



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Ciencias Forestales y de Conservación de la Naturaleza

Programa Interfacultades

Magíster en Gestión y Planificación Ambiental

**Utilización de un modelo de vegetación dinámico para la evaluación del
impacto del cambio climático sobre el balance de carbono en cinco
biomas de Chile**

Propuesta de Actividad Formativa para optar al grado de Magister en Gestión y
Planificación Ambiental

CARLA LABRÍN ZÚÑIGA

Profesor Guía: Pablo Morales Peillard, Ph.D.

Santiago, Chile 2016

Propuesta de Actividad Formativa para optar al grado de Magister en Gestión y
Planificación Ambiental

Profesor Guía Nombre: Pablo Morales Peillard, Ph.D.
Nota: _____
Firma: _____

Profesor Informante (1) Nombre: Horacio Bown.
Nota: _____
Firma: _____

Profesor Informante (2) Nombre: Pablo Sarricolea.
Nota: _____
Firma: _____

Santiago, Chile 2016

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS.....	ii
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
2.1 Formulación del problema de investigación.....	5
2.2 OBJETIVOS.....	6
2.2.1 Objetivo general.....	6
2.2.2 Objetivos específicos.....	6
III. MARCO TEÓRICO.....	8
3.1 Cambio climático.....	8
3.1.1 Cambios en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre.....	10
3.1.2 Observaciones directas del cambio climático reciente.....	12
3.2 Cambio climático en Chile.....	15
3.2.1 Variación en la Temperatura.....	16
3.2.2 Cambios en el régimen de caudales.....	18
3.3 Impactos del cambio climático en los ecosistemas terrestres en Chile.....	20
3.3.1 Incertidumbre.....	22
3.4 Modelos de ecosistemas.....	23
3.4.1 Modelos Biogeoquímicos Terrestres.....	24
3.4.2 Modelos dinámicos de vegetación global.....	26
3.5 Comparación del modelo LPJ-GUESS con otros modelos dinámicos de vegetación.....	28
IV. MATERIALES Y MÉTODO.....	31
4.1 Modelo Dinámico de Vegetación "LPJ-GUESS".....	31
4.1.1 Datos de entrada (inputs) requeridos por el modelo.....	33
4.1.2 Estudios que han validado el modelo.....	34
4.2 Escenario de emisiones.....	34
4.3 Biomás en estudio.....	37
4.4 Protocolo de simulación.....	40
4.5 Sitios de estudio y análisis de resultados.....	41
V. RESULTADOS.....	43
5.1 Vegetación Potencial bajo condiciones de clima histórico (1960-1990).....	43
5.2 Comparación de datos simulados por LPJ-GUESS con imágenes satelitales MODIS.....	44
5.3 Balance de carbono para el periodo histórico 1960-1990 (baseline).....	50
5.4 Balance de carbono para el período 2070-2100 en respuesta a los escenarios de cambio climático A2 y B2.....	55
VI. DISCUSIÓN.....	59

6.1	Balance de carbono para el periodo histórico 1960-1990 (baseline)...	60
6.2	Limitaciones asociadas a la aplicación del modelo LPJ-GUESS en Chile.....	64
6.2.1	Limitantes generales	64
6.2.2	Limitantes asociadas a la representación del ciclo hidrológico	65
6.2.3	Limitantes asociadas a la representación de las dinámicas ecosistémicas	66
6.2.4	Limitaciones asociadas a las variables de entrada	67
VII.	CONCLUSIÓN.....	69
VIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	71
IX.	ANEXOS.....	80
9.1	Anexo 1.....	80
9.2	Anexo 2.....	81
9.3	Anexo 3.....	83
9.4	Anexo 4.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Inputs LPJ-GUESS.	33
Tabla 2.	Escenarios de emisiones determinados por IPCC.....	35
Tabla 3.	Set de coordenadas utilizadas para análisis de los Biomás.....	41
Tabla 4.	Comparación de NPP, NEE y Rh ($\text{Kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de los años 2070-2100 con los años 1960-1990, para los biomás en estudio.. ..	58
Tabla 5.	Tipos de plantas funcionales (PFT) y sus especies representativas... ..	80
Tabla 6.	Comparación de NPP, NEE y Rh ($\text{Kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de los años 2070-2100 con los años 1960-1990, para los biomás en estudio.	83
Tabla 5.	Comparación de la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y Precipitaciones (%) de los años 2070-2100 con los años 1960-1990, para los biomás en estudio.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Emisiones antropogénicas anuales de gases de efecto invernadero (GEI) totales ($\text{GtCO}_{2\text{eq}}/\text{año}$) por grupos de gases entre los años 1970-2010.	12
Figura 2.	Variación de temperatura en Chile para los escenarios A2 y B2.	17
Figura 3.	Variación de precipitaciones en Chile para los escenarios A2 y B2. .	18
Figura 4.	Vías de interacción de los principales factores de cambio climático y sus resultados sobre la biodiversidad.	22
Figura 5.	Representación esquemática de funcionamiento de LPJ-GUESS.	32
Figura 6.	Vegetación potencial simulada por LPJ-GUESS expresada en unidades de biomasa (Kg C m^{-2}) para los principales biomás forestales de Chile para el periodo histórico 1960-1990.....	43
Figura 7.	Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$) de Bosque Matorral y Bosque Esclerófilo, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.	45

Figura 8. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.	47
Figura 9. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Magallánico, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.....	48
Figura 10. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Caducifolio Frío, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.....	50
Figura 11. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Matorral y Bosque Esclerófilo Lon 72°50'Lat 35°50'.....	51
Figura 12. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Bosque Valdiviano y Norte Patagónico coordenada Lon 73°50'Lat 42°00'.....	52
Figura 13. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Bosque Magallánico coordenada Lon 73°00'Lat 45°50'.....	53
Figura 14. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bosque Caducifolio Frío coordenada Lon 72°50'Lat 51°50'.....	55
Figura 15. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Bosque Valdiviano y Nordpatagónico coordenada Lon 73°50'Lat 41°00'.....	81
Figura 16. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Bosque Magallánico coordenada Lon 73°00'Lat 45°00'.....	81
Figura 17. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bosque Caducifolio Frío coordenada Lon 72°50'Lat 48°00'.....	82

RESUMEN

Este trabajo está orientado en describir la pertinencia de utilizar los modelos DGVMs para evaluar los impactos que el cambio climático tendrá sobre el balance de carbono en ecosistemas terrestres en Chile. Para cumplir con este objetivo se aplicó el modelo dinámico de vegetación LPJ-GUESS para simular cinco biomas característicos de Chile: Matorral y Bosque Esclerófilo, Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, Bosque Magallánico, Bosque Caducifolio Frío y Bosque Templado Deciduo. La simulación se realizó para dos escenarios de emisiones, SRES B2 y SRES A2. Para describir el balance de carbono se utilizaron las variables correspondientes a Producción Neta Primaria mensual (NPP), Respiración heterotrófica mensual (Rh) e Intercambio Neto del Ecosistema (NEE). En general, LPJ-GUESS replicó de buena manera los patrones estacionales de NPP y NEE en casi todos los biomas, registrando los picos de absorción durante los meses de verano y la liberación en los meses de invierno. A pesar de las incertidumbres asociadas a la aplicación de LPJ-GUESS, los resultados indican que el modelo es una buena herramienta para realizar proyecciones futuras de las respuestas de los ciclos del carbono de los diferentes biomas de Chile frente al cambio climático.

Palabras claves: LPJ-GUESS, DGVMs, Producción Neta Primaria mensual, Respiración heterotrófica mensual, Intercambio Neto del Ecosistema.

ABSTRACT

This paper focuses on describing the performance of DGVMs models in assessing the climate change impact on carbon balance in Chilean terrestrial ecosystem. In order to meet this goal the dynamic vegetation model LPJ-GUESS was applied to simulate five Chilean Biomes: Sclerophyllous Forest/Shurbland, Valdivian and Nordpatagonian Rain Forest, Magellanic Rain Forest, Cool Deciduous Forest and Temperate Deciduous Forest. The simulation was performed for two emission scenarios SRES A2 and B2. The variables monthly Net Primary Production (NPP), monthly Heterotrophic Respiration (Rh) and monthly Net Ecosystem Exchange (NEE) were used for describing carbon balance. In general, LPJ-GUESS captured the seasonal patterns of NPP and NEE in most of the biomes, reproducing the absorption carbon picks during summer months and carbon releasing during winter months. Despite some uncertainties related to the LPJ-GUESS application, the current results indicate that the model is a good tool to make future projections about climate change impacts on Chilean biomas.

Keywords: LPJ-GUESS, DGVMs, monthly Net Primary Production, monthly Net Ecosystem Exchange

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, siendo cada uno de los tres últimos decenios sucesivamente más cálido que cualquier decenio anterior desde 1850. En efecto, los datos de temperatura de la superficie terrestre y del océano, combinados y promediados globalmente, muestran un calentamiento de 0,85 (0,65 a 1,06) °C durante el período 1880-2012. A nivel regional, la estadística climática indica que es probable que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1.400 años en el Hemisferio Norte (IPCC, 2013).

Por otra parte, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI; ej. CO₂, CH₄, N₂O) se han incrementado desde la era preindustrial debido al rápido crecimiento económico y de la población mundial. Actualmente las tasas de emisión son las más altas registradas. Esto último ha provocado que las concentraciones atmosféricas de CO₂, CH₄ y N₂O no tengan precedente histórico en al menos durante los últimos 800.000 años.

Sus efectos, en conjunto con otros factores antropogénicos, han sido detectados en el sistema climático y es extremadamente probable que sean la causa dominante del calentamiento observado desde la mitad del siglo XX (IPCC, 2013). De proseguir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento de la atmósfera aumentaría y el sistema climático global experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores a los observados durante el siglo XX (IPCC, 2013).

Una de las pocas opciones a corto plazo para mitigar el aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, es potenciar la captura y almacenamiento de carbono en combinación con un aumento en la eficiencia energética. A largo plazo la única alternativa será llevar a cabo una transformación completa a nuestro sistema social-económico impulsando una mayor eficiencia de los recursos donde las energías renovables (ej. solar, eólica, hídrica) deberán tener un rol fundamental (Wennersten *et al.*, 2015).

En relación a lo anterior, surge la necesidad de desarrollar una base científica sólida que permita cuantificar los impactos del cambio climático asociados a aumentos en la concentración de GEI sobre los ecosistemas terrestres mediante el uso de diversas herramientas de monitoreo y evaluación. Al respecto, los modelos basados en procesos, como los modelos dinámicos de vegetación global (DGVMs en sus siglas en inglés, Papas *et al.*, 2013) se han utilizado muy a menudo como herramientas confiables para investigar tanto el efecto del clima como la intervención antrópica (ej. cambios en uso de suelo,

aumento de emisiones de GEI) en la dinámica de la vegetación a corto y largo plazo (Melillo *et al.*, 1993; Cox *et al.*, 2000; Moorcroft, 2003; Evans, 2012).

Estos modelos tienen la capacidad de simular la estructura y dinámica de la vegetación, por lo que pueden ser aplicados con el fin de evaluar el efecto de los cambios en el clima y en las concentraciones de GEI en la atmósfera sobre el equilibrio competitivo entre las especies vegetales o tipos funcionales de plantas (PFTs) y por ende sobre los procesos ecosistémicos asociados (ej. Productividad Neta Primaria (NPP), Intercambio de Carbono Neto del Ecosistema (NEE)).

Actualmente, los DGVMs no han sido utilizados en investigaciones a escala regional en Chile. Sólo unos pocos estudios han intentado modelar la dinámica del bosque nativo chileno (Gutiérrez y Huth, 2012) y los impactos de escenarios de cosecha sobre ésta (Rüger *et al.*, 2007). En ambos casos se aplicaron modelos de crecimiento forestales basadas en procesos.

Por lo señalado anteriormente, la presente propuesta de actividad formativa (AFET) se enfoca en la descripción de las potenciales ventajas que el uso de un DGVM como LPJ-GUESS puede proporcionar, por ejemplo, a científicos y tomadores de decisiones, para entender de mejor manera las respuestas futuras de diferentes procesos ecosistémicos (ej. Productividad Neta Primaria

(NPP), Intercambio de Carbono Neto del Ecosistema (NEE)) a cambios en el clima asociados a un incremento de la concentraciones de GEI en la atmósfera.

II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Formulación del problema de investigación

El cambio climático, como consecuencia del aumento de la concentración atmosférica de GEI, tiene un efecto importante en los factores que rigen la absorción y acumulación de carbono en los ecosistemas, y por tanto, sobre el ciclo del carbono. En efecto, “la vulnerabilidad de muchos procesos del ciclo del carbono y de los reservorios depende de la magnitud del futuro cambio climático. Ésta, a su vez, depende de la vulnerabilidad del ciclo del carbono.” (Gruber *et al.*, 2004; Trumper *et al.*, 2009).

