con plantaciones crecieron a una tasa anual de 2,5 %, incremento generado por el consumo de praderas y matorrales en 21 %, terrenos agrícolas 14 %, bosque mixto 8,8 %, humedales en 1,6 % y bosque nativo en menor medida 1,1 %. Las praderas y matorrales presentaron una pérdida a una tasa de 2,5 % anual, la causa principal se debe a la transferencia de este uso a plantaciones con un 21 % y a otros usos como terrenos agrícolas 2 %. Los terrenos agrícolas perdieron superficie con una tasa anual de 1,5 %, terrenos que incrementaron a las plantaciones en 14 %, los humedales perdieron superficie con tasa de 0,4 %, la superficie se trasladó a las áreas urbanas e industriales en 2,6 % y plantaciones en 1,6 %. La principal presión para ocupar superficie corresponde a las plantaciones, debido a que la Región del Bio-Bio representa la mayor cantidad de superficie (858.592 ha) de plantaciones exóticas del país.

PALABRAS CLAVE

Monitoreo, territorio, plantaciones

3.1 INTRODUCCIÓN

El cambio del uso del suelo es una de las grandes preocupaciones de los científicos e investigadores durante las últimas décadas, este tipo de factor ejerce alteración en los ciclos y procesos naturales, repercutiendo finalmente en el cambio global y reducción de la diversidad biótica, alteración provocada por la interacción inadecuada entre el hombre y su medio ambiental (LAMBIN et al., 1999; LAMBIN; GEIST; LEPERS, 2003; TURNER; LAMBIN; REENBERG, 2007).

Uno de los grandes cambios de uso del suelo tiene relación con la deforestación, la cual se refleja en la intervención de los bosques por parte del ser humano, generando finalmente un ambiente antrópico, debido a la transformación de la cobertura del terreno y la degradación e intensificación del uso del suelo (ALVES 2002, LAMBIN; GEIST; LEPERS, 2003; ECHEVERRÍA et al., 2006).

La destrucción de los bosques tropicales y templados, sumado a ello el deterioro de la biodiversidad que albergan, trae como consecuencia la desaparición de gran parte de los recursos capaces de capturar carbono y controlar el calentamiento global (SHEERAN, 2006).

A nivel global, se estima que en las últimas décadas los cambios de uso del suelo han provocado grandes transformaciones a nuestros sistemas ambientales, estos impactos se centran principalmente en las transformaciones y muchas veces desaparición de los ecosistemas boscosos y praderas naturales, los cuales fueron transformados y habilitándolos para el desarrollo de la agricultura, ganadería, forestal y áreas urbanas e industriales (SALA et al., 2000; RUDEL et al., 2005).

Los estudios desarrollados en Chile señalan que existe un desacoplamiento entre la sociedad y los ecosistemas a nivel local, influyendo principalmente en los bosques templados, los cuales están siendo explotados en primera instancia para satisfacer la demanda internacional de productos asociados a la madera y papel, y

en segundo lugar la habilitación de terrenos agrícolas y preparación de praderas (ECHEVERRÍA et al., 2006; 2008). Otros estudios recientes desarrollados en el Centro Sur de Chile, que explican el cambio de la cobertura de uso de suelo, cuantificando la transición del bosque nativo, indican en primer lugar que la transición es hacia matorrales (29 %) y plantaciones forestales (27 %), principalmente *Pinus radiata* (ALTAMIRANO; LARA, 2010). La forma de expansión de las plantaciones forestales en su proceso inicial en Chile, es decir, hasta 1990 obedeció a patrones bien establecidos y que se relacionaban con los tipos de suelos con aptitud forestal y pendientes pronunciadas, patrones que posteriormente perdieron importancia, generando una expansión del uso del suelo para esta actividad forestal en forma anárquica y predominante en toda la región (NAHUELHUAL et al., 2012).

Estudiar los cambios en la cobertura del uso del suelo es esencial para determinar las tendencias que tendrán factores tales como: la deforestación, desertificación, degradación, cambios en la vegetación natural y la pérdida de biodiversidad en una determinada región (LAMBIN; GEIST; LEPERS, 2003).

Con el objetivo de cuantificar y describir el cambio de la cobertura de uso del suelo en dos periodos de tiempo, se construyen matrices de cambio que explican las transiciones de cambios entre los diferentes tipos de usos, previa interpretación de lo ocurrido a nivel de cobertura de suelo en cada periodo estudiado, utilizando para su identificación imágenes satelitales y fotografías aéreas (SANDOVAL; REAL, 2005; ALTAMIRANO; LARA, 2010).

En la presente investigación se evaluó en una escala espacial y temporal la dinámica de los cambios de uso del suelo ocurridos en la Región del Bio-Bio en el centro-sur de Chile, por ser la más poblada e industrializada y que presenta las tasas de forestación más alta del país (37 %) (INSTITUTO FORESTAL, 2007), cuantificando la dinámica del cambio de las coberturas de uso del suelo. Los objetivos principales de este trabajo corresponden específicamente a:

- a) Construir indicadores que permitan describir los cambios de la cobertura de uso del suelo en la Región del Bio- Bio.
- b) Realizar un análisis de los cambios de la cobertura de uso del suelo en la Región del Bio- Bio a nivel global y a nivel de provincia.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

La Región del Bio-Bio se encuentra ubicada en el centro sur de Chile, limitada al Norte por la Región del Maule, al Sur por la Región de la Araucanía, al Este con la República Argentina y al Oeste con el Océano Pacífico (Figura 1), se localiza entre los 36° y los 38°30' de latitud sur, y desde los 71° hasta los 73°40' de longitud oeste, a una altitud promedio de 1.430 msnm. Está estructurada administrativamente por cuatro provincias y el territorio insular lo componen las islas Quiriquina, Santa María y La Mocha. Posee una población proyectada al 2016 de 2.127.902 habitantes (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, 2002), con una tasa de crecimiento intercensal de 0,7 %. La superficie es de 3.706.003 ha, distribuidas en las provincias de Concepción con 346.300 ha, Bio-Bio 1.505.432 ha, Arauco 544.470 ha y Ñuble con 1.309.800 ha respectivamente (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 1999).

El clima corresponde a una transición entre el clima mediterráneo y el templado húmedo con lluvias intermitentes. Las temperaturas medias oscilan entre los 12,4° C y los 14° C en la costa y las zonas cordilleranas. Las precipitaciones son superiores a los 1.000 mm anuales, concentrándose principalmente entre los meses de abril a noviembre.

La geomorfología de la región no escapa a la que se presenta en todo el país, esto es, cordillera-depresión intermedia-planicies, entre la variedad de los ambientes naturales, destaca el sistema insular, que enriquecen tanto la vegetación como sus paisajes.

La Región del Bio-Bio representa la mayor cantidad en superficie de bosques plantados del país, con 858.592 ha (principalmente *Eucalyptus* 240.473 ha y *P. radiata* 610.124 ha), representando el 37,3 % del total del país, seguida solo por la Regiones del Maule con un 18,8 % (principalmente *Eucalyptus* 38.196 ha y *P. radiata* 389.434 ha) y La Araucanía con un 19,2 % (principalmente *Eucalyptus* 168.019 ha y *P. radiata* 262.430 ha) (INSTITUTO FORESTAL, 2008).

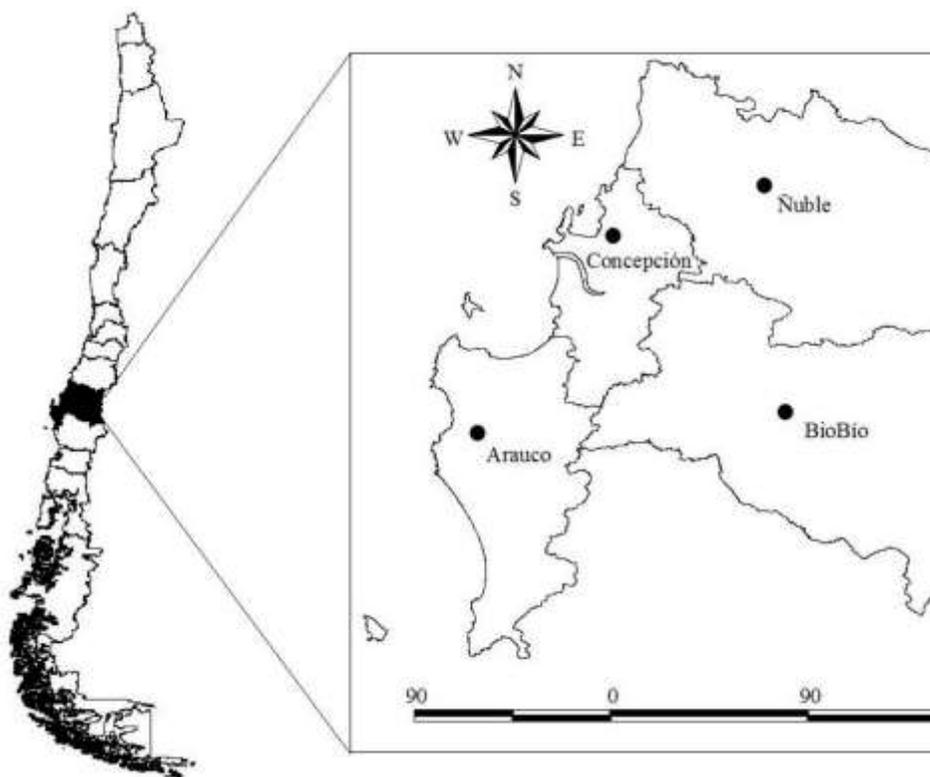


FIGURA 1: Mapa del área de estudio, región y provincias.

Material empleado

Se utilizó para el primer periodo a nivel de región la información base proveniente del proyecto denominado “Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile 1998”, en el cual se usaron cartastemáticas para generar una representación cartográfica detallada del uso de la tierra, en relación a vegetación y bosques a lo

largo de todo el territorio nacional continental. Se interpretaron aproximadamente 50.000 fotografías aéreas. Se describieron en terreno alrededor del 50 % de los polígonos con bosque nativo y mediante un sketchmaster se traspasaron los datos desde las fotos aéreas a las cartas topográficas base, en escala 1:50.000, 1:100.000 y 1:250.000, según disponibilidad de cada región. Posteriormente y a medida que se dispuso de nuevas y mejores tecnologías, se realizaron correcciones respecto a la identificación de polígonos, exactitud de los límites y la escala de representación (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 1999). Para el segundo periodo, año 2008, se usaron fotografías aéreas, obtenidas del Servicio Aéreo Fotogramétrico (SAF) a una escala 1:10.000. Las fotografías aéreas se escanearon y georreferenciaron al sistema de coordenadas UTM WGS-84 (18S), utilizando puntos de control obtenidos de las coberturas vectoriales provenientes del catastro y monitoreo nacional de uso de suelo (CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL, 1999). Usando las imágenes escaneadas y georreferenciadas del año 2008, se digitalizaron los polígonos de cambio, utilizando el software ArcGis 10, asignándole a cada polígono de cambio un número de identificación único, además el número de polígono del periodo anterior.

La tipología para la clasificación de la cobertura de uso del suelo se basó en la metodología desarrollada por el Centro de Estudios Fitosociológicos y Ecológicos L. Emberger (CEPE de Montpellier), conocida como carta de ocupación de la tierra (SANDOVAL, 2008). Las principales clasificaciones de uso del suelo fueron: (1) Áreas Urbanas e Industriales, (2) Terrenos Agrícolas, (3) Praderas y Matorrales, (4.1) Plantaciones, (4.2) Bosque Nativo, (4.3) Bosque Mixto, (5) Humedales, (6) Áreas Desprovistas de Vegetación, (7) Nieves y Glaciales, (8) Cuerpos de Agua, (9) Áreas no reconocidas.

Metodología

Para la recolección de la información de terreno con la interpretación de los polígonos identificados cartográficamente y cambios de uso del suelo en el segundo

periodo, se utilizaron formularios que permitieron describir el terreno en relación al uso actual, causales de cambio, árboles, arbustos y especies (SANDOVAL, 2008). Los formularios se transfirieron a una base datos, a través de un Sistema de Información construido para el monitoreo y actualización del cambio de uso del suelo (VERGARA; SANDOVAL, 2010). La información de terreno se validó y posteriormente se unió a la base de datos gráfica a través del identificador único poligonal, posteriormente utilizando ARCGIS 10 (ARCGIS, 2001), se cruzaron ambas coberturas e incluyendo además una cobertura con los límites administrativos territoriales, el producto que se obtiene numéricamente corresponde a una base de datos, la cual se incorpora al Sistema de Información (VERGARA; SANDOVAL, 2010) obteniéndose las diferentes matrices que explican la evolución del cambio y la transición de coberturas (DEZZEO; SENDRA, 2008).

La matriz de cambio permitió cuantificar la evolución de uso del suelo, ésta consiste en una matriz simétrica, en filas y columnas se representan los diferentes tipos de coberturas de clasificación del suelo y al interior en cada celda está presente la superficie de los usos que experimentaron cambios en el periodo 1998 y 2008 (AGUAYO et al., 2009). Con operaciones de sumas y restas de las filas obtenemos las pérdidas y al realizar las mismas operaciones con las columnas se obtienen las ganancias del periodo estudiado.

Para calcular la tasa de cambio se utilizó la fórmula de interés compuesto (PUYRAVAUD, 2003).

$$P = \frac{100}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

Dónde: P = tasa de cambio por año en porcentaje; A₁ = superficie en hectáreas de la clase de uso en el tiempo inicial; A₂ = superficie en hectáreas de la clase de uso en el tiempo final; t₁ = año de evaluación inicial; t₂ = año de evaluación final.

3.3 RESULTADOS

Al analizar cada periodo podemos observar que el año 1998 los terrenos agrícolas y plantaciones tienen el predominio del uso en la Región (tabla 1, figura 2), cada uno con un 26 %, representando entre ambos más del 50 % de la superficie Regional, en un segundo lugar se encuentra el Bosque Nativo (21 %) y en tercer lugar las Praderas y Matorrales (17,2 %).

TABLA 1: Superficie, porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo para los años 1998 y 2008 en la Región del Bío Bío.

TIPOS DE USO	1998		2008		Cambio		Tasa de Cambio
	ha	%	ha	%	ha	%	Anual
1 Áreas Urbanas e Industriales	25.803	0,7	35.686	1,0	9.882	38,3	3,2
2 Terrenos Agrícolas	965.145	26,0	829.508	22,4	-135.637	-14,1	-1,5
3 Praderas y Matorrales	637.163	17,2	498.496	13,5	-138.667	-21,8	-2,5
4.1 Plantaciones	958.697	25,9	1.227.788	33,1	269.091	28,1	2,5
4.2 Bosque Nativo	776.436	21,0	768.552	20,7	-7.883	-1,0	-0,1
4.3 Bosque Mixto	53.294	1,4	56.642	1,5	3.348	6,3	0,6
5 Humedales	12.027	0,3	11.595	0,3	-432	-3,6	-0,4
6 Áreas Desprovistas de Vegetación	133.976	3,6	132.518	3,6	-1.458	-1,1	-0,1
7 Nieves y Glaciares	90.692	2,4	90.468	2,4	-224	-0,2	0,0
8 Cuerpos de Agua	52.558	1,4	54.742	1,5	2.184	4,2	0,4
9 Áreas No Reconocidas	211	0,0	8	0,0	-203	-96,1	-32,6
TOTAL	3.706.003		3.706.003				

Para el segundo periodo (año 2008), los Terrenos Agrícolas bajan en superficie, llegando a un 22,4 % de representatividad del territorio Regional (tabla 1, figura 2), con una tasa negativa en el periodo de cambio del 1,5 % anual, las Praderas y Matorrales presentan también una disminución en su superficie, llegando a una representación del 13,5 %, con tasa de cambio negativa de 2,5 % anual, sin embargo la superficie de Plantaciones Forestales presentan un incremento en este nuevo periodo, llegando a cubrir el 33,1 % de la superficie del territorio de la Región,

lo cual representa una tasa anual de incremento del 2,5 %, por otro lado las Áreas Urbanas e Industriales, a pesar de su baja representación sobre el territorio, también tienen un incremento pasando de 0,7 % al 1,0 % del territorio, incrementándose en el periodo estudiado un 38,3 %, con una tasa de crecimiento anual del 3,2 %.

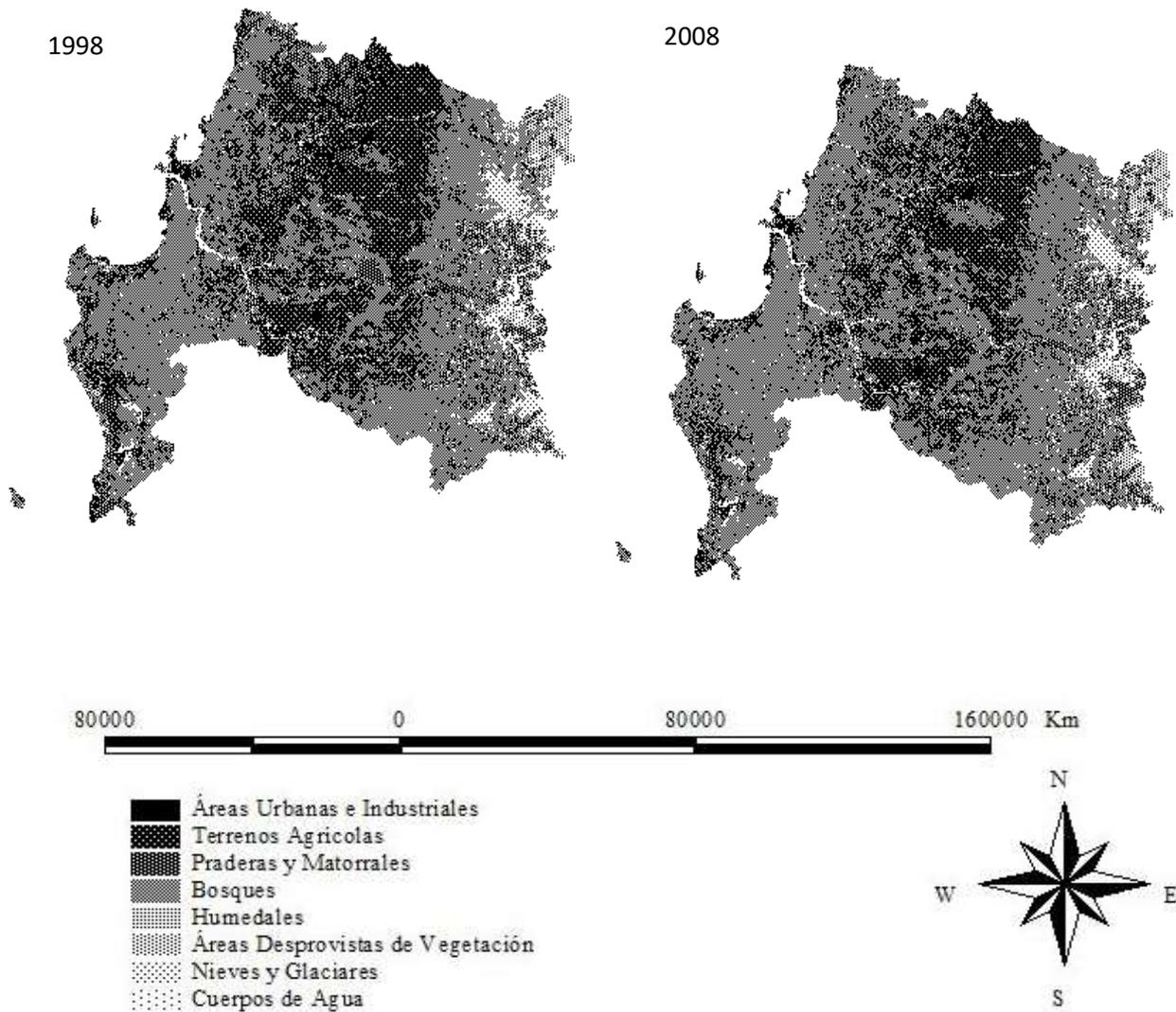


FIGURA 2: Coberturas de uso del suelo obtenidas del monitoreo 1998 y 2008.

TABLA 2: Matriz de cambio de cobertura de uso del suelo entre los años 1998 y 2008, en la Región del Bío Bío.

USOS DEL SUELO 2008									TOTAL	PÉRDIDAS
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1998	(ha)

USOS DEL SUELO 1998		4,1	4,2	4,3										
1. Áreas Urbanas e Industriales		25659	0	35	97	0	13	0	0	0	0	0	25803	144
2. Terrenos Agrícolas		5643	812205	8359	137413	487	968	25	0	0	45	0	965145	152940
3. Praderas y Matorrales		1598	12774	475476	136447	5677	4171	20	32	0	970	0	637163	161688
4.1 Plantaciones		2361	3883	8162	939378	2732	2118	2	48	0	14	0	958697	19319
4.2 Bosque Nativo		31	433	4791	8793	759115	1871	0	37	0	1365	0	776436	17321
4.3 Bosque Mixto		22	153	465	4681	507	47459	0	7	0	0	0	53294	5835
5. Humedales		271	0	2	195	11	0	11549	0	0	0	0	12027	479
6. Áreas Desprovistas de Vegetación		84	0	919	557	5	25	0	132386	0	0	0	133976	1590
7. Nieves y Glaciares		0	0	216	0	0	0	0	8	90468	0	0	90692	224
8. Cuerpos de Agua		16	47	71	57	0	18	0	0	0	52349	0	52558	210
9. Áreas No Reconocidas		0	13	0	171	19	0	0	0	0	0	8	211	203
TOTAL 2008 (ha)		35686	829494	498496	1227616	768534	56642	11595	132518	90468	54742		3706003	
GANANCIAS		10027	17290	23021	288238	9419	9183	46	132	0	2394			

En relación a los terrenos agrícolas un 84,2 % se mantuvo el año 2008 (tabla 2, figura 3). La superficie que se perdió en el periodo estudiado se reemplazó principalmente por Plantaciones Forestales en un 14 % y otro porcentaje (0,6 %) se transfirió a las Áreas Urbanas e Industriales.