Las interacciones que se generan entre el clima, ciclo del carbono, el ciclo del agua y la biosfera terrestre, están interconectadas en todas sus etapas, por lo que es de vital importancia conocer estos procesos y comprender de mejor manera los cambios que presentan las variables ambientales en respuesta a diferentes cambios que ocurren en nuestro ecosistema; para ello los científicos han desarrollado modelos que permiten simular estos procesos. Ejemplo de estos modelos son los denominados modelos dinámicos de vegetación global (DGVMs con sus siglas en inglés), los cuales se han utilizado ampliamente para la simulación del ciclo del carbono terrestre y para evaluar los cambios y reacciones en la estructura de la vegetación y de la productividad debido a la

variabilidad del clima (Pappas *et al.*, 2013; Bradshaw y Sykes, 2014); sin embargo, en Chile no han sido utilizados en investigaciones a escala regional.

En este contexto, este AFET busca describir las ventajas de utilizar un DGVM como una herramienta eficaz y confiable para evaluar las variaciones en el balance de carbono que han experimentado y experimentarán a futuro los biomas Matorral y Bosque Esclerófilo, Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, Bosque Magallánico, Bosque Caducifolio Frío y Bosque Templado Deciduo. de nuestro país como resultado del cambio climático.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo general

Aplicar el modelo LPJ-GUESS para evaluar el impacto del cambio climático sobre el balance de carbono en cinco biomas de Chile.

2.2.2 Objetivos específicos

1. Simular y describir el balance de carbono en términos de Productividad Neta Primaria (NPP), Respiración Heterotrófica (Rh) e Intercambio de Carbono Neto del Ecosistema (NEE) para los biomas Matorral y Bosque

Esclerófilo, Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, Bosque Magallánico, Bosque Caducifolio Frío y Bosque Templado Deciduo, entre los períodos 1960-1990 (período histórico) y 2070-2100 (escenario de simulación) basado este último periodo en los escenarios de emisión A2 y B2.

2. Discutir sobre las ventajas y desventajas del modelo LPJ-GUESS.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Cambio climático

Se entiende por “cambio climático” a la variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). La convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define ‘cambio climático’ como: ‘un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables’. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales (IPCC, 2007).

El cambio climático se puede deber a procesos naturales y/o a la acción humana; este último se genera debido al rápido crecimiento que ha tenido la población durante los dos últimos siglos, generando un aumento de los recursos disponibles, como consecuencia de la actividad industrial, lo que ha provocado que los niveles de emisiones de los GEI aumenten extraordinariamente multiplicando el efecto invernadero hasta niveles que conducen a un “calentamiento global” del planeta al punto de llegar a influir en el sistema climático de la tierra. Estos impactos ya se pueden observar, ya que

han afectado a distintos componentes de los ecosistemas tales como la composición de la atmósfera, el agua, las plantas, los animales y los seres humanos (VijayaVenkataRaman S. *et al.*, 2012; Post *et al.*, 2009; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2010; IPCC, 2013; Bradshaw y Sykes, 2014), y un aumento de las temperaturas.

El efecto invernadero es un fenómeno natural de la Tierra que consiste en que la radiación térmica (radiación infrarroja) emitida por la superficie de la tierra es absorbida por unos gases que se encuentran en la atmósfera llamados gases de efecto invernadero (GEI); parte de esta radiación, luego de ser absorbida, es devuelta hacia la superficie provocando un incremento de la temperatura superficial. Gracias a este fenómeno la temperatura media del planeta es entre 20 y 30°C¹ más alta de lo que sería sin ese efecto y por tanto inhóspita para la vida como se conoce actualmente (Houghton, 2009).

Los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes son vapor de agua y los gases traza dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃), y los clorofluorocarbonos (CFCs; IPCC, 2013).

¹ El valor (°C) de la diferencia entre la temperatura superficial con o sin la presencia de gases de efecto invernadero depende de los supuestos tomados en cuenta respecto al rol de las nubes y otros factores (Houghton, 2009).

La variación de las concentraciones de estos GEI y aerosoles en la atmósfera, y los cambios de la cubierta terrestre (ej. cambios en el uso de suelo) y la radiación solar, han alterado el equilibrio energético del sistema climático (IPCC, 2007), siendo el aumento de las emisiones de los GEI antropógenos uno de los factores más preponderantes en este desequilibrio climático.

3.1.1 Cambios en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre.

El aumento sostenido de las concentraciones de GEI en la atmósfera se viene produciendo principalmente, a partir de la revolución industrial (1850), momento en el cual se comenzaron a emitir, por ejemplo, CO₂ y CH₄ a tasas lo suficientemente altas como para alterar la composición de la atmósfera. Este fenómeno ha sido atribuido, en primer lugar, a las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles y, en segundo lugar, a las emisiones netas derivadas del cambio de uso del suelo (ej. deforestación de bosques templados y tropicales; Raupach y Canadell, 2010). Los océanos también se han visto afectados con el aumento de las concentraciones de CO₂ producto de las actividades antropogénicas, IPCC en su informe del año 2013, señala que alrededor del 30% ha sido absorbido por estos, provocando su acidificación.

Los sectores que han contribuido en forma directa al aumento de las emisiones de GEI son energía con un 47%, le sigue la industria con un 30%, transporte con 11% y finalmente los edificios con un 3% (IPCC, 2014).

Los gases de efecto invernadero que han presentado los mayores aumentos en sus concentraciones, son el dióxido de carbono (CO_2), le siguen el metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Neuenschwander, 2010). En efecto en el año 2011 las concentraciones CO_2 eran de 391 ppm¹¹, CH_4 de 1 803 ppb y el N_2O era de 324 ppb, valores que exceden los niveles preindustriales en aproximadamente el 40%, el 150% y el 20%, respectivamente (IPCC, 2013), produciéndose entre los años 2000-2010 las emisiones de GEI más altas en la historia de humanidad llegando a 49 ($\pm 4,5$) GtCO₂eq/año, como podemos apreciar en la figura 1, (IPCC, 2014).

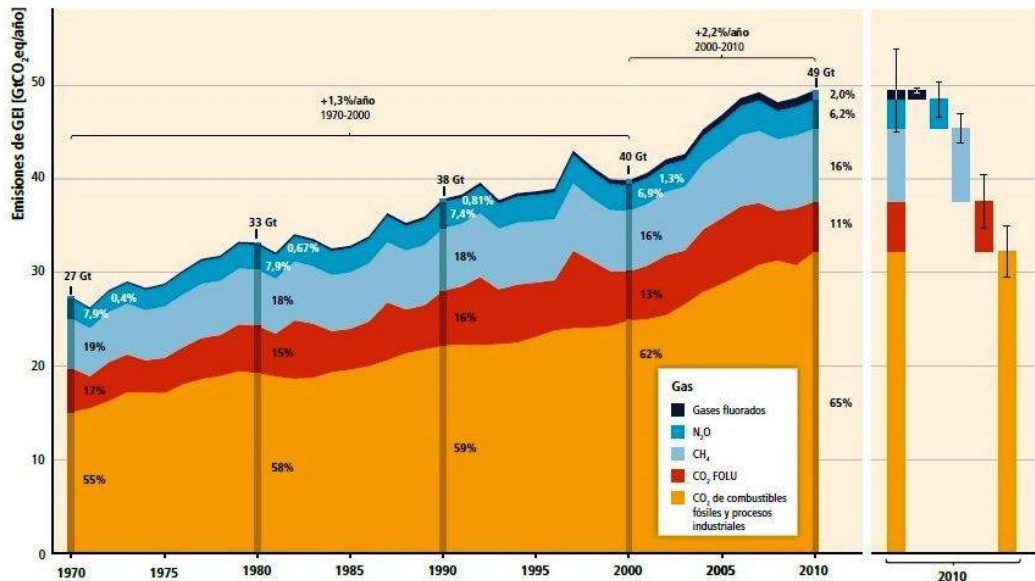


Figura 1. Emisiones antropogénicas anuales de gases de efecto invernadero (GEI) totales (GtCO_{2eq/año}) por grupos de gases entre los años 1970-2010.

Fuente: IPCC 2014. Resumen para responsables de políticas.²

3.1.2 Observaciones directas del cambio climático reciente

“Desde 1950, aproximadamente, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Es muy probable que el número de días y noches fríos haya disminuido y que el número de días y noches cálidos haya aumentado a escala mundial, y es probable que en gran parte de Europa, Asia y Australia haya aumentado la frecuencia de las olas de calor. Es probable que existan más regiones en las que haya aumentado el número de sucesos de precipitaciones intensas que en las que haya disminuido, y es probable que la frecuencia o intensidad de las precipitaciones

²<http://www.ipcc.ch/>

intensas haya aumentado en América del Norte y Europa. En otros continentes existe, como máximo, un nivel de confianza medio en los cambios ocurridos relativos a los sucesos de precipitaciones intensas. (IPCC, 2013)”.

Por otra parte, el nivel medio del mar en el mundo se elevó a un ritmo medio de 3,2 (2,8 a 3,6) mm anual desde 1993 a 2010. El aumento total del nivel del mar estimado para el periodo 1901-2010 es de 0,19 metros (IPCC, 2013). Además observaciones realizadas desde 1961 muestran que la temperatura media de los océanos del mundo ha aumentado hasta profundidades de al menos 3000 metros y que el océano está absorbiendo más del 80% del calor añadido al sistema climático. Dicho calentamiento provoca que el agua de mar se expanda, contribuyendo a elevar aún más el nivel del mar (Neuenschwander, 2010). Otros factores causales corresponden a pérdida de masa de los glaciares, pérdida del manto de hielo de Groenlandia y cambios en el manto de hielo de la Antártica (IPCC, 2013). El aumento en los niveles de agua marina en las zonas de afluencia con agua dulce puede provocar, por ejemplo, múltiples daños en los humedales costeros, debido al aumento de la salinidad y a la inundación excesiva (Yáñez-Arancibia *et al.*, 2014).

Los efectos esperados producto del cambio climático han ocurrido a escala continental y regional, como por ejemplo, el hielo ártico ha presentado cambios en la temperatura y el volumen, también se han reportado floraciones

tempranas en comparación a periodos históricos en Groenlandia, expansión hacia el norte de las áreas de distribución, tanto de especies arbóreas más templadas (arbustos en detrimento de especies propias de la tundra) como de insectos herbívoros (Post *et al.*, 2009), disminución y/o cambios en las poblaciones de zooplancton y fitoplancton en océanos (Lovejoy y Hannah, 2006; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2010), cambios en los sistemas ecológicos, como la pérdida de la biodiversidad (Post *et al.*, 2009), entre otros. Se esperan que estos impactos sean más severos durante el presente siglo, al respecto, varias proyecciones se han hecho de los impactos del cambio climático sobre los hábitats y las especies del mundo, en general, lo que indica que más especies pasaran a estar en peligro de extinción, y que su distribución cambiará sustancialmente, inclinándose a menudo a la reducción (Willis *et al.*, 2015); No obstante lo anterior, la relación directa entre cambio climático y desastres naturales es aún objeto de debate (Khandekar *et al.*, 2013; IPCC, 2011).

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático afirma que hay que limitar el aumento de la temperatura mundial a un rango de 2-2.4°C lo que evitaría los peores efectos del cambio climático (IPCC, 2007). En el último informe (IPCC, 2013) señalan que una ausencia de esfuerzos para la mitigación de las emisiones de (GEI), harán que estos continúen aumentando, lo que provocará el aumento de la temperatura media de la superficie global en más de 3°C, llegando a 5°C al 2100 (IPCC, 2014).

3.2 Cambio climático en Chile

Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, según sus siglas en inglés) Chile es un país propenso a sufrir las consecuencias del cambio climático, ya que cuenta con áreas de borde costero de baja altura; con zonas áridas y semiáridas; zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal. Además es un país propenso a desastres naturales; presenta zonas propensas a la sequía y la desertificación; presenta zonas urbanas con problemas de contaminación atmosférica; y zonas de ecosistemas frágiles, montañosos como las cordilleras de la Costa y de los Andes (MMA, 2013).

Las emisiones de GEI emitidas por Chile son bajas a nivel mundial, sin embargo, por habitante, su aporte es uno de los más altos en Sudamérica (MMA, 2014). Según el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010, las emisiones de GEI totales del país fueron 91.575,9 GgCO_{2eq}, incrementándose en un 83,5% desde 1990. El principal GEI emitido fue el CO₂ (76,6%), seguido del CH₄ (12,5%), N₂O (10,6%), y HFC/PFC (0,3%). Por sector productivo, el energético es el principal emisor de GEI (74,7%), debido mayoritariamente al consumo de carbón mineral y diésel para la generación eléctrica y el consumo de diésel en el transporte terrestre, le siguen en orden

de importancia, la agricultura (15,1%), los procesos industriales (6,1%), los residuos (3,9%), y utilización de disolventes y otros productos (0,3%).