Parte de la superficie de Terrenos Agrícolas que se encuentra presente el año 2008, corresponde a superficie que el año 1998 pertenecían a la clase de uso Áreas no reconocidas 6,2 % y en un porcentaje menor 2,0 % provienen de praderas y matorrales (tabla 2, figura 3).

La superficie perteneciente al tipo de uso Plantaciones Forestales presentes el año 2008 (tabla 2, figura 3), provienen en un 21,0 % de superficie que el año 1998 pertenecían a Praderas y Matorrales, también las Plantaciones ocuparon superficie de Terrenos Agrícolas (14 %), Áreas no Reconocidas (81 %), Bosque Nativo (11 %), Bosque Mixto (8,8 %) e incluso el tipo de uso humedales aporta el 1,4 %.

El 98,7 % de la superficie de Bosque Nativo que existía el año 1998, se mantuvo el año 2008, la superficie que se perdió se reemplazó principalmente por plantaciones,

esto es un 1,1 % y un 0,6 % se reemplazó por praderas y matorrales (tabla 2, figura 3).

De la superficie de Bosque Nativo existente el año 2008, un 8,9 % corresponde a terrenos que el año 1998 pertenecía a la clase de uso áreas no reconocidas, en igual situación la clase de uso praderas y matorrales aporta con un 0,9 %.

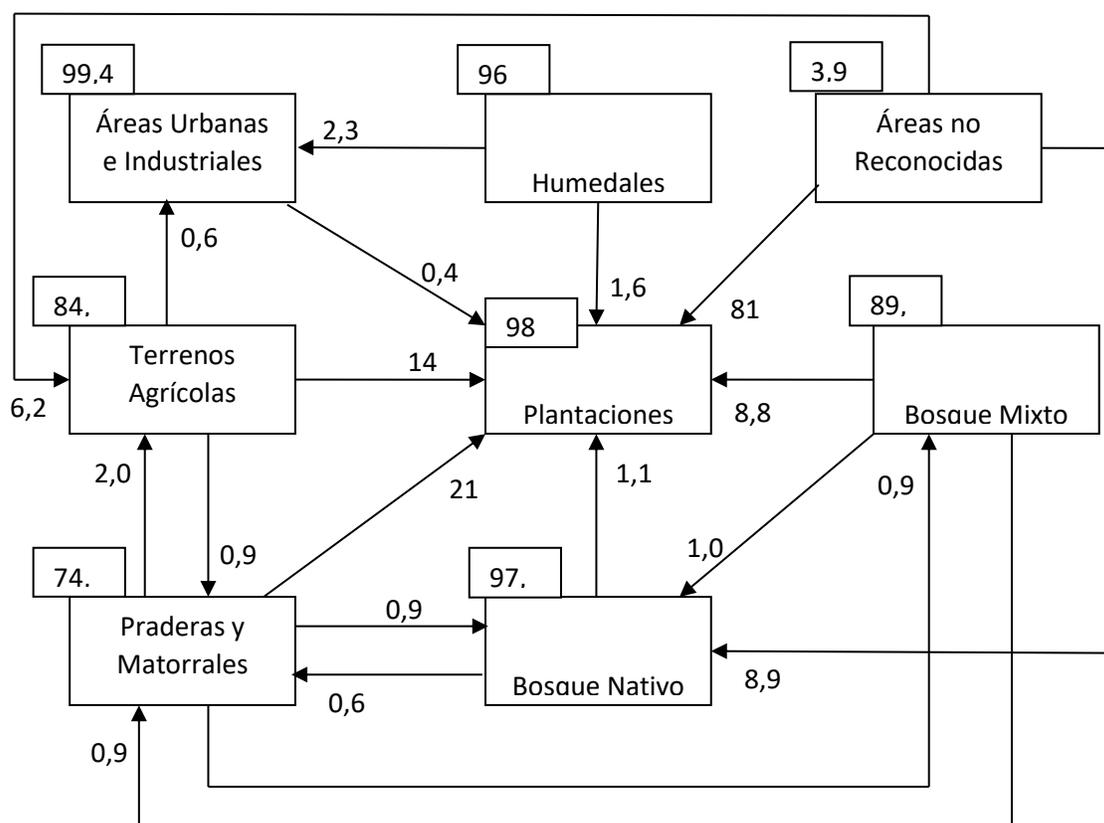


FIGURA 3: Dirección del cambio entre las diferentes coberturas de usos del suelo entre los años 1998 y 2008. Por una baja movilidad porcentual, no incluye las categorías: (6) Áreas desprovistas de vegetación, (7) Nieves y Glaciales y (8) Cuerpos de agua. Los valores en rectángulos pequeños corresponden a porcentaje de superficie que no experimentó cambios durante el periodo de estudio; por ejemplo, un 74,6 % de la superficie de Praderas y Matorrales se mantuvieron como tal en el periodo 1998 y 2008.

TABLA 3: Área (en hectáreas), porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo entre los años 1998 y 2008, en la Provincia de Arauco, Región del Bío Bío.

Tipos de Uso	1998		2008		Cambio		Tasa
	ha	%	ha	%	ha	%	Cambio Anual
1 Áreas Urbanas e Industriales	2.656,6	0,5	3.159,4	0,6	502,9	18,9	1,7

2 Terrenos Agrícolas	64.601,4	11,9	57.882,1	10,6	-6.719,2	-10,4	-1,1
3 Praderas y Matorrales	100.643,2	18,5	68.749,6	12,6	-31.893,6	-31,7	-3,8
4.1 Plantaciones	247.938,1	45,5	284.761,7	52,3	36.823,6	14,9	1,4
4.2 Bosque Nativo	94.781,0	17,4	95.081,7	17,5	300,7	0,3	0,0
4.3 Bosque Mixto	11.772,8	2,2	14.161,5	2,6	2.388,7	20,3	1,8
5 Humedales	5.232,3	1,0	5.162,5	0,9	-69,8	-1,3	-0,1
6 Áreas Desprovistas de Vegetación	7.563,3	1,4	6.239,5	1,1	-1.323,8	-17,5	-1,9
7 Nieves y Glaciares	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8 Cuerpos de Agua	9.281,9	1,7	9.272,4	1,7	-9,4	-0,1	0,0
9 Áreas No Reconocidas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	544.470,5		544.470,5				

Al analizar ambos Periodos en la Provincia de Arauco, podemos observar que el año 1998 las Plantaciones Forestales tienen el predominio del uso de la superficie (tabla 3), ocupando el 46 % del territorio de la Provincia, en un segundo lugar se encuentra las Praderas y Matorrales con un 18,5 %, seguido en porcentaje similar por el Bosque Nativo (17,4 %). El año 2008 continúa predominado la cobertura de uso Plantaciones, aumentando a 52,3 % con una tasa de crecimiento anual del 1,4 %, la superficie de Bosque Mixto presenta un pequeño incremento llegando a 2,6 % con una tasa de crecimiento anual del 1,8 %, la cobertura de uso asociada Praderas y Matorrales disminuyó (12,6 %) con una tasa decreciente anual de 3,8 %, el Bosque Nativo mantuvo su superficie en ambos periodos, las áreas urbanas en ambos periodos tienen baja representación respecto a la superficie total, sin embargo el año 2008 se produce un incremento con una tasa anual del 1,7 %, los Terrenos Agrícolas disminuyeron su superficie con una representación territorial del 10,6 % y una tasa negativa anual del 1,1 %.

TABLA 4: Área (en hectáreas), porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo entre los años 1998 y 2008 en la Provincia de Bío Bío, Región del Bío Bío.

Tipos de Uso	1998		2008		Cambio		Tasa
	ha	%	ha	%	ha	%	Cambio Anual

1 Áreas Urbanas e Industriales	4.763	0,3	7.900	0,5	3.137	65,9	5,1
2 Terrenos Agrícolas	350.264	23,3	292.354	19,4	-57.911	-16,5	-1,8
3 Praderas y Matorrales	275.839	18,3	241.341	16,0	-34.498	-12,5	-1,3
4.1 Plantaciones	302.862	20,1	393.933	26,2	91.071	30,1	2,6
4.2 Bosque Nativo	431.556	28,7	426.227	28,3	-5.329	-1,2	-0,1
4.3 Bosque Mixto	14.277	0,9	16.061	1,1	1.784	12,5	1,2
5 Humedales	1.389	0,1	1.389	0,1	0	0,0	0,0
6 Áreas Desprovistas de Vegetación	58.684	3,9	58.651	3,9	-33	-0,1	0,0
7 Nieves y Glaciares	42.856	2,8	42.632	2,8	-224	-0,5	-0,1
8 Cuerpos de Agua	22.765	1,5	24.938	1,7	2.172	9,5	0,9
9 Áreas No Reconocidas	177	0,0	8	0,0	-169	-95,4	-30,8
TOTAL	1.505.432		1.505.432				

En la provincia del Bío Bío el año 1998 (tabla 4) la principal cobertura de uso corresponde a Bosque Nativo con un 28,3 %, en segundo lugar, se encuentran los Terrenos Agrícolas con un 23 % y posteriormente se encuentra los usos asociados las Plantaciones Forestales (20,1 %) y Praderas y Matorrales con un 18,3 % respectivamente. Durante el año 2008 solamente presentaron un incremento positivo los usos relacionados con Áreas Urbanas e Industrial con una tasa anual de 5,1 % y las Plantaciones con una tasa de crecimiento del 2,6 % al año, el resto de los usos presentaron tasas de incremento negativas.

TABLA 5: Área (en hectáreas), porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo para los años 1998 y 2008 en la Provincia de Concepción, Región del Bío Bío.

Tipos de Uso	1998		2008		Cambio		Tasa
	ha	%	ha	%	ha	%	Cambio Anual
1 Áreas Urbanas e Industriales	12.746	3,7	16.213	4,7	3.468	27,2	2,4
2 Terrenos Agrícolas	52.961	15,3	38.497	11,1	-14.465	-27,3	-3,2
3 Praderas y Matorrales	47.406	13,7	34.669	10,0	-12.737	-26,9	-3,1
4.1 Plantaciones	174.445	50,4	198.959	57,5	24.514	14,1	1,3
4.2 Bosque Nativo	26.856	7,8	26.678	7,7	-177	-0,7	-0,1
4.3 Bosque Mixto	14.967	4,3	14.826	4,3	-142	-0,9	-0,1

5 Humedales	4.305	1,2	3.959	1,1	-346	-8,0	-0,8
6 Áreas Desprovistas de Vegetación	1.172	0,3	1.121	0,3	-51	-4,3	-0,4
7 Nieves y Glaciares	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0,0
8 Cuerpos de Agua	11.409	3,3	11.379	3,3	-30	-0,3	0,0
9 Áreas No Reconocidas	34	0,0	0	0,0	-34	-100,0	0,0
TOTAL	346.300		346.300				

En la Provincia de Concepción se presenta la misma tendencia que el resto de las Provincias, es decir, las únicas coberturas de uso del suelo que crecen, corresponden a las Áreas Urbanas e Industriales y Plantaciones Forestales, en este caso con tasas anuales de crecimiento del 2,4 % y 1,3 % respectivamente. Para el caso de los usos Terrenos Agrícolas y Praderas, y Matorrales las tasas de disminución territorial son bastante significativas, alrededor del 3,2 % (tabla 5).