Actualmente podemos observar que las temperaturas en el océano han disminuido (-0.15°/década), el valle central ha presentado un ligero aumento y en la zona de cordillera se ha registrado un aumento significativo de casi +¼°C por década; a lo anterior debemos añadir los cambios registrados en las precipitaciones, donde hay una tendencia significativa a la reducción de lluvias en las zonas comprendidas entre la VII y X región (Garreaud, 2011).

3.2.1 Variación en la Temperatura

En general, ambos escenarios indican de manera bastante consistente que el promedio de la temperatura en el país aumentará. Para el período temprano (2010-2040), ambos escenarios muestran aumentos de temperatura para todo el país, pero de manera más clara en la zona del altiplano proyectándose los mayores valores bajo el escenario B2. En el período intermedio (2040-2070), en cambio, el escenario A2 presenta aumentos mayores en la zona altiplánica y en la zona centro-sur. En el período tardío (2070-2100), ambos escenarios proyectan aumentos de temperatura en todo el país, incluida la zona del extremo austral, pero en el escenario A2 estos incrementos son mayores, de 3°C a 4°C, en comparación al incremento de 2°C a 3°C proyectado por el

escenario B2. En general, se observa que los aumentos de temperatura son más evidentes a medida que se aleja la influencia del océano (en altura o alejado de la costa) (CEPAL, 2012). Ver figura 2.

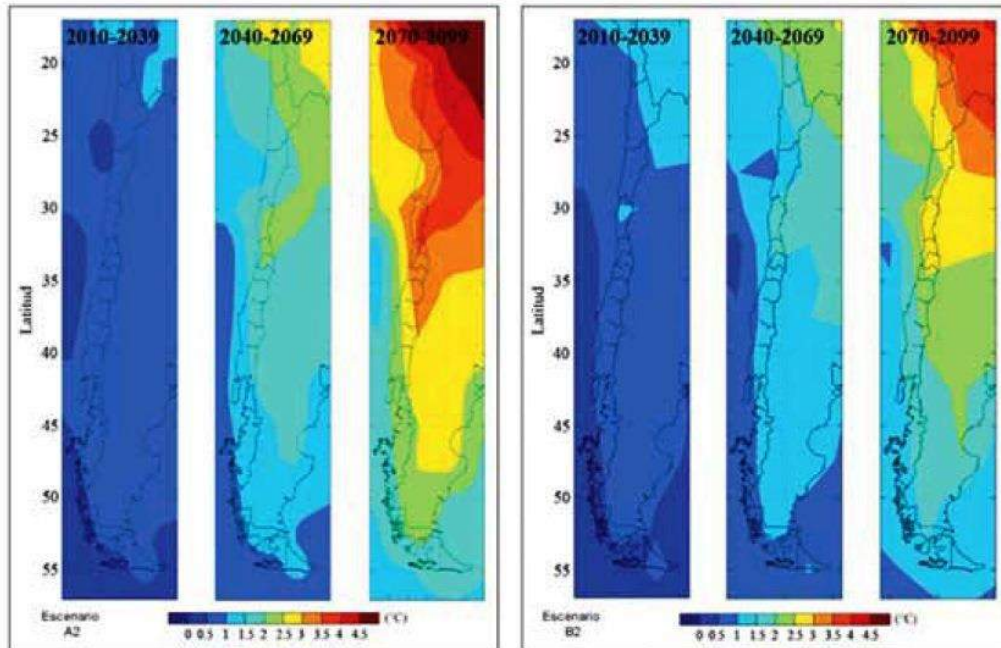


Figura 2. Variación de temperatura en Chile para los escenarios A2 y B2.

Fuente. CEPAL, 2012.

Con respecto a las proyecciones de precipitación (Ver figura 3), para el período temprano (2010-2040) se prevé en el escenario B2 un mayor descenso en esta variable (entre un 10% y un 20%) en la zona del norte chico (regiones de Atacama y Coquimbo), en comparación con el escenario A2. En el período intermedio (2040-2070), ambos escenarios proyectan aumentos de precipitación en la región de Magallanes y disminución de precipitación entre las regiones de Antofagasta y Los Lagos; sin embargo, los cambios son más

acentuados en el escenario A2. En el período tardío (2070-2100), para ambos escenarios se proyectan similares aumentos de precipitación en el extremo austral y el altiplano, pero un descenso de ésta entre Antofagasta y Los Lagos. El descenso de precipitaciones para la zona antes mencionada es más pronunciado bajo el escenario A2 y corresponde a un 30% a un 40% (CEPAL, 2012).

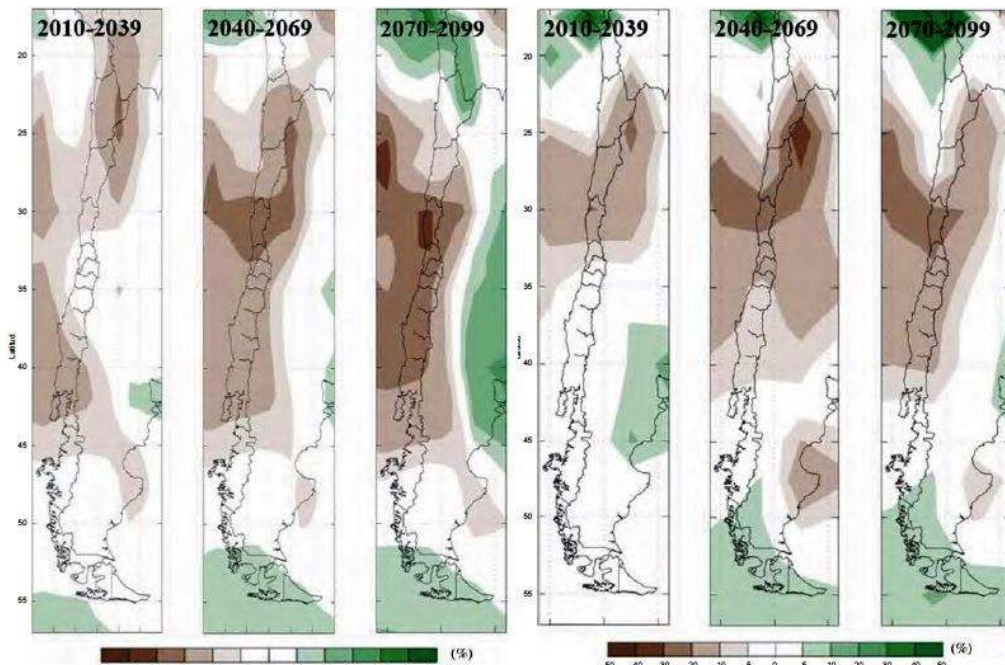


Figura 3. Variación de precipitaciones en Chile para los escenarios A2 y B2.

Fuente. CEPAL, 2012.

3.2.2 Cambios en el régimen de caudales

La disponibilidad de los recursos hídricos de nuestro país está relacionada con las condiciones de clima que existan; según las proyecciones climáticas arrojadas por los modelos de simulación, se espera que los recursos hídricos

se vean afectados por cambios en temperatura y precipitaciones, sobre todo durante el siglo XXI (Demaria *et al.*, 2013).

Los aumentos de temperatura asociados a los cambios climáticos reducirían el área andina, capaz de almacenar nieve entre años sucesivos y, la isoterma de 0°C experimentaría un alza de altura, las crecidas invernales de los ríos con cabecera andina se incrementarían por el aumento de caudales de las cuencas aportantes; como consecuencia disminuiría la reserva nival de agua (Ministerio de Medio Ambiente, 2011); además si sumamos la disminución de las precipitaciones aumentaría la evapotranspiración (CONAMA, 1999).

En la región central de Chile, las precipitaciones en estación invernal pasarán de un régimen dominado por la nieve a un régimen dominado por las lluvias, que provocará un aumento en el flujo de los caudales en invierno; por el contrario, se espera que en primavera y verano los caudales disminuyan más rápido por los deshielos (Demaria *et al.*, 2013).

3.3 Impactos del cambio climático en los ecosistemas terrestres en Chile.

El cambio climático se ha convertido en una de las principales amenazas para el equilibrio del medio ambiente, afectando la biodiversidad y el mantenimiento de los ecosistemas terrestres.

En la figura 4, podemos observar las afirmaciones que han realizado los científicos sobre los cambios que se evidenciarán sobre la biodiversidad producto del cambio climático, estos afectarán la fenología de las especies, alterando su habilidad competitiva, su conservación y por tanto la estructura y funcionamiento de los ecosistemas; además se verá favorecida la expansión de especies invasoras y plagas lo que provocara cambios de dominancia y composición de las comunidades (Valladares, 2004; Bradshaw y Sykes, 2014); investigaciones nacionales proyectan que los bioclimas que mantienen a gran parte de los ecosistemas podrían verse alterados sin opción de volver a establecerse en otro lugar del territorio, afectando de manera directa los desplazamientos latitudinales o longitudinales de los ecosistemas, pudiendo provocar nuevas combinaciones de especies, las que podrían tardar centenares de años en lograr el equilibrio (Ministerio de Medio Ambiente, 2014).

La evaluación del impacto del cambio climático sobre la biodiversidad de los ecosistemas terrestres en Chile, debe considerar el mal manejo realizado sobre la RAP (Red de áreas protegidas), la transformación del paisaje por usos humanos (CEPAL, 2012) y la presencia de especies invasoras (Ministerio de Medio Ambiente, 2014), lo que afectará en mayor grado, la manera directa de la capacidad de adaptación de las especies frente a los cambios de clima; en este contexto, los ecosistemas más afectados serán los de la zona central, unidades de bosque espinoso mediterráneo interior y matorral bajo desértico andino presentaran considerables reducciones en su área de distribución; en esta realidad, la vegetación del *hotspot* (área crítica) mediterráneo sería altamente vulnerable a los fenómenos de cambio climático (Ministerio de Medio Ambiente, 2014).

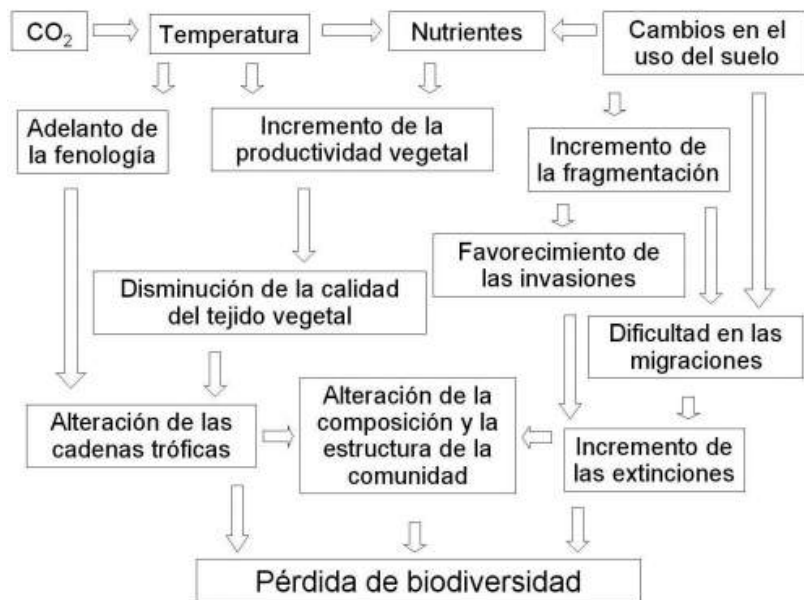


Figura 4. Vías de interacción de los principales factores de cambio climático y sus resultados sobre la biodiversidad.

Fuente. Valladares, 2004.

3.3.1 Incertidumbre

Varias incertidumbres imponen limitaciones a la capacidad de los científicos de proyectar y evaluar los impactos del cambio climático, particularmente a escala regional y local, estas van desde diferencias en las predicciones de cambio climático debido a la utilización de diferentes escenarios de emisiones hasta diferencias en la simulación de los efectos debido al uso de distintos métodos de modelación (IPCC, 2001). Esto ha sido descrito como "cascada de incertidumbre" por Mearns, 2001.

Dado el caso que el presente AFET utilizará un DGVM para evaluar los impactos del cambio climático sobre cinco biomas representativos de Chile, resulta relevante tener en consideración la incertidumbre asociada a cualquier análisis que utilice este tipo de modelo.

3.4 Modelos de ecosistemas

Para comprender mejor los principales procesos ecosistémicos y proyectar los impactos del cambio climático sobre la vegetación y los ciclos biogeoquímicos (ciclo de carbono y ciclo del agua), se han desarrollado modelos computacionales para simular la estructura y dinámica de los ecosistemas terrestres junto a los procesos ecosistémicos asociados (NPP, Rh, NEE, entre otros).