TABLA 6: Área (en hectáreas), porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo para los años 1998 y 2008 en la Provincia de Ñuble, Región del Bío Bío.

Tipos de Uso	1998		2008		Cambio		Tasa
	ha	%	ha	%	ha	%	Cambio Anual
1 Áreas Urbanas e Industriales	5.638	0,4	8.413	0,6	2.775	49,2	4,0
2 Terrenos Agrícolas	497.318	38,0	440.775	33,7	-56.543	-11,4	-1,2
3 Praderas y Matorrales	213.275	16,3	153.737	11,7	-59.538	-27,9	-3,3
4.1 Plantaciones	233.452	17,8	350.134	26,7	116.682	50,0	4,1
4.2 Bosque Nativo	223.244	17,0	220.565	16,8	-2.678	-1,2	-0,1
4.3 Bosque Mixto	12.277	0,9	11.594	0,9	-683	-5,6	-0,6
5 Humedales	1.102	0,1	1.085	0,1	-16	-1,5	-0,2
6 Áreas Desprovistas de Vegetación	66.557	5,1	66.507	5,1	-50	-0,1	0,0
7 Nieves y Glaciares	47.836	3,7	47.836	3,7	0	0,0	0,0
8 Cuerpos de Agua	9.103	0,7	9.154	0,7	51	0,6	0,1
9 Áreas No Reconocidas	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0,0
TOTAL	1.309.800		1.309.800				

La Provincia de Ñuble ha experimentado un gran crecimiento en la cobertura de Plantaciones Forestales, pasando en la ocupación territorial de un 17,8 % el año 1998 a 26,7 % el año 2008, lo cual representa una tasa de incremento anual del 4,1 %, una tendencia similar presentó la cobertura de uso Áreas Urbanas e Industriales, pasando de 0,4 % el año 1998 a 0,6 % el 2008 con tasa de incremento anual del 4,0 %. Las tasas más relevantes con incremento negativo y por lo tanto con pérdida de cobertura de uso, la representan Praderas y Matorrales con tasas de disminución anual de 3,3 % y los Terrenos Agrícolas con 1,3 % (tabla 6).

En general al analizar las diferentes provincias se puede observar que tienen conductas similares en su predominio de las coberturas de usos, situación que no contrasta con lo observado a nivel Regional, las coberturas de uso Áreas Urbanas e Industriales y Plantaciones Forestales presentan tasas anuales de cambio en permanente incremento, por supuesto en desmedro de aquellas coberturas de uso fáciles de degradar como son los Terrenos Agrícolas, Praderas y Matorrales, Bosque Nativo y Bosque Mixto.

3.4 DISCUSIÓN

La tasa de crecimiento calculada de las Áreas urbanas e Industriales (3,2 % anual), difiere notablemente de la obtenida por CONAF (1999) de 1,5 %, en un periodo corto para los años 1994 y 1998, esto se debe principalmente a que la dinámica del territorio es distinta, sin embargo ésta es bastante similar (3,8 %) a la obtenida por Aguayo et al. (2009) en su estudio realizado en las Regiones de Bío Bío y La Araucanía, como así mismo las obtenidas también por Azocar et al. (2003, 2007) y Henríquez et al. (2006) para las ciudades de Chillan (3,1 %) y Los Ángeles (3,4 %).

La tasa de pérdida del bosque nativo (0,1 % anual) se aproxima bastante a las estimaciones obtenidas por CONAF (1999) en la Región del Bío Bío, en un periodo corto para los años 1994 y 1998 (0,3 %) y difiere de la obtenida por Aguayo et al. (2009) de (1,6 %), esta diferencia se justifica por la diferente extensión del territorio que se consideró para ambos estudios. Por otro lado, existen antecedentes relevantes que indican que la pérdida de bosque nativo a causa de la sustitución por plantaciones exóticas debe ir disminuyendo INFOR (2007). La tasa del

incremento de las plantaciones de especies exóticas, especialmente plantaciones de *Pinus radiata*, fueron de 2,5 %, con una tasa de cambio de 28,1 % cifras muy similares a las obtenidas por Nahuelhual et al. (2012) de un 22,8 % en periodos similares, la diferencia se justifica por un desfase en los periodos monitoreados y además el presente estudio incluye toda la Región, establece un refinamiento más preciso de los tipos de usos del territorio monitoreados y su ratificación de visitas en terreno con brigadas especializadas.

Según los antecedentes obtenidos se les atribuye a las empresas forestales la principal causa de la deforestación, situación que ha disminuido últimamente debido a que los remanentes de bosque nativo se encuentran en sectores de difícil acceso con fuertes pendientes, altitudes por sobre los 800 m, o al interior de áreas protegidas (ALTAMIRANO et al. 2010). Otros antecedentes que permiten avanzar en este sentido tienen relación con las conductas empresariales, debido a que desde el año 1997 comenzó un proceso de certificación de las empresas forestales, comprometiéndose éstas al manejo sustentable de los recursos forestales del país (LARA et al. 2002). Otro factor importante tiene relación con la promulgación de la nueva Ley de fomento y recuperación del bosque nativo, la cual incorpora incentivos económicos para los propietarios de bosques nativos (LARA et al. 2003).

Los terrenos agrícolas presentan una tasa de pérdida anual del 1,5 %, las principales causas se relacionan con el alto subsidio estatal que incentiva a los propietarios a la habilitación de estos tipos de usos para la actividad forestal y en un porcentaje menor hacia la expansión de las ciudades. Estudios previos en la Región del Bío Bío (CONAF, 1999) indican que la tasa de pérdida de los terrenos agrícolas alcanza un 1,3 % anual, lo cual es muy coincidente con el estudio actual.

Las Praderas y Matorrales presentaron una tasa de pérdida de 2,5 % anual, las causas principales se deben entre otras a los incentivos estatales, produciéndose una habilitación de superficie de este tipo de uso hacia los Terrenos Agrícolas y otra parte importante habilitada directamente hacia la actividad forestal, atraídos los propietarios por los subsidios estatales (SANHUEZA y AZÓCAR 2000), situación que permite además que los terrenos agrícolas también se transformen para el uso

forestal. Estudios anteriores en la Región (CONAF, 1999), donde se consideró un periodo entre los años 1994 y 1998, indican una tasa de crecimiento anual del 1,3 %, esto se debe a que la intervención del Bosque Nativo es habilitado en grandes extensiones para uso de praderas y posteriormente pasan a plantaciones, situación similar ocurre con el Bosque Mixto.

3.5 CONCLUSIONES

El uso de las coberturas de ambos periodos permitió construir indicadores que explican el cambio de los diferentes usos del suelo, permitiendo revelar a nivel Regional que ha existido una sobre ocupación del territorio con plantaciones forestales con especies exóticas de Pino y Eucaliptus, con una ocupación actual de 1.227.788 ha y una tasa de incremento anual de 2,5 %, en desmedro de los usos Praderas y Matorrales, Terrenos Agrícolas, Bosque Nativo, Bosque Mixto y Humedales.

Respecto a la dinámica del cambio del uso del suelo que se produce a nivel provincial, se pudo determinar que las cuatro provincias mantienen las mismas conductas del cambio y coincidente con las observadas a nivel Regional, es así, como en la Provincia de Arauco el 52,3 % del territorio se está ocupado por Plantaciones Forestales con una tasa de incremento anual de 1,4 %, haciendo uso principalmente de áreas desprovistas de vegetación y terrenos agrícolas. Otro caso excepcional corresponde a la Provincia de Concepción, con el porcentaje de uso del territorio y la tasa de incremento anual de 57,5 % y 1,3 % respectivamente.

Debido a la alta actividad de las empresas forestales en la Región, se genera una fragmentación y degradación de los Bosques Nativos que están quedando y ocupación de terrenos agrícolas. Generando presiones a los pequeños propietarios en la reconversión en el uso del suelo con plantaciones exóticas de rápido crecimiento, maximizada por las bonificaciones que realiza el Estado a este tipo de uso de la tierra.

3.6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en forma especial al Laboratorio de Geomática de la Universidad Austral de Chile por permitir procesar la información de las coberturas vegetativas de la Región estudiada, también a la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF) y a la Dirección de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Austral de Chile.

3.7 REFERENCIAS

AGUAYO, M. et al. 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**, Santiago, v.82, n.3, p. 361-374, 2009.

ALTAMIRANO, A.; LARA, A. Deforestación en ecosistemas templados de la precordillera andina del centro-sur de Chile. **Revista Bosque**, Valdivia, v.31, n.1, p. 53-64, 2010.

ALVES, D. S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, Singapore, v.23, n.14, p. 2903-2908, 2002.

ARCGIS. **Getting Started with ArcGIS**. USA. 2001. 253 p.

AZÓCAR, G. et al. Urbanization patterns and their impacts on social restructuring of urban space in Chilean mid-cities: The case of Los Ángeles, central Chile. **Land Use Policy**, Adelaide, v. 24, n. 1, p. 199-21, 2007.

AZÓCAR, G.; SANHUEZA, R.; HENRÍQUEZ, C. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. **EURE**, Santiago, v. 29, n. 87, p. 79-82, 2003.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). **Catastro y evaluación de recursos vegetacionales de Chile. Informe regional Octava Región**. Santiago: Ministerio de Agricultura, 1999. 130 p.

DEZZEO, A. A.; SENDRA, J. B. Cambios ocurridos en la cobertura/uso de la tierra del parque nacional sierra de la culata. Mérida-Venezuela. Período 1988-2003. **Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, Barcelona, v.7, n. 8., 2008. Disponible en: http://web-facstaff.sas.upenn.edu/~dromano/classes/gis/files/Getting_Started_with_ArcGIS.pdf

ECHEVERRÍA, C. et al. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. **Biological conservation**, Montpellier, v. 130, n. 4, p. 481-494, 2006.

ECHEVERRÍA, C. et al. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. **Ecological Modelling**, Maryland, v. 212, n. 3, p. 439-449, 2008.

HENRÍQUEZ, C.; AZÓCAR, G.; ROMERO, H. Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. **Habitat International**, California, v. 30, n. 4, p. 945-964, 2006.

INSTITUTO FORESTAL (INFOR). **Boletín Estadístico: Estadísticas Forestales**. Santiago: Ministerio de Agricultura, 2007. 163 p.

INSTITUTO FORESTAL (INFOR). **Boletín Estadístico: Estadísticas Forestales**. Santiago: Ministerio de Agricultura, 2008. 161 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). **Boletín Estadístico: Estadísticas de Chile**. Santiago: Ministerio de Economía, 2002. 204 p.

LAMBIN, E. et al. Land use and land cover change implementation strategy, IGBP report, 48, IHDP, report 10, Estocolmo, 1999.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J.; LEPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual review of environment and resources**, California, v. 28, n. 1, p. 205-241, 2003.

LARA, A. et al. **Componentes científicos clave para una política nacional sobre usos, servicios y conservación de los bosques nativos chilenos**. Valdivia: Universidad Austral de Chile, Iniciativa Científica Milenio de Mideplan. 2003. 135 p.

LARA, A.; ECHEVERRÍA, C.; REYES, R. Bosques nativos. Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile eds. Informe País. Estado del Medioambiente en Chile. Santiago, Chile, p. 127-160, 2002.

NAHUELHUAL, L. et al. Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. **Landscape and Urban Planning**, Michigan, v. 107, n. 1, p. 12-20, 2012.

PUYRAVAUD, J. P. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. **Forest Ecology and Management**, Sydney, v. 177, n. 1, p. 593-596, 2003.

RUDEL, T. K. et al. Forest transitions: towards a global understanding of land use change. **Global Environmental Change**, Victoria, v. 15, n. 1, p. 23-31, 2005.

SALA, O. E. et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *science*, Washington DC, 287(5459), p. 1770-1774, 2000.

SANDOVAL, V. **Manual de Operaciones en Terreno, monitoreo del uso del suelo en Chile**. Valdivia: Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Geomática. 2008. 65 p.

SANDOVAL, V.; REAL, P. Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. **Revista Bosque**, Valdivia, v. 26, n. 1, p. 55-63, 2005.

SANHUEZA, R.; AZÓCAR, G. Transformaciones ambientales provocadas por los cambios económicos de la segunda mitad del siglo XIX; provincia de Concepción. **Revista Geográfica de Chile Terra Australis**, Santiago, 45, p. 181-194, 2000.

SHEERAN, K. A. Forest conservation in the Philippines: A cost-effective approach to mitigating climate change? **Ecological Economics**, New Hampshire, v. 58, n. 2, p. 338-349, 2006.

TURNER, B. L.; LAMBIN, E. F.; REENBERG, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Washington DC, 104(52), 20666-20671, 2007.

VERGARA G.; SANDOVAL, V. Manual del usuario del sistema de actualización del monitoreo nacional del uso del suelo en Chile. Valdivia, Chile. 2010. 55 p. Visitado el: 17 de enero de 2015.

***CAPÍTULO IV ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIAL DE
BIOMASA AÉREA Y CAPTURA DE
CARBONO EN BOSQUES NATIVOS AL SUR
DE CHILE: COMUNA DE VALDIVIA***

CAPÍTULO IV

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

Artículo

ESTIMATION AND SPATIAL ANALYSIS OF AERIAL BIOMASS AND CARBON
CAPTURE IN NATIVE FORESTS IN THE SOUTH OF CHILE: COUNTY OF
VALDIVIA

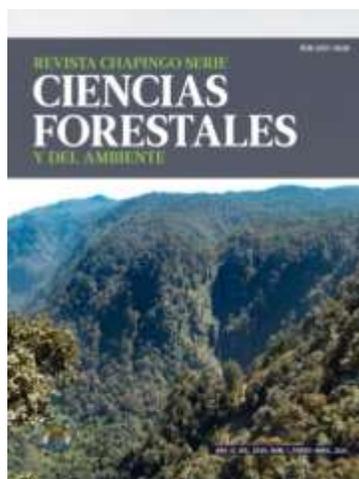
Autores:

Gastón Vergara-Díaz, Víctor A. y Miguel A. Herrera-Machuca

Publicado en: **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**

Año 2021, Volumen 27, número 1, pp. 53-71

DOI: 10.5154/r.rchscfa.2020.01.002



Indexada en:

WoS (Science Citation Index, SCImago Journal Rank, SJR)

ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIAL DE BIOMASA AÉREA Y CAPTURA DE CARBONO EN BOSQUES NATIVOS AL SUR DE CHILE: COMUNA DE VALDIVIA

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⁻¹. 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.

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

4.1 INTRODUCCIÓN

Concentraciones importantes de gases de efecto invernadero en la atmósfera, incluidos el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), 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 CO₂ representaban en promedio 1.52 Gg·año⁻¹, lo cual corresponde a las emisiones de la deforestación de 4.04 Gg·año⁻¹, contrarrestadas por la absorción neta en el bosque de -2.52 Gg·año⁻¹ (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⁻¹; y las emisiones netas de carbono, debido a la deforestación, variaron de 4.68 Gg·año⁻¹ (1991-2000) a 3.95 Gg·año⁻¹ (2001-2010) y, finalmente, a 2.94 Gg·año⁻¹ (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 CO₂; 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 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 CO₂ (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.

4.2 Material 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⁻¹. 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 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 ≥ 2 m y cobertura de copas ≥ 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).

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.

Tipo forestal	Subtipo forestal	Presencia de especies	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 = bosque de estructura renoval; BA = bosque de estructura adulto; BR = bosque de estructura adulto-renoval; KA = bosque de estructura achaparrado.

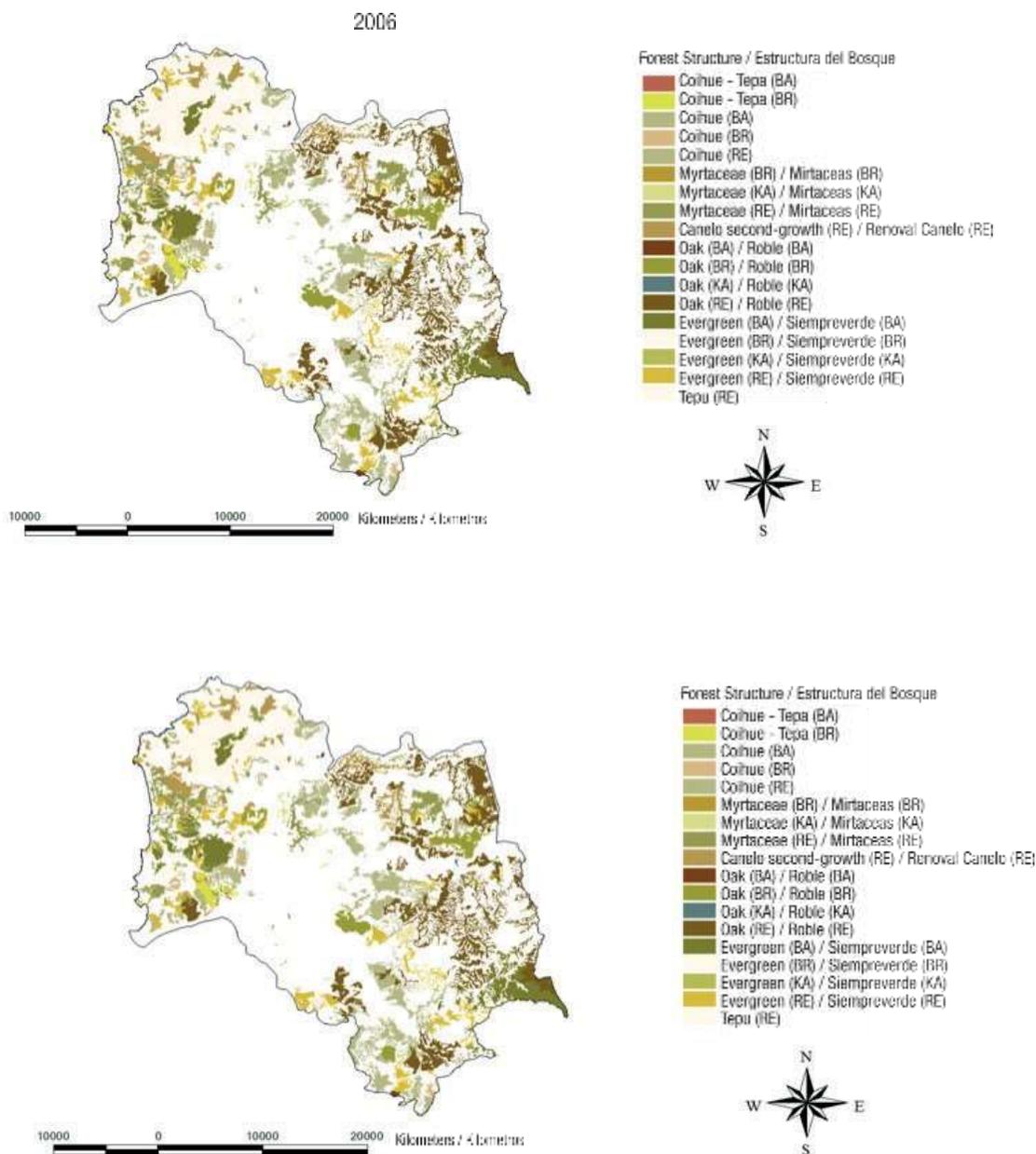


Figura 1. Distribución espacial de las estructuras de bosque en los años 2006 y 2013 en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.

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 [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 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 en una submuestra donde se establecieron las parcelas permanentes (McRoberts, Tomppo, & Czaplewski, 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).