Dentro del conjunto de modelos disponibles actualmente para la simulación de ecosistemas terrestres destacan dos grandes grupos: los modelos empíricos y los modelos basados en procesos. Los modelos empíricos describen las relaciones entre los patrones observados sobre la base de un análisis estadístico de los datos registrados, y por lo general son aplicables sólo a las mismas condiciones bajo las cuales se realizaron las observaciones.

Los modelos basados en procesos describen el comportamiento de un sistema basado en un conjunto de componentes funcionales y sus interacciones entre ellos y con el medioambiente, a través de procesos físicos y mecanísticos³ que se producen a través del tiempo. Al respecto, dos importantes tipos de modelos han sido utilizados en investigaciones para evaluar las relaciones entre el clima, la vegetación y ciclos biogeoquímicos asociados (ej. ciclos del carbono y agua) (Prentice *et al.*, 2007; Bradshaw y Sykes, 2014).

- Modelos Terrestres Biogeoquímicos (TBMs por sus siglas en inglés)
- Modelos Dinámicos de Vegetación Global (DGVMs por sus siglas en inglés).

3.4.1 Modelos Biogeoquímicos Terrestres

Los Modelos Biogeoquímicos Terrestres (TBMs por sus siglas en inglés fueron inicialmente desarrollados con la finalidad de simular la productividad neta primaria (Melillo *et al.*, 1993; Parton *et al.*, 1993; Running y Hunt, 1993). En general, estos modelos son capaces de simular los efectos del cambio climático y de las concentraciones atmosféricas de CO₂ sobre las funciones y procesos ecosistémicos tales como la producción primaria neta (NPP), respiración heterotrófica (Rh) y la evapotranspiración real (AET). Sin embargo,

³ Un modelo se denomina mecanístico cuando el modelo describe los procesos basados en leyes físicas.

estos modelos carecen de la capacidad de determinar mecánicamente qué tipo de vegetación podría vivir en un lugar determinado. Ellos asumen una distribución preestablecida de los tipos de ecosistemas, por lo general usando un mapa de vegetación natural para definir la distribución de los tipos de ecosistemas, y por lo tanto no son capaces de dar cuenta de redistribución de la vegetación en respuesta al cambio climático. Estos modelos no consideran efectos transitorios en las respuestas de la vegetación, lo que podría tener efectos muy diferentes sobre los intercambios de carbono y agua con la atmósfera (Moorcroft, 2003).

Actualmente, los TBMs continúan siendo utilizados, sin embargo, con nuevas formulaciones que le permiten representar de mejor manera los ecosistemas terrestres. Al respecto, los modelos BIOME n (Haxeltine y Prentince, 1996a y b) corresponden a híbridos entre TBMs y Modelos de Equilibrio Biogeográficos (BIOME; Prentince *et al.*, 1992). Ellos predicen la distribución geográfica de los biomas comparando los valores de NPP de diferentes tipos funcionales de plantas (PFTs en sus siglas en inglés) dentro de cada límite ambiental de sobrevivencia de cada PFT (Prentice *et al.*, 2007; Bradshaw y Sykes, 2014).

3.4.2 Modelos dinámicos de vegetación global

Durante las últimas dos décadas una serie de modelos dinámicos de vegetación global (DGVMs) han sido desarrollados para simular los ciclos biogeoquímicos y la dinámica de la vegetación bajo condiciones de cambio climático a escala global y continental (ej. Bachelet *et al.*, 2003; Sitch, 2003; Koca *et al.*, 2006; Hickler *et al.*, 2012; Sato *et al.*, 2012; Ishii *et al.*, 2013; Ringeval *et al.*, 2012; Maignan *et al.*, 2011; González *et al.*, 2010; Lenihan *et al.*, 2008). Los DGVMs combinan aspectos relevantes de 3 tipos de modelos independientes que son los modelos biogeográficos, TBMs, y los modelos forestales tipo “gap-models” (Prentice *et al.*, 2007; Bradshaw y Sykes, 2014). Una de las características más importantes de los DGVMs es que incorporan representaciones más o menos mecanísticas de procesos ecosistémicos claves, por lo tanto pueden ser utilizados para modelar cambios en la estructura y composición de la vegetación y los cambios en variables asociadas a los ciclos del carbono y agua en respuestas a cambios en el clima a través del tiempo y espacio (Koca, 2006; Bradshaw y Sykes, 2014).

En términos de su organización modular, todos los DGVMs tienden a ser similares tanto en su diseño como en las formulaciones de los procesos, los cuales, a su vez, son similares a aquellos que describen los TBMs (Bradshaw y Sykes, 2014). La característica más importante de los DGVMs y que los

diferencian de los TBMs y otros modelos es su habilidad de modelar la dinámica de la vegetación. La vegetación en este tipo de modelos es representada por un conjunto de tipos funcionales de plantas (PFTs por sus siglas en inglés), los cuales se caracterizan por poseer diferentes atributos fisionómicos, fisiológicos y fenológicos que determinan el crecimiento de plantas y la supervivencia en diferentes entornos (Hickler, 2004). Diferentes clases de edad y/o tamaño pueden ser distinguidas (Smith *et al.*, 2001), pero en general, las propiedades simuladas representan promedios de las poblaciones modeladas en una celda para un PFTs determinado (ej. Sitch *et al.*, 2003).

Una característica notable de este tipo de modelos es que tienen implementado dos o tres ciclos temporales anidados ("*nested timing loops*"), llamando a diferentes procesos que ocurren en una diferente escala temporal. Ejemplos de estos procesos son los denominados "procesos lentos" que son simulados a una escala temporal mensual o anual como la competencia por recursos, mortalidad, crecimiento, biogeoquímica del suelo, perturbaciones naturales, etc y los "procesos rápidos" que son modelados a escala diaria, horaria o menor. Ejemplo para estos últimos procesos están el intercambio gaseoso entre la atmósfera y la planta, fotosíntesis, respiración heterotrófica y autotrófica, etc. (Bradshaw y Sykes, 2014).

Actualmente están en aplicación una segunda generación de DGVMs los cuales combinan las características propias de DGVMs con representaciones aún más detalladas de la dinámica de población propias de los modelos forestales tipo “gap-models” lo cual permite representar de mejor manera la heterogeneidad de la vegetación tanto a nivel regional como nacional (ej. Smith *et al.*, 2001; Koca, 2006). Al respecto, este tipo de modelo es el que se utilizó en el presente AFET.

3.5 Comparación del modelo LPJ-GUESS con otros modelos dinámicos de vegetación.

- **GOTILWA**

GOTILWA a diferencia de LPJ-GUESS, sólo simula ecosistemas mono específicos, dejando fuera los análisis de masas mixtas, ya que el modelo desconoce las interacciones que se producen entre las diversas especies (Nadal-Sala *et al.*, 2013; Gracias *et al.*, 1999); al igual que LPJ-GUESS mide las perturbaciones asociadas al fuego, sin embargo ambos no simulan las condiciones chilenas, que se caracterizan por una alta frecuencia de terremotos y erupciones volcánicas. GOTILWA es un modelo muy eficaz para describir los bosques mediterráneos al centrarse especialmente en los problemas del agua y la sequía.

Desde la perspectiva de la gestión, GOTILWA permite simular los efectos de la gestión sobre los bosques, y permite el tratamientos de la masa para la obtención de objetivos específicos planteados por los investigadores o tomadores de decisiones, en cambio LPJ-GUESS entrega la información a los tomadores de decisiones, para que en base a los resultados puedan realizar las políticas y manejo necesario de los bosques.

- **BIOME-BGC**

Modelo basado en procesos, se diferencia de LPJ-GUESS, en que en su modelación sólo considera un estrato de suelo, e incluye los procesos del nitrógeno en sus análisis, si bien LPJ-GUESS en su versión 3.0 (Smith *et al.*, 2014) simula los procesos del nitrógeno, en este AFET la versión utilizada del modelo no lo hace. La variable de entrada de temperatura, utiliza datos diarios, mientras que LPJ-GUESS mensuales. En la representación de biomas el modelo BIOME-BGC es estático, mientras que LPJ-GUESS es dinámico.

- **ORCHIDEE**

El modelo arroja resultados de procesos del nitrógeno, al igual que LPJ-GUESS, ORCHIDEE se basa en el concepto de tipos funcionales de plantas (PFTs) para describir la distribución de la vegetación. La dinámica de la

vegetación es calculada de forma diaria, a diferencia de LPJ-GUESS que es mensual.

- **LPJ-DGVM**

Los dos modelos tienen muchos componentes en común, pero difieren en la forma en que es representada la vegetación, LPJ-DGVM es personificada por un conjunto de tipos funcionales de plantas (PFTs), mientras que LPJ-GUESS puede ser por PFTs o por especies. La simulación en LPJ-DGVM es “modo población” existente en una celda (100-2500 km²), mientras que LPJ-GUESS la simulación es “modo cohorte” o “modo individual” replicando parches en diversas etapas de sucesión secundaria (10 ha-2500 km²) (Hansen *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2001). LPJ-DGVM es más simplista, al no modelar cohortes, no simula sucesiones y estructuras verticales de la vegetación, en cambio LPJ-GUESS es capaz de simular la competencia por recursos y sucesiones.

Numerosos estudios han utilizado LPJ-DGVM para conocer los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas en diversas localidades del mundo, destacando Smith *et al.*, 2001; McGuire *et al.*, 2001; Lucht *et al.*, 2002; Sitch *et al.*, 2003, entre otros⁴).

⁴ Una compilación de publicaciones en las cuales se ha aplicado LPJ-DGVM se puede encontrar en <https://www.pik-potsdam.de/research/projects/activities/biosphere-water-modelling/lpjml/publications>

IV. MATERIALES Y MÉTODO

4.1 Modelo Dinámico de Vegetación "LPJ-GUESS"

LPJ-GUESS es un modelo mecanístico basado en procesos, este simula la estructura y dinámica de ecosistemas terrestres utilizando descripciones explícitas de procesos fisiológicos, biogeoquímicos y de dinámica de población en diferentes escalas de tiempo y espacio (Smith *et al.*, 2001; Sitch *et al.*, 2003).

La vegetación en LPJ-GUESS está representada como una mezcla de tipos funcionales de plantas (PFTs, por sus siglas en inglés), caracterizados por diferentes atributos estructurales, fisiológicos, fenológicos y de historia de vida, que compiten por luz y agua. Un conjunto limitado de variables bioclimáticas determina la distribución potencial de cada PFTs dentro de una zona determinada. Los parámetros que definen estos PFTs se ajustarán de manera de representar los tipos vegetacionales más relevantes presentes en el área de estudio.

La matriz de trabajo de LPJ-GUESS incorpora dos modelos distintos pero relacionados: el modelo de Lund-Postdam-Jena de Vegetación Dinámica Global, LPJ-DGVM (Sitch *et al.*, 2003) y el simulador ecosistémico general,

GUESS (Smith *et al.*, 2001). Los dos modelos tienen muchos elementos en común, pero difieren en la forma en que se representa la dinámica de la vegetación y estructura de la población. En el LPJ-DGVM cada individuo promedio representa el promedio de las propiedades de una población entera de un tipo de planta funcional (PFTs) que ocupa una celda. El modelo GUESS los individuos promedio representa la edad promedio de las propiedades de un PFTs en una determinada parcela. En ambos modelos, la vegetación se representa como una mezcla de diferentes tipos de plantas funcionales (PFTs), que se caracterizan por diferentes atributos fisonómicos, fisiológicos y fenológicos.

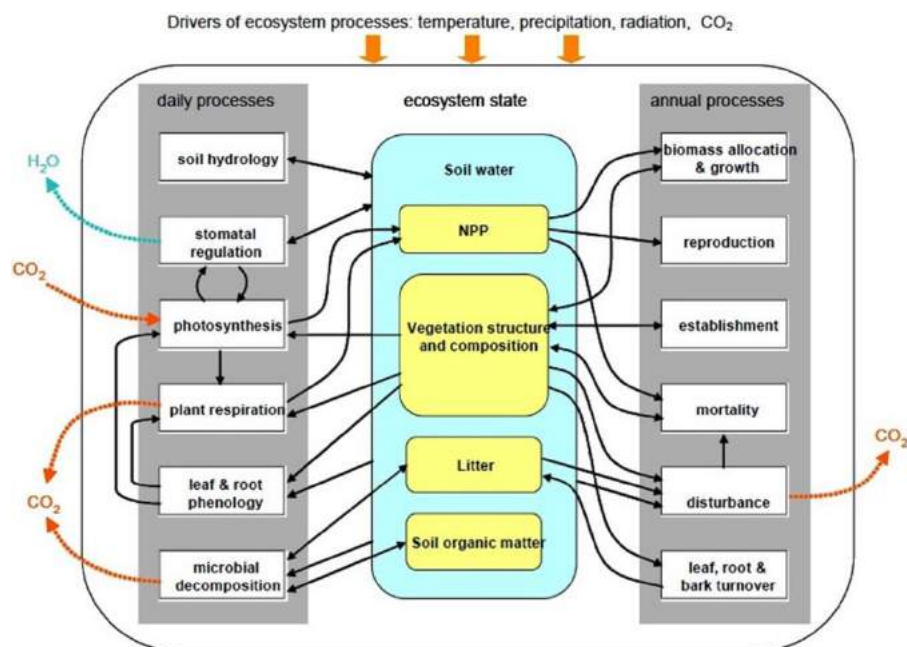


Figura 5. Representación esquemática de funcionamiento de LPJ-GUESS.

Fuente. Morales, 2006.

4.1.1 Datos de entrada (inputs) requeridos por el modelo

Para realizar la simulación LPJ-GUESS requiere como datos de entrada las series de tiempo mensual de la temperatura media, precipitación, porcentaje de cobertura de nubes, además de las concentraciones atmosféricas anuales de CO₂ e información respecto a la textura del suelo. En la Tabla 1 se muestra un detalle de las variables antes mencionadas.

Tabla 1. Inputs LPJ-GUESS.

Datos de entrada	Fuente
Temperatura media Precipitación Porcentaje de cobertura de nubes	La serie de tiempo (1901-2013), es obtenida de la base de datos climáticos CRUTS 3.0 proveída por el Climate Research Unit (CRU) de la Universidad de East Anglia (Harris et al., 2014). http://www.cru.uea.ac.uk/data Las series de tiempo (2014-2100) correspondientes a los escenarios futuros de calentamiento global (A2 y B2) fueron obtenidas de Tyndall Centre for Climate Change Reserch (Mitchell <i>et al.</i> , 2003). http://www.tyndall.ac.uk/
Textura de suelo Concentración atmosférica global de CO ₂ para el periodo PFT	Base de datos de clasificación de suelos realizada por FAO, 1991 y Sitch <i>et al.</i> , 2003. Carbon Cycle Model Linkage Project Escobar, 2013.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Estudios que han validado el modelo

Al menos 170 estudios⁵ avalan la aplicación de LPJ GUESS como una herramienta adecuada para la predicción de la vegetación potencial y la productividad tanto a escala mundial como regional; destacando el trabajo de Smith *et al.*, 2001; Badeck *et al.*, 2001; Hickler *et al.*, 2004; Hickler *et al.*, 2012; Morales *et al.*, 2005; Morales *et al.*, 2007; Pappas *et al.*, 2013; Hanna, 2015

4.2 Escenario de emisiones

Los escenarios corresponden a imágenes de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las emisiones futuras de GEI, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos climáticos, que proporcionen información que ayude a tomar medidas de mitigación y adaptación del cambio de clima. (IPCC, 2000).

El año 1992, el IPCC publicó los primeros escenarios de emisiones, denominados “Escenarios IS92”, los cuales proporcionarían estimaciones de todos los gases de efecto invernadero, que serviría de base para los modelos

⁵ Una lista de todas las publicaciones respecto a la utilización de LPJ-GUESS como DGVM está en http://iis4.nateko.lu.se/lpj-guess/LPJ-GUESS_bibliography.pdf

climáticos; pero el año 1996 se desarrollaron nuevos escenarios, los que tendrían valores más completos de las emisiones de GEI y datos más reales al incorporar información sobre desarrollo económico del futuro; con esta nueva información, se elabora el tercer informe de evaluación.

Los nuevos escenarios son denominados escenarios IEEE⁶ (SRES en inglés), se agrupan en 4 familias A1, A2, B1, B2, que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes (IPCC, 2007).

Tabla 2. Escenarios de emisiones determinados por IPCC.

Escenario de emisión	Características
A1	Presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes.
A2	Describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.
B1	Describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
B2	Describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. No se han asignado niveles de probabilidad a ninguno de los escenarios.

Fuente. Elaboración propia, citando informe IPCC, 2007.

⁶ IPCC publicó en el año 2000 el documento "Informe especial sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000)" en el que presenta una serie de escenarios de emisiones, denominados escenarios IEEE (SRES en inglés), de este informe derivan las siglas IE-EE que identifican a los escenarios.

En busca de una constante mejora para obtener un conocimiento más acabado de cambio climático, el IPCC en su quinto informe, define 4 nuevos escenarios de emisiones “Trayectorias de Concentración Representativas”, (RCP por sus siglas en inglés), los que se caracterizan por el cálculo de forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100.

Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5) (IPCC, 2013).

La principal diferencia entre los escenarios de emisiones IE-EE y SRES, es que estos últimos pueden contemplar los efectos que tendría la aplicación de políticas climáticas orientadas a mitigar el cambio climático, en cambio los escenarios utilizados en el tercer y cuarto informe no contemplaban políticas climáticas; sin embargo existen publicaciones recientes que siguen utilizando los escenarios de emisiones IE-EE (Pappas *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014; Cannaby *et al.*, 2015; Ashworth *et al.*, 2015), avalando que la información que éstos proporcionan sigue siendo útil en la investigación del cambio climático; y por ende acreditan el uso de los escenarios utilizados en el presente AFET.

4.3 Biomás en estudio

El efecto del cambio climático sobre el balance de carbono en ecosistemas terrestres se evaluará en cinco biomas representativos de Chile: Matorral y Bosque esclerófilo; Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, Bosque Magallánico, Bosque Caducifolio Frío y Bosque Templado Deciduo.

- Matorral y Bosque Esclerófilo

Se extiende a través de la cordillera de la costa desde 30°50 lat S hasta 36°30 lat. S, entre los ríos Limarí e Itata; en la depresión intermedia desde 30°50 hasta 37°50 lat. S, entre el río Limarí hasta el río Malleco; y en la cordillera de los Andes 32° hasta 37°50 lat S, entre los Vilos y las cercanías de Collipulli (Donoso, 1981). La superficie que abarca entre la Región de Valparaíso y Bío Bío es de 432.000 de hectáreas, a nivel regional no es una superficie muy extensa, pero es rica en biodiversidad (CIREN, 2011). Las especies típicas son los árboles de hoja perenne *Cryptocarya alba*, *Lithrea caustica*, *Quillaja saponaria* y *Peumus boldus*.

- Bosque Valdiviano y Nordpatagónico

Este bioma abarca una superficie de unos 300.000 km² entre el paralelo 37° S y el 48° S y se caracteriza por presentar bosques siempreverdes de múltiples estratos, en un clima templado-lluvioso u oceánico. Presenta una gran riqueza de especies predominando las angiospermas siempreverdes (ej. *Aextoxicon punctatum*, *Eucryphia cordifolia*, *Laureliopsis philippiana*, *Dasyphyllum diacanthoides*, *Nothofagus betuloides*, *N. dombeyi*). Como elementos constituyentes de importancia también resaltan especies arbóreas caducas (*N. obliqua* y *N. alpina*) y coníferas (ej. *Podocarpus salignus*, *P. nubigena*, *Fitzroya cupressoides*; Luebert y Pliscoff, 2005; Veblen, 2007)

- Bosque Magallánico

Este bioma se distribuye aproximadamente entre los 47 ° 30' Lat S y 55 ° Lat S estando éste sujeto a condiciones más frías y más húmedas que el Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, además de ser estructuralmente menos rico en especies (Tecklin *et al.*, 2011). Estos ecosistemas se localizan predominantemente en la costa y están dominados principalmente por Coigües de Magallanes (*Nothofagus betuloides*; Veblen, 2007).

- Bosque Caducifolio Frío

Este bioma se localiza principalmente entre los 35 ° Lat S y 55 ° Lat S. Las especies dominantes corresponden a *Nothofagus pumilio* y *N. antártica*, las cuales se caracterizan por una gran amplitud de su área de distribución. En el norte de su área de distribución, sus poblaciones se localizan principalmente en las franjas vegetacionales más altas de la Cordillera de los Andes (Pollmann y Hildebrand, 2005).

- Bosque templado deciduo

Este bioma se distribuye aproximadamente entre los 34° 45' Lat S y 36° 50' Lat S, dominando las franjas de la Cordillera de los Andes sobre los 650 msnm y la Cordillera de la Costa sobre los 200 msnm. (Veblen *et al.*, 1996). Está conformado por bosques que están dominados por especies caducifolias de hoja ancha como *Nothofagus obliqua*, *N. glauca* y *N. alessandrii*. Importante es mencionar que este bioma se encuentra fuertemente afectado por actividades antropogénicas, sobre todo por la silvicultura basada en monocultivo (Bustamante *et al.*, 2005).

4.4 Protocolo de simulación

Este AFET se realizó para dos escenarios de emisiones, SRES B2 y SRES A2, descritos por IPCC (1996).

La simulación comenzó desde una primera fase ("spin up"), que durará 1.000 años para alcanzar el equilibrio entre la vegetación y los diferentes pools de carbono y el clima. Durante esta fase se utilizaron los datos climáticos que comprenden los primeros 30 años del período histórico (1900-1930) repetidos continuamente, se escogen arbitrariamente estos años, ya que no se percibirían los efectos de cambio climático a diferencia de los años 60' que con la era industrial se comienzan a observar.

Después de "spin up" se simuló el período histórico comprendido entre los años 1901-2013, la cual dura 112 años; luego se simuló la fase escenario, que es nuestro escenario futuro, para ello, se utilizó la climatología histórica unida a la climatología futura correspondiente al periodo 2014-2100.

Para describir el balance de carbono simulado entre el ecosistema y la atmósfera tanto para el periodo histórico como para los diferentes escenarios de cambio climático se utilizarán las variables modeladas correspondientes a Producción Neta Primaria mensual (NPP), Respiración Heterotrófica mensual

(Rh) e Intercambio Neto del Ecosistema (NEE). NPP fue modelada como la diferencia entre la Producción Bruta Primaria (GPP) y la respiración autotrófica (Ra). NEE fue calculada como la diferencia entre NPP y Rh.

4.5 Sitios de estudio y análisis de resultados

Para los análisis de NPP, Rh y NEE se utilizaron dos coordenadas por bioma, exceptuando el Bioma Matorral y Bosque Esclerófilo que fue analizado utilizando sólo una coordenada. El objetivo de este análisis doble, es inferir la consistencia del modelo para simular los flujos de carbono para un mismo tipo de bioma.

Tabla 3. Set de coordenadas utilizadas para análisis de los Biomas.

Biomas	Coordenadas Set 1		Coordenadas Set 2	
	Lon	Lat	Lon	Lat
Bosque Valdiviano y Nordpatagónico	73°50´	42°00´	73°50´	41°00´
Matorral y Bosque Esclerófilo	72°50´	35°50´	-	-
Bosque Magallánico	73°00´	45°50´	73°00´	45°00´
Bosque Caducifolio Frío	72°50´	51°50´	72°50´	48°00´

Fuente. Elaboración propia

Con el objetivo de evaluar el desempeño LPJ-GUESS en relación a su capacidad de poder simular de forma realista tanto la magnitud como la estacionalidad de los flujos de carbono, se compararon cualitativamente los

valores simulados de NPP por LPJ-GUESS con los valores estimados por el producto satelital MOD17A2 de MODIS (NPP)⁷ para el período 2000 al 2006⁸ con una resolución de 0.5° x 0.5°. Adicionalmente, se obtuvo el grado de ajuste del modelo a través del cálculo de la raíz del cuadrado medio del error (RMSE en sus siglas en inglés) y el coeficiente de correlación de Pearson.

Los biomas en estudio para este AFET, son representados por 11 tipos funcionales de plantas (PFTs). La data fue obtenida del trabajo realizado por Escobar (2013), donde este conjunto de PFTs fue creado de acuerdo a la sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile hecha por Luebert y Pliscoff (2006) y a la clasificación de los tipos forestales de los bosques nativos de Chile realizada por Donoso (1981). Ver Anexo 1.

⁷ http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD17A2_M_PSN

⁸ MODIS no presenta datos para los años anteriores a 2000 y el periodo histórico, para el caso del presente estudio, es descrito por la serie temporal de CRU la que considera el intervalo de tiempo comprendido entre los años 1900-2006. Por tal motivo es que no se consideraron las imágenes MODIS a partir del año 2007 a 2016.

V. RESULTADOS

5.1 Vegetación Potencial bajo condiciones de clima histórico (1960-1990)

LPJ-GUESS simuló de buena manera la dominancia de los principales PFTs descritos por Luebert y Plischoff (2006) y CBN para el Matorral y Bosque Esclerófilo, Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, Bosque Caducifolio frío y Bosque Magallánico (Figura 6). El modelo no pudo representar la existencia de los Bosques Caducifolios templados dominados por *Nothofagus obliqua* y *N. glauca*.