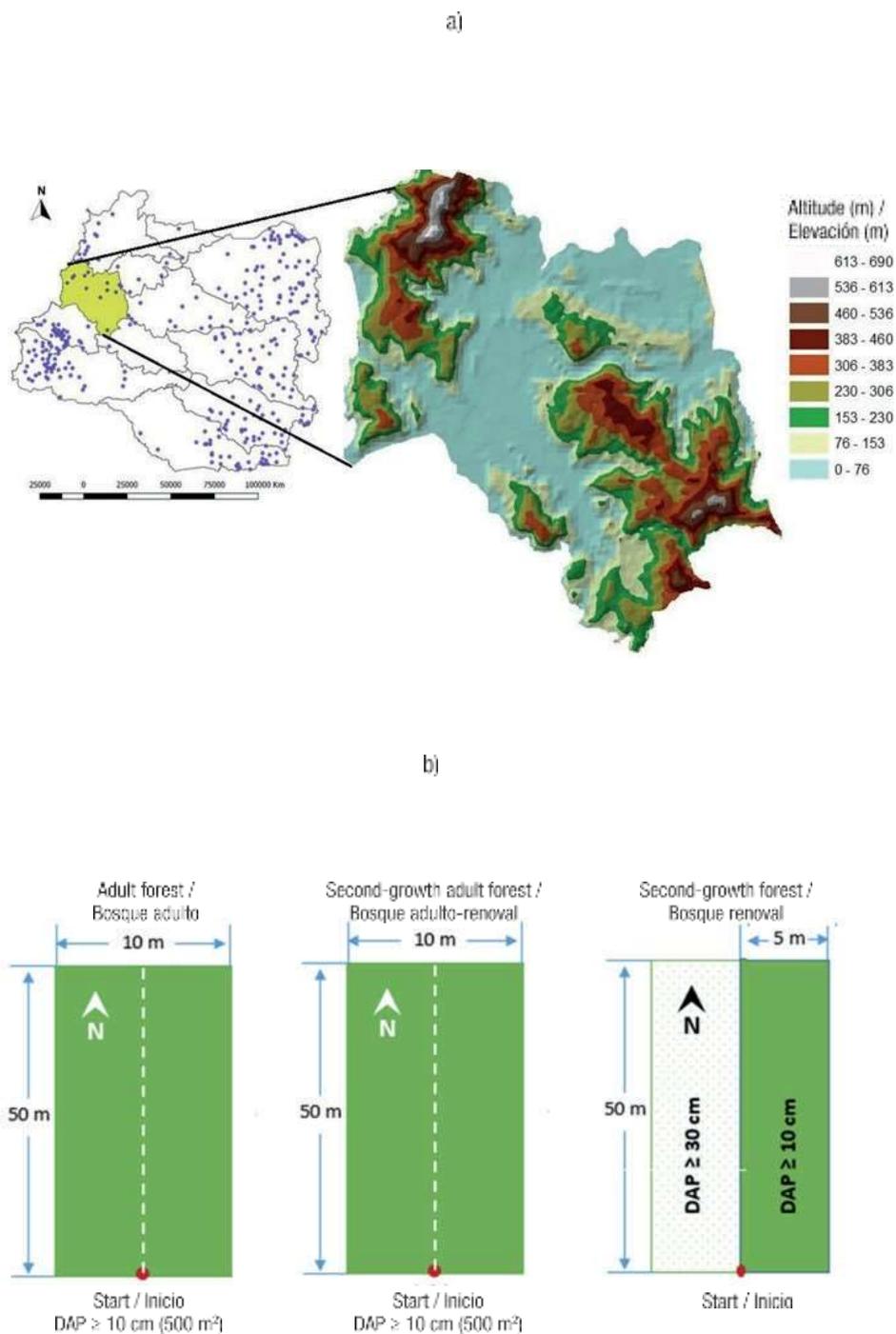


Figura 2. a) Distribución de parcelas en el área de estudio región de Los Ríos y b) tamaño de parcelas y forma de medición según la estructura del bosque.

En las parcelas de 500 m², 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.

Bases 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 (kg MS·ha⁻¹). El resultado final se dividió entre 1 000 para obtener la BA en Mg MS·ha⁻¹. El contenido de carbono se obtuvo multiplicando el contenido de BA por 0.5 (Mg C·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.

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)]
	<i>Caldcluvia paniculata</i> (Cav.) D. Don (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: 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 – Raulí – Coigüe; b: ecuación alométrica no disponible para la especie, se usó ecuación común para estimar BA ajustada para el tipo forestal Siempreverde.

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:

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

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 .

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

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,

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

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

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.

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_G se constituye como el resultado.

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.

4.3 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⁻¹. 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 m²·ha⁻¹.

Cuadro 3. Características de las especies en estudio en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.

Especie	DAP (cm)	Altura total (m)	Altura comienzo de copa (m)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Densidad (árbol ha ⁻¹)	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: diámetro a la altura del pecho. ± Error estándar de la media con intervalo de confianza de 95 %. *Árboles muertos de especie no identificada.

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

renoval y Coihue renoval con 52.5 y 33.9 %, respectivamente.

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.

Tipo Forestal	Subtipo y Estructura	2006			2013		
		Superficie (ha)	Biomasa Aérea (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Superficie (ha)	Biomasa Aérea (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
Roble - Rauli - Coihue	Coihue (Renoval)	6,017	119.28	59.64	6,016	119.26	59.63
	Roble (Adulto)	79	2.23	1.12	79	2.23	1.12
	Roble (Adulto-Renoval)	1,625	45.35	22.68	1,625	45.35	22.68
	Roble (Achaparrado)	12	0.12	0.06	12	0.12	0.06
	Roble (Renoval)	8,987	186.04	93.02	8,919	184.64	92.32
Coihue - Rauli - Tepa	Coihue (Adulto)	643	46.87	23.43	643	46.84	23.42
	Coihue (Adulto-Renoval)	440	21.65	10.82	440	21.65	10.82
	Coihue-Tepa (Adulto)	27	1.34	0.67	27	1.34	0.67
	Coihue-Tepa (Adulto-Renoval)	425	18.77	9.38	426	18.81	9.40
Siempreverde	Renoval Canelo (Renoval)	2,606	81.29	40.65	2,599	81.05	40.52
	Tepu (Renoval)	601	21.99	10.99	601	21.99	10.99
	Mirtaceas (Adulto-Renoval)	35	0.77	0.39	35	0.77	0.39
	Mirtaceas (Achaparrado)	224	2.29	1.15	224	2.29	1.15
	Mirtaceas (Renoval)	2,916	54.43	27.21	2,927	54.63	27.31
	Siempreverde (Adulto)	3,480	151.33	75.66	3,461	150.50	75.25
	Siempreverde (Adulto-Renoval)	7,176	341.40	170.70	7,141	339.76	169.88
	Siempreverde (Achaparrado)	10	0.10	0.05	10	0.10	0.05
	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

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.

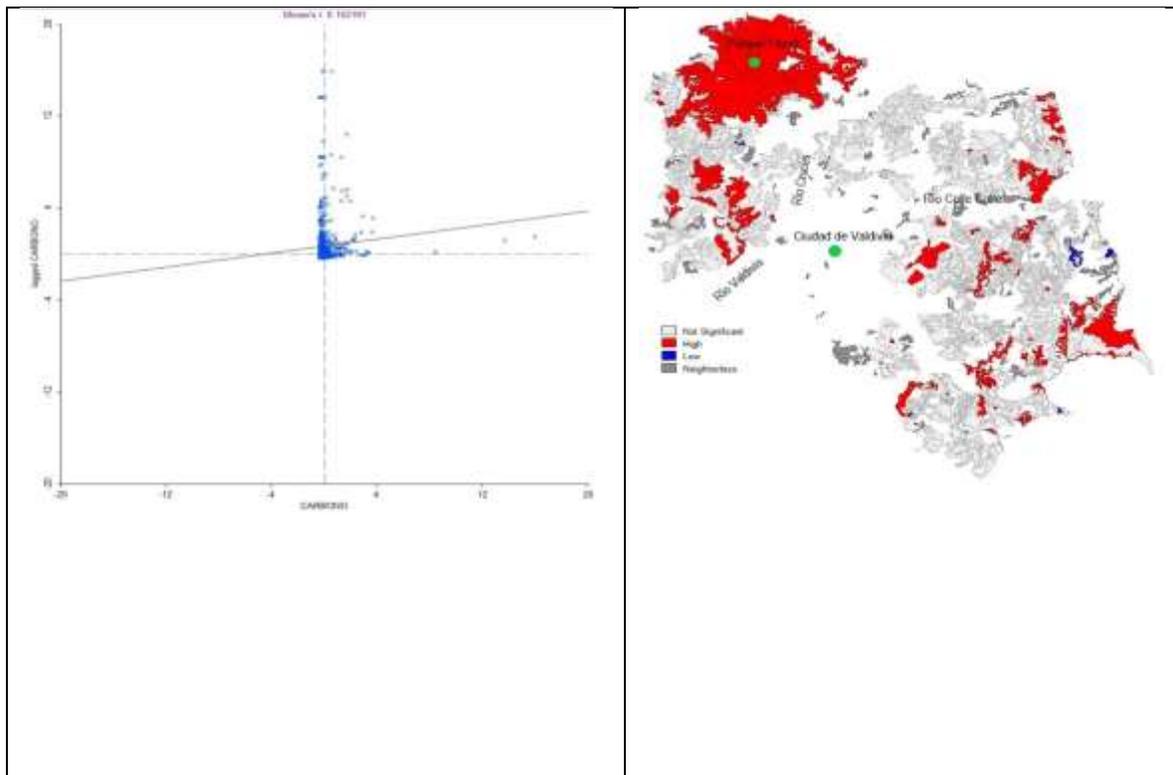
Cuadro 5. Área, porcentaje y tasa de cambio de coberturas de uso de suelo entre los años 2006 y 2013, en la comuna de Valdivia, región de Los Ríos, Chile.

Tipos de usos	2006		2013		Tasa (%)	Pérdida (ha)	Ganancia (ha)	Cambio (ha)
	(ha)	(%)	(ha)	(%)				
Áreas urbanas e industriales	2 496	2.4	2 619	2.6	0.7	0	123	123
Terrenos agrícolas	901	0.9	901	0.9	0.0	0	0	0
Praderas y matorrales	18 872	18.4	18 288	17.9	-0.4	613	29	-584
Plantaciones forestales	24 452	23.9	25 063	24.5	0.4	7	618	611
Bosque nativo	38 466	37.6	38 339	37.5	0.0	127	0	-127
Bosque mixto	6 128	6.0	6 106	6.0	-0.1	23	0	-23
Humedales	5 136	5.0	5 136	5.0	0.0	0	0	0
Áreas sin vegetación	91	0.1	91	0.1	0.0	0	0	0
Cuerpos de agua	5 747	5.6	5 747	5.6	0.0	0	0	0
Total	102 289	100.0	102 289	100.0				

Patrones espaciales

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



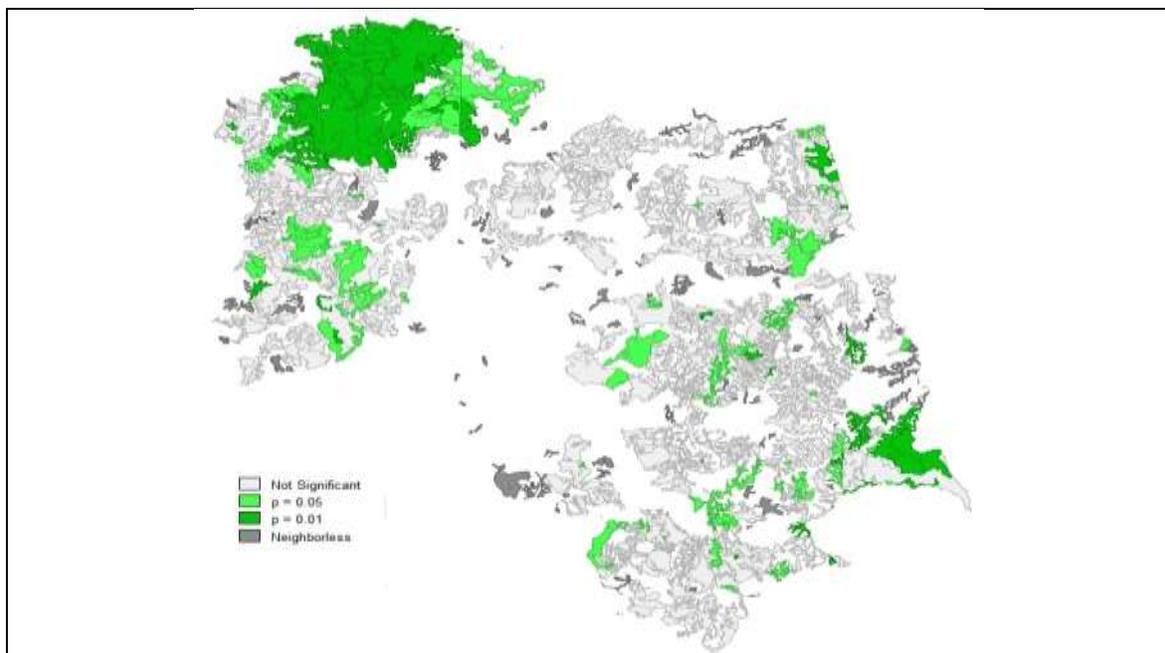


Figura 3. Formación de *cluster* territorial con contenido de carbono en coberturas de bosques nativos en la comuna de Valdivia, Chile: a) índice de Moran global, b) mapa de *cluster* del índice G, c) mapa del índice G con niveles de significancia del *cluster*.