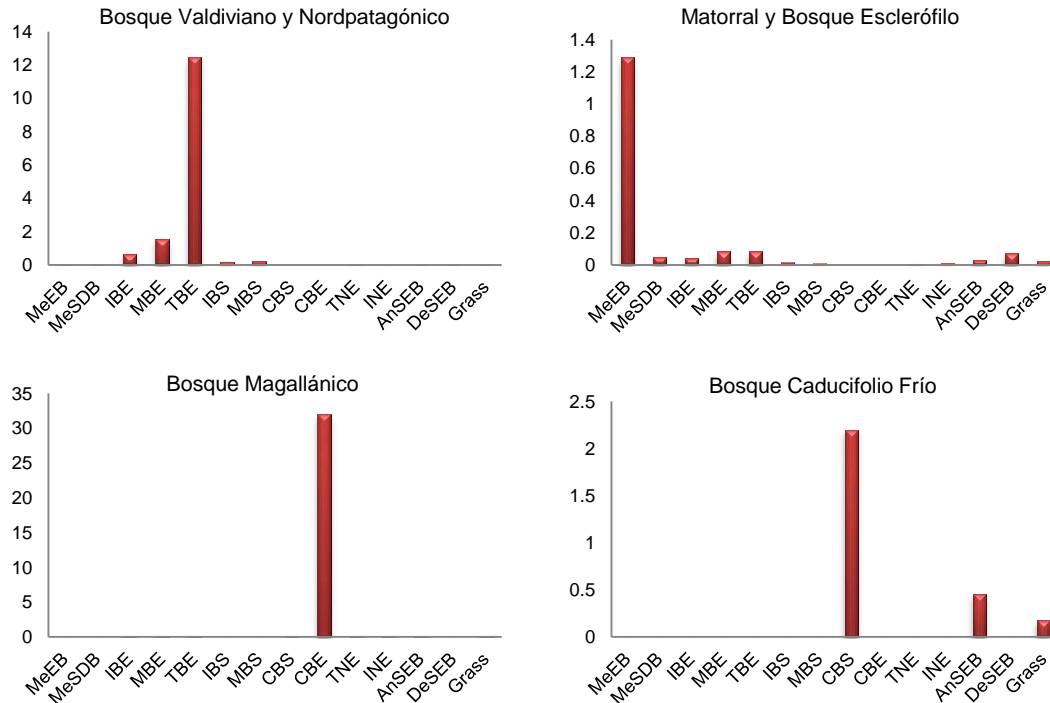


Figura 6. Vegetación potencial simulada por LPJ-GUESS expresada en unidades de biomasa (Kg C m^{-2}) para los principales biomas forestales de Chile para el periodo histórico 1960-1990.

5.2 Comparación de datos simulados por LPJ-GUESS con imágenes satelitales MODIS

- **Matorral y Bosque Esclerófilo**

La Figura 7 muestra que LPJ-GUESS no simuló correctamente ni la magnitud de la productividad neta primaria mensual ni su variabilidad estacional en el periodo 2000-2006.

Al respecto, las mayores diferencias se observan durante los meses de verano (enero-febrero) donde al contrario de los valores reportados por MODIS, LPJ-GUESS simuló valores negativos para NPP indicando una condición en la cual se libera CO₂ hacia la atmósfera.

En relación al grado de ajuste del modelo, el estadístico RMSE, expresado en porcentaje, fue de 138.5% ($r^2 = 0.01$) indicando las grandes diferencias existentes entre ambas series de datos. En efecto LPJ-GUESS subestimó sistemáticamente los valores reportados por MODIS durante el periodo estival (Figura 7).

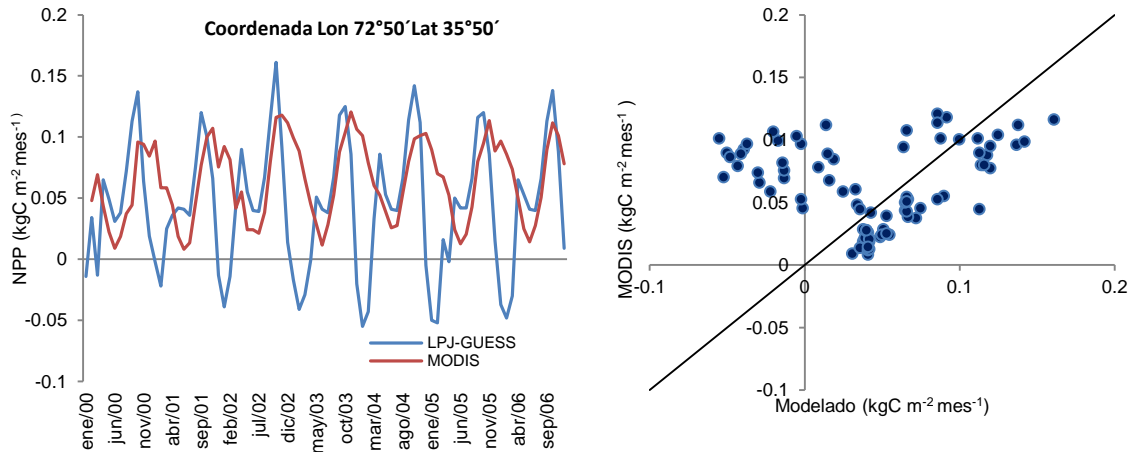


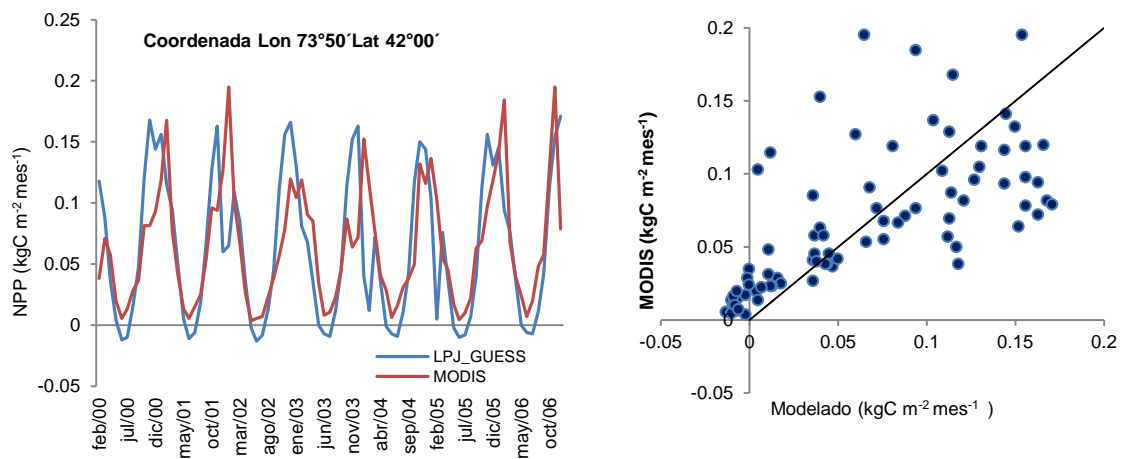
Figura 7. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Matorral y Bosque Esclerófilo, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.

- **Bosque Valdiviano y Nordpatagónico**

A diferencia de lo mostrado para el Matorral y Bosque Esclerófilo, LPJ-GUESS capturó de mejor manera la variabilidad estacional de NPP, con mayores tasas de secuestro de carbono por parte de la vegetación durante los meses de primavera y verano. Sin embargo, en algunos años, el modelo volvió a simular una disminución de NPP durante la estación estival (enero y febrero), situación que, en general, no fue capturada por el producto MODIS. Este fenómeno fue modelado de manera más pronunciada en la Coordenada 1. Finalmente, durante los meses de invierno el modelo simuló balances levemente negativos de NPP, situación que no fue coincidente con los datos de NPP obtenidos desde las imágenes MODIS, los cuales mostraron un balance positivo de la variable a lo largo de todo el año.

Respecto a las diferencias en magnitud entre ambas series de datos (MODIS v/s LPJ-GUESS), éstas dependieron, en parte, de las coordenadas espaciales simuladas. Mientras que en la Coordenada 1 (73.5°O; 41°S) LPJ-GUESS subestimó gran parte de los valores capturados por MODIS durante gran parte del año, en la Coordenada 2 (73.5°O; 42°S) el modelo tendió a sobreestimar los valores de NPP, especialmente en los meses de primavera y verano.

En relación al ajuste de los datos modelados, éste fue mejor para la Coordenada 2, con un RMSE=70.12% ($r^2 = 0.48$) que para la Coordenada 1 que mostró un RMSE = 104.86% ($r^2 = 0.33$)



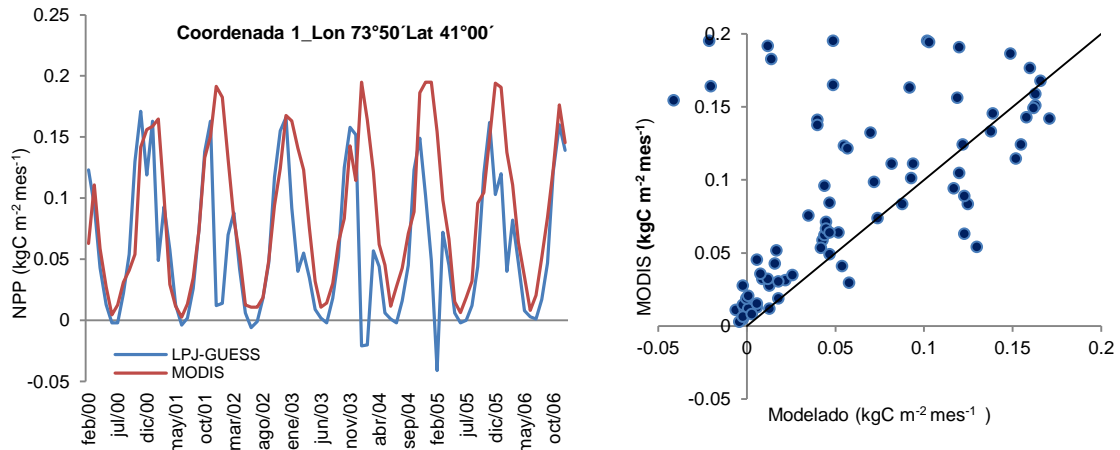


Figura 8. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.

- **Bosque Magallánico**

LPJ-GUESS capturó correctamente, en ambas coordenadas, la variabilidad estacional de NPP, simulando mayores valores durante los meses de primavera y verano (mayores tasas de secuestro carbono) y tasas de secuestro de carbono, por parte de la vegetación, cercanas a 0 durante el periodo de invierno (Figura 9). Una diferencia importante que se muestra entre ambas series de datos es que el pico de NPP fue simulado por LPJ-GUESS, en general, un mes antes (diciembre) que lo mostrado por MODIS (enero-febrero). En ambas coordenadas el patrón es similar.

En relación a las magnitudes simuladas, en ambas coordenadas, el modelo sobreestimó, en general, los valores de MODIS durante gran parte de la

estación de crecimiento (Figura 9). Solo en los meses de invierno (junio, julio, agosto) LPJ-GUESS subestimó de manera importante los valores de MODIS, modelando balances cercanos a 0 de CO₂.

El ajuste de los datos modelados fue similar para ambas coordenadas, presentando la Coordenada 1 un RMSE de 77% ($r^2 = 0.53$) y la Coordenada 2 un RMSE 75% ($r^2 = 0.54$).

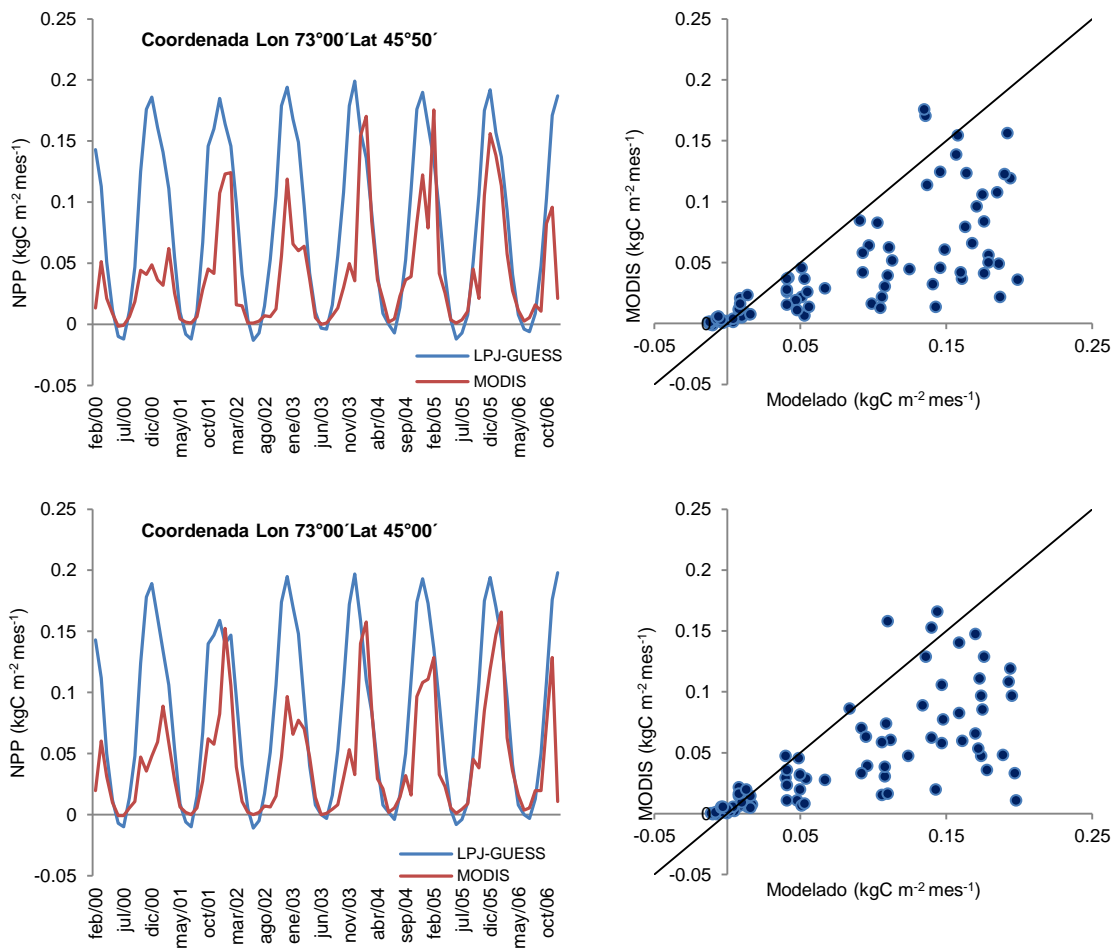
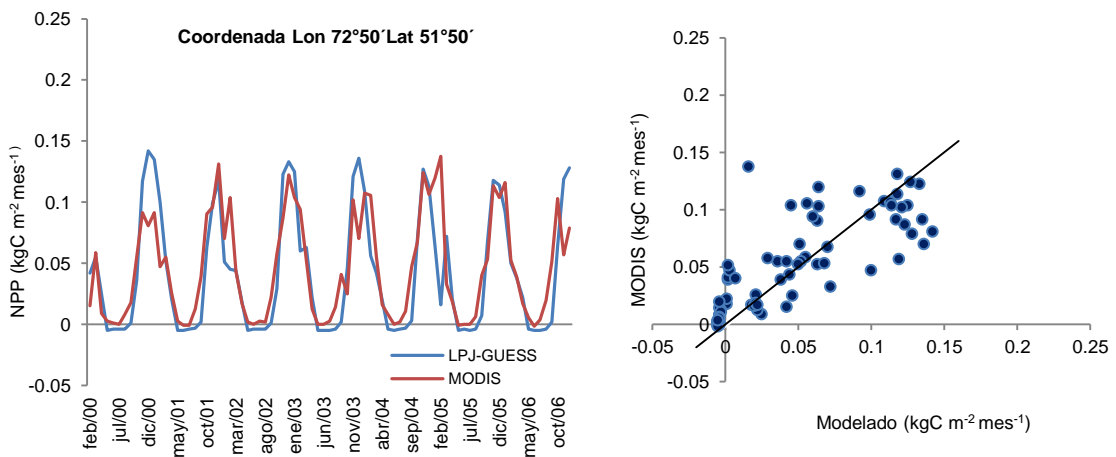


Figura 9. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Magallánico, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006

- **Bosque Caducifolio Frío**

En ambas coordenadas LPJ-GUESS capturó satisfactoriamente la variabilidad estacional de NPP, con mayores tasas de secuestro de carbono por parte de la vegetación durante los meses de primavera y verano (Figura 10). En general, los valores de NPP simulados por el modelo sobreestiman los valores reportados por MODIS durante el periodo primavera-verano, situación que es más notoria en la Coordenada 2 (Figura 10). Por otra parte, LPJ-GUESS tendió a subestimar los valores de NPP mostrados por MODIS durante el invierno.

Al igual que para el caso del Bosque Magallánico, el grado de ajuste del modelo fue similar para ambas coordenadas. Mientras que para la Coordenada 1 el RMSE calculado fue de 68% ($r^2 = 0.67$) para la Coordenada 2 el RMSE fue igual a 71% ($r^2 = 0.72$)



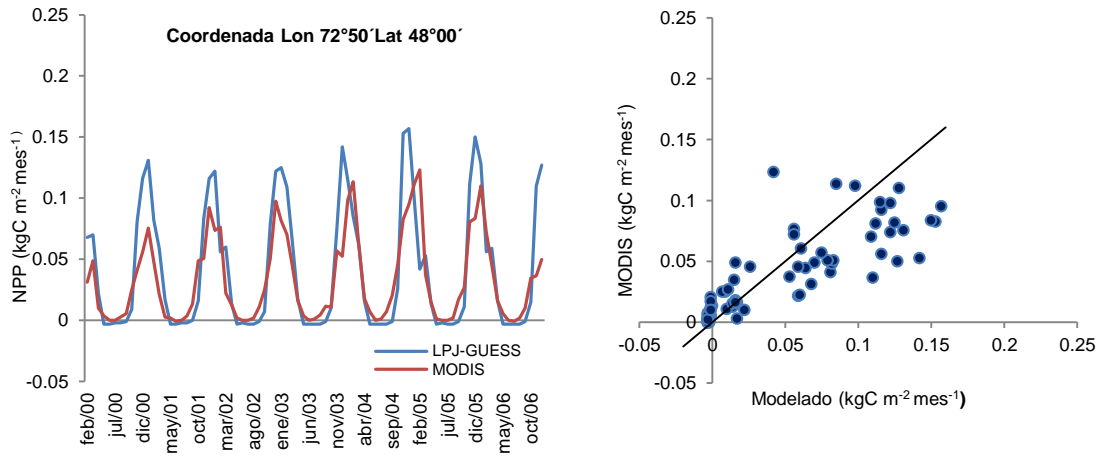


Figura 10. Comparación de la variación anual de valores de NPP ($\text{KgC m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de Bosque Caducifolio Frío, entre datos modelados y MODIS para los años 2000-2006.

5.3 Balance de carbono para el periodo histórico 1960-1990 (baseline).

En general y para el periodo histórico 1960-1990 (baseline), LPJ-GUESS replicó de buena manera los patrones estacionales de NEE y NPP en casi todos los biomas en estudio, exceptuando los biomas Matorral y Bosque Esclerófilo y Bosque Caducifolio templado el cual, como fue anteriormente mencionando, no fue simulado por el modelo. Al respecto, tanto para NPP como NEE los picos de absorción de carbono se simularon durante los meses de primavera-verano y la liberación de carbono en los meses de invierno.

- **Matorral y Bosque Esclerófilo**

En la Figura 11, se aprecia que los picos de absorción de carbono por parte del ecosistema (NEE) fueron simulados entre los meses de octubre y noviembre, mientras que la liberación de carbono hacia la atmósfera fue modelada durante los meses de enero y febrero (mismo patrón se repite en para el caso de NPP). Respecto a Rh, este proceso se mantiene con tasas positivas durante todo el año, siendo éstas mayores en magnitud durante los meses de invierno.

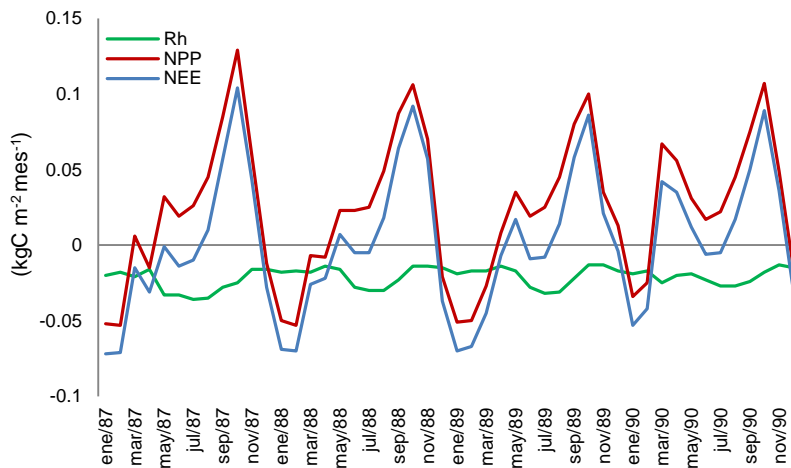


Figura 11. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de Bioma Matorral y Bosque Esclerófilo Lon 72°50' Lat 35°50'.

Valores positivos de NEE, NPP y Rh indican una situación en la cual el ecosistema y la vegetación están secuestrando carbono, respectivamente (valores negativos indican condición opuesta).

- **Bosque Valdiviano y Nordpatagónico**

En general, para este bioma las tasas de secuestro de carbono por parte del ecosistema (NEE) son mayores durante el periodo primavera-verano, siendo los meses de invierno el momento en el cual se modeló un balance de carbono negativo en este ecosistema. Al respecto, durante el invierno las tasas de Rh simuladas por LPJ-GUESS fueron mayores a los valores de NPP, lo que se traduce en un aumento de la liberación de carbono desde el ecosistema hacia la atmósfera ($NEE < 0$; Figura 12).

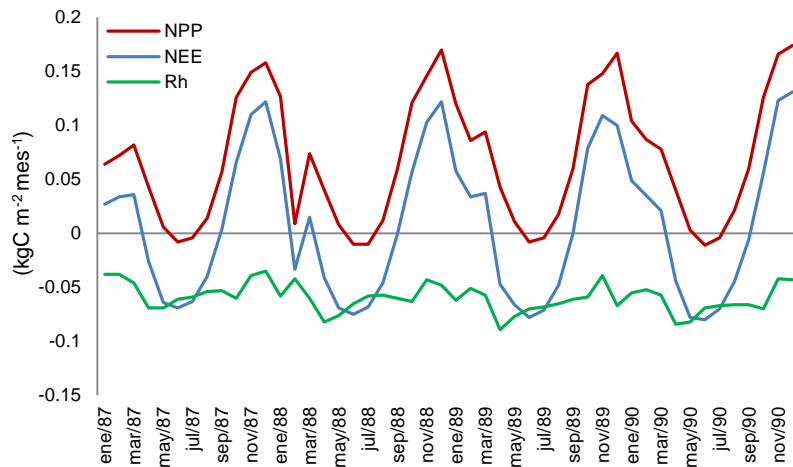


Figura 12. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de Bioma Bosque Valdiviano y Norte Patagónico coordinada Lon $73^{\circ}50'$ Lat $42^{\circ}00'$.

Los patrones de la coordinada Lon $73^{\circ}50'$ Lat $41^{\circ}00'$ se muestran en el Anexo 2. Valores positivos de NEE, NPP y Rh indican una situación en la cual el ecosistema y la vegetación están secuestrando carbono, respectivamente (valores negativos indican condición opuesta).

- **Bosque Magallánico**

Al igual que para el caso del Bosque Valdiviano y Nordpatagónico, las mayores tasas de absorción de carbono por parte del ecosistema (NEE) fueron simulados durante los meses de diciembre, enero y febrero, lo cual se debe al aumento de la tasa de fotosíntesis por parte de la vegetación durante ese periodo (NPP >0; Figura 13).

Durante los meses de otoño e invierno el proceso de respiración heterotrófica predomina por sobre NPP provocando que el ecosistema se comporte como una fuente de carbono con valores de NEE < 0.

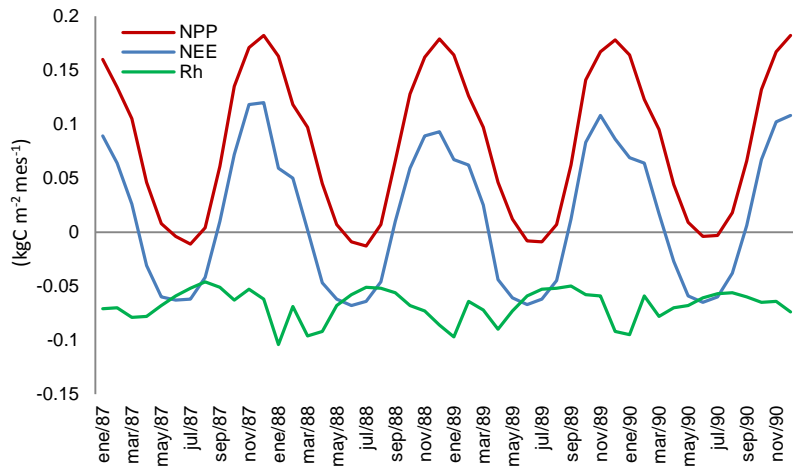


Figura 13. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de Bioma Bosque Magallánico coordenada Lon 73°00' Lat 45°50'.