4.4 DISCUSIÓN

Contenido de carbono

Se identificaron tres tipos forestales Roble-Raulí-Coihue, Coihue-Raulí-Tepa, y Siempreverde, con un contenido de $599.6 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$. El tipo forestal predominante fue Siempreverde con $379.5 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ y el de menor representación correspondió al tipo Coihue-Raulí-Tepa con $44.3 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$. 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, 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 3 400 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 Llenehue 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).

4.5 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 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.

4.6 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.

4.7 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 comunidades y cambio climático. Retrieved from 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
- 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
- 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
- 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. Desktop10. 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 CO₂ 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
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). *Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing?* (2nd. 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
- 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

- 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., & Maser, 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_oportu

nidad_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

CAPÍTULO V DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN GENERAL

El objetivo general de la tesis ha sido analizar el cambio espacial y temporal del uso del suelo en la región de los Ríos y su efecto en el paisaje, considerando además una región centro sur, altamente poblada e industrializada y con las tasas de forestación más altas del país, todo mediante análisis geoespacial. El análisis geoespacial es realizado a través de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y softwares específicos como el programa Geoda utilizado en las publicaciones que constituyen la tesis (Anselin *et al.*, 2006; 2010; Bivand & Wong, 2018, Anselin, 2019).

Las técnicas geoespaciales y la aplicación de los distintos algoritmos han permitido determinar los tipos de distribución que presentan los polígonos con sus diferentes usos (Plantaciones forestales, disminución de humedales, intervención de los bosques nativos y el contenido de carbono en la biomasa área de los bosques nativos) y la formación de clústeres en el territorio. Todo lo anterior relacionado además con los fenómenos antrópicos y alteraciones del paisaje que se han estado generando en los últimos años en la zona sur de Chile.

Como el objetivo general de la tesis ha sido analizar los cambios de uso del suelo que se generan en el territorio, específicamente la región de Los Ríos al sur de Chile y además la región del Bío-Bío en el centro sur. Se han tenido que utilizar diferentes técnicas de análisis geoespaciales. El objetivo general se puede descomponer de manera realista entre objetivos específicos:

- a) Análisis de la distribución espacial de cambios de uso del suelo en dos regiones del centro sur de Chile.
- b) Generar matrices de transición de cambio uso del suelo aplicando álgebra de mapas para los periodos, cuantificando las transferencias, ganancias y pérdidas de los diferentes usos.
- c) Para el tipo de uso de bosques nativos, realizar una estimación y representación espacial de la biomasa aérea y captura de carbono.

En relación con el primer objetivo específico (Análisis de la distribución espacial de cambios de uso del suelo en dos regiones del centro sur de Chile), se ha desarrollado en dos casos concretos: El primero considerando en términos globales la región del Bío-Bío en dos periodos, donde se hizo un análisis macro de la región y posteriormente se hace los cálculos a nivel de provincias, incluyendo un análisis comparativo entre ellas y la región. En segundo lugar, en la región de Los Ríos se realiza un análisis espacial también en dos periodos, particularizando el estudio a una zona con presencia de una planta de celulosa, se analizan los nueve tipos usos descritos en el territorio y se enfatiza en el efecto que han tenido las plantaciones forestales industriales, calculando y determinando que la distribución espacial que presenta este tipo de uso a través de todo el territorio.

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico (Generar matrices de transición de cambio uso del suelo aplicando algebra de mapas para los periodos, cuantificando las transferencias, ganancias y pérdidas de los diferentes usos), y con el propósito de cumplir con la descripción del cambio de uso del suelo tanto en la región del Bío-Bío como en la región de Los Ríos, se construyeron matrices de transición que explican la evolución que han tenido en el periodo los distintos tipos usos analizados en el territorio, detallando para cada tipo de uso del suelo los cálculos con las superficies de los usos que no han tenido movimiento, las superficies con las transiciones de ganancias y pérdidas de superficie, determinado cuales han sido los usos de suelo que más han ganado superficie y cuales han perdido en desmedro de aporte a otros usos.

Respecto al tercero y último objetivo específico (Para el tipo de uso de bosques nativos, realizar una estimación y representación espacial de la biomasa aérea y captura de carbono) se ha seleccionado dentro de la región de los Ríos la comuna de Valdivia, escogiendo para el estudio de distribución espacial solo el tipo de uso de bosques nativos, esta información se ha combinado con datos provenientes de parcelas permanentes y a través de la aplicación de ecuaciones alométricas (Milla, et al., 2013) se calculó la biomasa aérea y el contenido de carbono, información

que se distribuyó en los diferentes tipos forestales y estructuras de bosques, para determinar el nivel de autocorrelación espacial se aplicó el estadístico G de Getis-Ord, obteniendo finalmente los mapas con los clústeres de la distribución espacial del carbono en el territorio.

Los artículos que constituyen la Tesis se centran en uno o más objetivos específicos presentados previamente. Las conclusiones extraídas de cada uno de los artículos que componen la Tesis son expuestas a continuación:

Spatial distribution of forest plantations insouthern Chile, an area with a pulp mil

El propósito de la primera publicación ha sido describir el uso del suelo de plantaciones forestales de pino y eucalipto en una zona al sur de Chile con presencia de una planta de celulosa. Para su cumplimiento, se han construido indicadores espaciales locales que establecen la relevancia de los polígonos de plantaciones con similitudes en su entorno.

En primer lugar, el análisis geoespacial que utiliza el índice de Moran global, indica que la distribución de las plantaciones de especies exóticas como *P. radiata* y *Eucalyptus* en una zona al sur de Chile, y con presencia de una planta de celulosa, es aleatoria. Al interior del territorio se forman conglomerados de polígonos con distinta forma y tamaño, además de fragmentos de superficies con plantaciones de diferente magnitud y sin vecindad.

En segundo lugar, tenemos que la dinámica del cambio de uso del suelo en el periodo 2006-2013 indicó que las plantaciones forestales presentaron el mayor incremento (6,578 ha) en desmedro de la superficie del bosque nativo y praderas-matorrales.

Por último, es necesario hacer notar que las técnicas geoespaciales usadas en la investigación generan información relevante para las instituciones encargadas de la protección de los bosques y aplicación de la legislación.

Temporal and spatial analysis of land use change in the south central region of Chile

El objetivo de esta segunda publicación ha consistido en evaluar en una escala espacial y temporal la dinámica de los cambios de uso del suelo ocurridos en la Región del Bio-Bio en el centro-sur de Chile, por ser la más poblada e industrializada y presentar las tasas de forestación más alta del país. Para alcanzar lo planteado se han construido indicadores que describen los cambios de la cobertura de uso del suelo en la región. Por otro lado, se realiza un análisis de los cambios de la cobertura de uso del suelo a nivel regional y provincial.

En primer lugar, los indicadores permitieron revelar que a nivel regional ha existido una sobreocupación del territorio con plantaciones forestales con especies exóticas de *P. radiata* y *Eucalyptus*, con una ocupación actual de 1.227.788 ha y una tasa de incremento anual de 2,5 %, en desmedro de los usos praderas y matorrales, terrenos agrícolas, bosque nativo, bosque mixto y humedales.

En segundo lugar, la dinámica del cambio del uso del suelo que se produce a nivel provincial ha revelado que las cuatro provincias mantienen las mismas conductas del cambio y coincidente con las observadas a nivel regional, es así, como en la provincia de Arauco el 52,3 % del territorio se está ocupado por plantaciones forestales con una tasa de incremento anual de 1,4 %. Otro caso excepcional corresponde a la provincia de Concepción, con el porcentaje de uso del territorio y la tasa de incremento anual de 57,5 % y 1,3 % respectivamente.

Como último aspecto, debido a la alta actividad de las empresas forestales se genera presión hacia la ocupación de terrenos agrícolas, y una fragmentación y degradación de los pocos bosques nativos que están quedando en la región. Se generan presiones a los pequeños propietarios hacia la reconversión del uso del suelo con plantaciones exóticas de rápido crecimiento, alimentada por las bonificaciones que realiza el gobierno hacia este tipo de uso de la tierra.

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

Esta última publicación se enfoca principalmente en la estimación la biomasa aérea y contenido de carbono en bosques nativos de la comuna de Valdivia, utilizando funciones alométricas. Las técnicas de estadística espacial se usaron para determinar el grado de agrupación de los polígonos con contenido de carbono.

En primer lugar, 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 segundo lugar, 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.

El estudio 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.

LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una de las posibles limitaciones de observar en la Tesis sería la cantidad de periodos observados para estudiar la dinámica del cambio de uso de la tierra, lo cual no permite obtener alguna tendencia conductual de los futuros cambios que tendrían diferentes usos del suelo. En esta dirección, y atendiendo futuras líneas de investigación sería necesario incluir una serie de periodos y con una temporalidad menor lo que permitiría realizar un análisis más completo en el tiempo.

Para completar futuras líneas de investigaciones, se podrían aplicar otras técnicas multivariadas que incluyan no solo el cambio de uso del suelo, sino variables como distancias a caminos, distancias a pueblos y ciudades, presencia de industrias forestales, el desarrollo turístico, planificación territorial, variables de actividad económica y social de las personas del entorno. En esta investigación se ha optado por un análisis descriptivo del cambio de uso del suelo, sin embargo,

investigaciones futuras podrían incluir el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un cambio de uso del suelo dada ciertas condiciones, para lo cual se pueden construir modelos logit y/o probit (Wang, *et al.*, 2014; Chakir, & Parent, 2009; Choe, *et al.*, 2020; Delle Site, *et al.*, 2019) capaces de estimar y predecir la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno. Al disponer de una serie de periodos, será posible crear escenarios futuros del cambio de uso del suelo aplicando de manera combinada Cadenas de Markov y Autómatas celulares (Behera, *et al.*, 2012; Hyandye, & Martz, 2017; da Cunha, *et al.*, 2021; Wu, *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES GENERALES

Las conclusiones particulares de cada publicación atienden de manera exclusiva los objetivos planteados en cada una de ellas, sin embargo, las conclusiones podrían ampliarse en un sentido universal asociadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) acordados en la Agenda 2030 por la Naciones Unidas, atendiendo aquellos que se relacionan principalmente con el cambio de uso del suelo, la sostenibilidad de los recursos forestales y su efecto en paisaje.

En especial en la zona sur de Chile es indispensable tener prácticas adecuadas del cambio uso del suelo, generando sostenibilidad de los recursos forestales asociados al bosque nativo, humedales, ríos, lagos. En forma especial en zonas donde viven pueblos indígenas y pequeños agricultores, asentados en los bosques o muy cerca de ellos, donde los bosques y los árboles constituyen su fuente principal de ingresos, convirtiéndose en un medio de subsistencia y bienestar, por ejemplo, seguridad alimentaria aportando diversidad de dieta, plantas medicinales, forraje para los animales, madera para construcción y combustible entre otros.

Mantener y gestionar los ecosistemas terrestres a través de un adecuado uso del suelo y la conservación de los bosques nativos les permitirán a las comunidades que viven en su entorno y la población en general, garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua de calidad. Los bosques son indispensables en el ciclo del agua, son los que permiten la regulación de los caudales hídricos, favorecen la recarga de las aguas subterráneas y, a través de la evapotranspiración contribuyen a la formación de nubes y las precipitaciones.

Otra conclusión importante en la misma línea del ODS anterior se relaciona con la comprensión y ordenación de los bosques, reconociendo en éstos un papel fundamental en la purificación natural del agua, reduciendo la erosión del suelo y el traslado de sedimentaciones de grandes masas de agua. Es necesario reconocer en los bosques el servicio ecosistémico relacionado con el agua y su función fundamental para la conservación en el centro sur de Chile.

Se hace cada vez más urgente la conservación de los bosques, debido a que los ecosistemas forestales cumplen una función muy importante en el ciclo global del carbono, almacenando grandes cantidades de vegetación e intercambiando este elemento con la atmósfera a través de la fotosíntesis, respiración, degradación y descomposición, contribuyendo de esta forma a la mitigación de los efectos del cambio climático y sus efectos, secuestrando grandes cantidades de carbono en su biomasa. Logrando así disponer de ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Altamirano, A., Miranda, A., Aplin, P., Carrasco, J., Catalan, G., Cayuela, L., ... & Di Bella, C. (2020). Natural forests loss and tree plantations: large-scale tree cover loss differentiation in a threatened biodiversity hotspot. *Environmental Research Letters*, 15(12), 124055.
- Alvarez-Garreton, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. <https://doi.org/10.3390/f10060473>
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- 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
- Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2010). GeoDa: an introduction to spatial data analysis. In *Handbook of applied spatial analysis* (pp. 73-89). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-642-03647-7
- Anselin, L. (2019). A local indicator of multivariate spatial association: extending Geary's C. *Geographical Analysis*, 51(2), 133-150. <https://doi.org/10.1111/gean.12164>
- Azadi, H., Taheri, F., Burkart, S., Mahmoudi, H., De Maeyer, P., & Witlox, F. (2021). Impact of agricultural land conversion on climate change. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3187-3198. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00712-2>
- Baude, M., Meyer, B. C., & Schindewolf, M. (2019). Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem

services. *Science of the Total Environment*, 659, 1526-1536.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.455>

Becerra-Rodas, C., Little, C., Lara, A., Sandoval, J., Osorio, S., & Nimptsch, J. (2019). The role of streamside native forests on dissolved organic matter in forested and agricultural watersheds in northwestern Patagonia. *Forests*, 10(7), 595. <https://doi.org/10.3390/f10070595>

Behera, M., Borate, S., Panda, S., Behera, P., & Roy, P. (2012). Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA)–Markov model–A geo-information based approach. *Journal of earth system science*, 121(4), 1011-1024. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0207-5>.

Bivand, R. S., & Wong, D. W. (2018). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *Test*, 27(3), 716-748.
<https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>

Bühne, H. S., Tobias, J. A., Durant, S. M., & Pettorelli, N. (2021). Improving Predictions of Climate Change–Land Use Change Interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(1), 29-38.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.019>

Chakir, R., & Parent, O. (2009). Determinants of land use changes: A spatial multinomial probit approach. *Papers in Regional Science*, 88(2), 327-344. doi:10.1111/j.1435-5957.2009.00239.x

Chishugi, D. U., Sonwa, D. J., Kahindo, J. M., Itunda, D., Chishugi, J. B., Félix, F. L., & Sahani, M. (2021). How climate change and land use/land cover change affect domestic water vulnerability in Yangambi Watersheds (DR Congo). *Land*, 10(2), 165. <https://doi.org/10.3390/land10020165>

Choe, C., Jung, S., & Oaxaca, R. L. (2020). Identification and decompositions in probit and logit models. *Empirical Economics*, 59(3), 1479-1492.

- da Cunha, E., Santos, C., da Silva, R., Bacani, V., & Pott, A. (2021). Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Land Use Policy*, 101, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105141>
- Delle Site, P., Kilani, K., Gatta, V., Marcucci, E., & de Palma, A. (2019). Estimation of consistent Logit and Probit models using best, worst and best–worst choices. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 87-106.
- Echeverria, C., Coomes, D. A., Hall, M., & Newton, A. C. (2008). Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. *Ecological Modelling*, 212(3-4), 439-449.
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological conservation*, 130(4), 481-494.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2016). Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing?. Second Edition. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i4793e.pdf>
- Food and Agriculture Organization (FAO) and United Nations Environmental Programme (UNEP). (2020). The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome. Obtenido de <https://www.fao.org/3/ca8642en/ca8642en.pdf>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2018). The State of the World's Forests 2018 - Forest pathways to sustainable development. Rome. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i9535en/i9535en.pdf>
- Habibullah, M. S., Din, B. H., Tan, S. H., & Zahid, H. (2021). Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8>

- Hasan, S. S., Zhen, L., Miah, M. G., Ahamed, T., & Samie, A. (2020). Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 34, 100527. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100527>
- Hooke, R. L., Martín Duque, J. F., & Pedraza Gilsanz, J. D. (2012). Land transformation by humans: a review. *GSA today*, 22(12), 4-10.
- Hyandye, C., & Martz, L. (2017). A Markovian and cellular automata land-use change predictive model of the Usangu Catchment. *International Journal of Remote Sensing*, 38(1), 64-81. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259675>
- 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
- Jensen, M. (2021). Transformación de los sistemas alimentarios en Chile: cambio en el uso de suelo y comercio internacional. *Estudios internacionales (Santiago)*, 53(199), 61-90. <http://orcid.org/0000-0001-8672-6256>
- Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 277-289. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277>
- Kasim, O., Agbola, S., & Oweniwe, M. (2020). Land use land cover change and land surface emissivity in Ibadan, Nigeria. *Town and Regional Planning*, 77, 71-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.18820/2415-0495/trp77i1.6>
- Keenan, R., Reams, G., Achard, F., de Freitas, J., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: results from the FAO Global

Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9-20. doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014

Köhl, M., Lasco, R., Cifuentes, M., Jonsson, Ö., Korhonen, K. T., Mundhenk, P., Navar, j. & Stinson, G. (2015). Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management*, 352, 21-34. [doi:10.1016/j.foreco.2015.05.036](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.036)

Krause, A., Haverd, V., Poulter, B., Anthoni, P., Quesada, B., Rammig, A., & Arneeth, A. (2019). Multimodel analysis of future land use and climate change impacts on ecosystem functioning. *Earth's Future*, 7(7), 833-851. <https://doi.org/10.1029/2018EF001123>

Lambin, E., Baulies, X., Bockstael, N., Fischer, G., Krug, T., Leemans, R., & Moran, E. F. (1999). Land use and land cover change implementation strategy, IGBP report, 48, IHDP, report 10. *Estocolmo:[sn]*.

Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., ... & Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change*, 11(4), 261-269.

Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(9), 3465-3472.

Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 205-241.

Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., ... & Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in

Chile. *Forest Ecology and Management*, 258(4), 415-424.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.004>

Li, D., Wu, S., Liu, L., Zhang, Y., & Li, S. (2018). Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change. *Global change biology*, 24(9), 4095-4106.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14327>

Li, C., Yang, M., Li, Z., & Wang, B. (2021). How Will Rwandan Land Use/Land Cover Change under High Population Pressure and Changing Climate?. *Applied Sciences*, 11(12), 5376. <https://doi.org/10.3390/app11125376>

Marhaento, H., Booij, M. J., & Ahmed, N. (2021). Quantifying relative contribution of land use change and climate change to streamflow alteration in the Bengawan Solo River, Indonesia. *Hydrological Sciences Journal*, 66(6), 1059-1068. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1921182>

Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 27(4), 286-306

Rijal, S., Techato, K., Gyawali, S., Stork, N., Dangal, M. R., & Sinutok, S. (2021). Forest Cover Change and Ecosystem Services: A Case Study of Community Forest in Mechinagar and Buddhashanti Landscape (MBL), Nepal. *Environmental Management*, 67(5), 963-973.
<https://doi.org/10.1007/s00267-021-01430-9>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., ... & Foley, J. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).

Rodríguez, J., Echeverría, C., Oyarzún, C., & Morales, L. (2017). Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in a forest landscape in southern Chile: basis for conservation planning. *Bosque*, 38(3), 495-506.

- Rudel, T. K., Coomes, O. T., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, J., & Lambin, E. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global environmental change*, 15(1), 23-31.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., ... & Wall, D. H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *science*, 287(5459), 1770-1774.
- Sharma, R., Rimal, B., Baral, H., Nehren, U., Paudyal, K., Sharma, S., ... & Kandel, P. (2019). Impact of land cover change on ecosystem services in a tropical forested landscape. *Resources*, 8(1), 18.
- Sheeran, K. A. (2006). Forest conservation in the Philippines: A cost-effective approach to mitigating climate change?. *Ecological Economics*, 58(2), 338-349.
- Tang, J., Li, Y., Cui, S., Xu, L., Ding, S., & Nie, W. (2020). Linking land-use change, landscape patterns, and ecosystem services in a coastal watershed of southeastern China. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01177. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01177>
- Thellmann, K., Golbon, R., Cotter, M., Cadisch, G., & Asch, F. (2019). Assessing hydrological ecosystem services in a rubber-dominated watershed under scenarios of land use and climate change. *Forests*, 10(2), 176. <https://doi.org/10.3390/f10020176>
- Trew, B. T., & Maclean, I. M. (2021). Vulnerability of global biodiversity hotspots to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 30(4), 768-783. DOI: 10.1111/geb.13272
- Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666-20671.

- Vitousek, P. M. (1992). Global environmental change: an introduction. *Annual review of Ecology and Systematics*, 23(1), 1-14.
- Wang, Y., Kockelman, K., & Damien, P. (2014). A spatial autoregressive multinomial probit model for anticipating land-use change in Austin, Texas. *The Annals of regional science*, 52(1), 251-278. DOI 10.1007/s00168-013-0584-y
- Wu, Z., Dai, E., Wu, Z., & Lin, M. (2019). Future forest dynamics under climate change, land use change, and harvest in subtropical forests in Southern China. *Landscape Ecology*, 34(4), 843-863. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.030>
- Wu, H., Li, Z., Clarke, K. C., Shi, W., Fang, L., Lin, A., & Zhou, J. (2019). Examining the sensitivity of spatial scale in cellular automata Markov chain simulation of land use change. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(5), 1040-1061.
- Zhao, Q., Wen, Z., Chen, S., Ding, S., & Zhang, M. (2020). Quantifying land use/land cover and landscape pattern changes and impacts on ecosystem services. *International journal of environmental research and public health*, 17(1), 126. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010126>