La coordenada Lon 73°00' Lat 45°00' se muestra en el Anexo 2. Valores positivos de NEE, NPP y Rh indican una situación en la cual el ecosistema y la vegetación están secuestrando carbono, respectivamente (valores negativos indican condición opuesta).

- **Bosque Caducifolio Frío**

En la Figura 14 se muestra el balance de carbono simulado por LPJ-GUESS para el bioma Bosque Caducifolio Frío. Al respecto, el patrón modelado coincide con el mostrado para los otros biomas en estudio, con mayores y menores tasas de NEE durante el verano e invierno, respectivamente.

Una diferencia observable con los otros biomas es la relativa estabilidad en términos de magnitud ($\text{kg C m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) que describe a la Rh simulada durante el año. Al respecto, en este bioma la disminución de NEE durante los meses de otoño e invierno se explica principalmente con las menores tasas simuladas de NPP producto de la ausencia de hojas que caracteriza a este bioma durante este periodo.

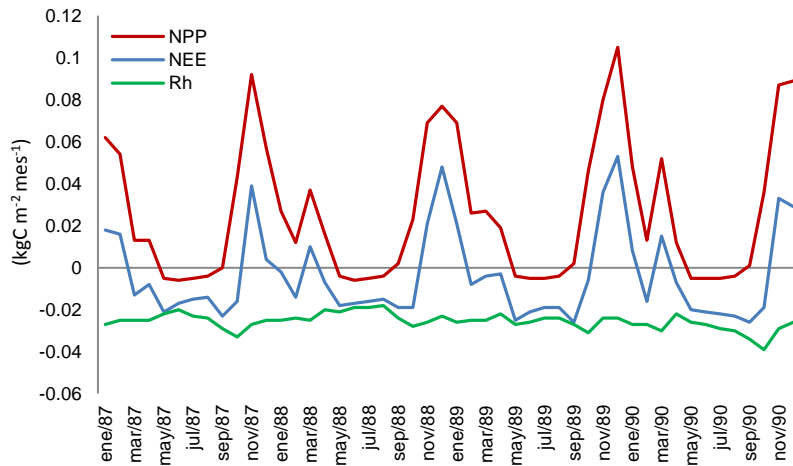


Figura 14. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) de Bosque Caducifolio Frío coordinada Lon 72°50' Lat 51°50'.

Los patrones de balance de carbono para la coordenada Lon 72°50' Lat 48°00' se muestran en el Anexo 2.

Valores positivos de NEE, NPP y Rh indican una situación en la cual el ecosistema y la vegetación están secuestrando carbono, respectivamente (valores negativos indican condición opuesta).

5.4 Balance de carbono para el período 2070-2100 en respuesta a los escenarios de cambio climático A2 y B2.

- **NPP**

En general e independiente del escenario de cambio climático, LPJ-GUESS simuló, para la mayoría de los biomas, un aumento de la tasas de secuestro de

carbono por parte de la vegetación (NPP) para el periodo 2070-2100 en relación a los valores NPP simulados para el periodo 1960-1990.

En particular, bajo el escenario A2 el modelo simuló mayores aumentos de NPP en relación al escenario B2 en todos los biomas. Respecto a los valores de NPP simulados bajo el escenario B2, LPJ-GUESS modeló un leve aumento de en la tasa de secuestro de carbono solo en los biomas correspondientes a Bosque Valdiviano y Nordpatagónico y Bosque Magallánico.

- **NEE**

En general tanto para el escenario A2 como B2, los valores de NEE simulados por LPJ-GUESS, muestran, para la mayoría de los biomas, una condición en la cual se proyecta una disminución del carbono secuestrado por parte del ecosistema a escala anual (Tabla 4). Esta condición no fue proyectada para el Bosque Caducifolio Frío, el cual mostró una diferencia positiva entre los valores simulados para los respectivos escenarios de cambio climático y el escenario baseline (incremento del secuestro de carbono por parte del ecosistema).

Pese a lo anteriormente descrito, es importante señalar que las magnitudes de NEE simuladas por LPJ-GUESS para el periodo 2070-2100 bajo los dos escenarios de cambio climático indican una condición cercana al equilibrio en

donde el balance entre las tasas de emisión y secuestro de carbono entre el ecosistema y la atmósfera es cercano a 0.

- **Rh**

Al igual que para el caso de NPP, LPJ-GUESS simuló, para ambos escenarios de cambio climático, una gran variación en la magnitud de los cambios de Rh en relación a la condición histórica (1960-1990), proyectando un aumento de las tasas de respiración heterotrófica en la mayoría de los biomas (Tabla 4). Este aumento de Rh fue mayor en el escenario A2 que en B2.

En general, bajo el escenario A2 el Bosque Valdiviano y Nordpatagónico y Bosque Magallánico son los que registran las mayores pérdidas de carbono desde la hojarasca del suelo. Para el caso del escenario B2 el Bosque Magallánico nuevamente es el bioma que registra los mayores aumentos de Rh, sin embargo, el Bosque Valdiviano y Nordpatagónico es el único en el cual se proyectó una disminución de Rh.

Tabla 4. Comparación de NPP, NEE y Rh ($\text{Kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de los años 2070-2100 con los años 1960-1990, para los biomas en estudio. Valores positivos de NEE, NPP y Rh indican una situación en la cual el ecosistema y la vegetación están secuestrando carbono, respectivamente (valores negativos indican condición opuesta).

Biomás	Baseline			Δ A2			Δ B2		
	NPP	NEE	Rh	NPP	NEE	Rh	NPP	NEE	Rh
	$\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$			$\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$			$\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$		
Bosque Valdiviano y Nordpatagónico	0.79	0.05569	-0.72	0.10	-0.04	-0.12	-0.06	-0.16	0.04
Matorral y Bosque Esclerófilo	0.31	0.00018	-0.24	0.06	-0.03	-0.03	0.037	-0.01	-0.09
Bosque Caducifolio Frío	0.41	-0.0532	-0.35	0.19	0.08	-0.12	0.077	0.03	-0.12
Bosque Magallánico	0.96	0.10992	-0.80	0.16	-0.25	-0.35	-0.01	-0.09	-0.09
Promedio	0.62	0.02815	-0.53	0.13	-0.06	-0.15	0.01	-0.06	-0.07

Fuente. Elaboración propia.

Las coordenadas analizadas en la tabla son las siguientes: Bosque Valdiviano y Nordpatagónico Lon 73° 50' Lat 42° 00'; Matorral y Bosque Esclerófilo Lon 72° 50' Lat 35° 50'; Bosque Caducifolio Frío Lon 72° 50' Lat 51° 50' y Bosque Magallánico 73° 00' Lat 45° 50'.

El set de coordenadas 2 se encuentra en el anexo 3.

VI. DISCUSIÓN

En Chile no se han realizado muchos estudios que aborden la dinámica de los bosques utilizando modelos dinámicos de vegetación global (DGVMs) ni tampoco existe una base de datos con observaciones respecto a las variables de NPP, Rh y NEE lo suficientemente robusta que permita realizar comparaciones con los valores obtenidos de las modelaciones. Por esta razón contrastar los datos obtenidos con información de satélites (ej. MODIS) resulta ser una buena práctica para ayudar a explicar de manera más precisa estas variables.

La importancia de potenciar este tipo de estudios, va de la mano con la propuesta de la OCDE en relación a la aplicación de una de las categorías de medidas de adaptación al cambio climático, donde indican que este tipo de investigación que toman en cuenta los impactos y escenarios de cambio climático enriquecen el conocimiento y proporcionan herramientas de análisis, monitoreo y predicción para la gestión de medidas especie específicas de protección de los ecosistemas (MMA, 2013).

A pesar de las desventajas que puede presentar LPJ-GUESS, los resultados obtenidos en este estudio indican que el modelo es una buena herramienta

para realizar proyecciones futuras de las respuestas de los ciclos del carbono de los diferentes biomas de Chile frente al cambio climático.

Los biomas analizados cubren gran parte de Chile, sobre todo la zona central, la que se verá más afectada con el cambio climático, registrando los mayores aumentos en las tasas de temperatura y disminución de la precipitación con respecto a los otros biomas (ver anexo 4).

6.1 Balance de carbono para el periodo histórico 1960-1990 (baseline).

En general, LPJ-GUESS replicó de buena manera los patrones estacionales de NPP y NEE en casi todos los biomas considerados en el presente AFET (Tabla 4). Al respecto, los resultados modelados se ajustaron a los valores de éstas variables reportados en la literatura a nivel global (Morales, 2006; Raich *et al.*, 1991; Kicklighter *et al.*, 1999; Luyssaert *et al.*, 2007).

Al analizar a nivel de biomas, para el caso del Matorral y Bosque Esclerófilo LPJ-GUESS simuló valores negativos de NPP y NEE para los meses de verano, indicando una condición en la cual se libera CO₂ hacia la atmósfera. Al respecto, dicha condición no se condice con lo reportado para este tipo de biomas para ese periodo de la estación de crecimiento, describiéndose un balance positivo en donde tanto la vegetación como el ecosistema en su

conjunto se comportan como un sumidero de carbono (Schimel *et al.*, 2001). En zonas con clima tipo mediterráneo, los ecosistemas terrestres deben enfrentar múltiples situaciones de estrés durante la estación de crecimiento tales como altas temperaturas y periodos de escasez hídrica de al menos 5-6 meses, lo que les ha llevado a desarrollar diversas respuestas adaptativas, siendo una de éstas el poseer un sistema de enraizamiento profundo que les permite acceder al agua disponible en capas más profundas del suelo. Esta condición les permite presentar un balance de carbono positivo durante la época seca (ej. primavera-verano) donde las tasas fotosintéticas podrían verse limitadas (ej. *Quillaja saponaria* y *Lithrea caustica*; Cabrera *et al.* ,2002). Esta condición adaptativa no está representada en la versión de LPJ-GUESS utilizada en este AFET, ya que no incluye rutinas que permitan modelar el almacenamiento de agua en capas inferiores del suelo (Wramneby *et al.*, 2008). Bajo una condición de estrés hídrico LPJ-GUESS simula el cierre de estomas para evitar la pérdida de agua de las plantas. En efecto, los valores de evapotranspiración modelados durante los meses de verano (datos no mostrados) fueron cercanos a 0, lo que indicaría una baja conductividad estomática producto del cierre parcial de los estomas durante este periodo lo que trajo como consecuencia que la actividad fotosintética se viera limitada, afectando el secuestro de carbono promedio mensual simulado para este bioma.

En relación al Bosque Valdiviano y Nordpatagónico las tasas de secuestro y liberación de carbono tanto a nivel de vegetación (NPP) como de ecosistema (NEE) se modelaron durante los meses de primavera-verano y en los meses de invierno, respectivamente lo que está en concordancia con lo reportado para ecosistemas localizados en zonas con condiciones climáticas similares a las de éste bioma. Pese a esta inferencia general, en uno de los años modelados ocurrió una disminución del secuestro en época estival, siendo una explicación posible el hecho de que durante ese periodo la tasa de precipitación asignada por CRU para sitio simulado fue baja en relación al mismo periodo pero en años diferentes. Al respecto, se estaría presentando la misma situación explicada para el caso del Matorral y Bosque Esclerófilo en donde LPJ-GUESS es incapaz de modelar el almacenamiento de agua en capas inferiores del suelo afectando negativamente el balance de carbono de este bioma.

La variabilidad estacional del balance de carbono (NPP y NEE) en el Bosque Magallánico fue, en términos generales, bien representada por LPJ-GUESS. Sin embargo, al realizar la comparación con los valores reportados por MODIS, las máximas tasas de secuestro de carbono fueron simuladas con un mes de desfase. Al respecto, esta situación podría estar relacionada con los datos de clima utilizados para correr el modelo (CRU).

El modelo no capturó de buena manera la estructura del bioma correspondiente al Bosque Caducifolio Templado. Al respecto, al realizar los análisis y sólo cuando se eliminaba de la modelación los PFTs de especies siempreverdes, el Bosque Caducifolio Templado de fue bien modelado. Esto se puede deber a las parametrizaciones propias del modelo por lo que para lograr una mejora en las simulaciones respecto a este bioma habría que desarrollar, por ejemplo, análisis de sensibilidad a parámetros clave.

Las simulaciones realizadas para los escenarios de cambio climático, prevén un aumento de NPP en todos los biomas y en ambos escenarios, situación que se condice con los resultados de Morales *et al.*, 2007; Levy *et al.*, 2004.

A pesar que los datos de clima, indican que los biomas se verán afectados por una disminución de las tasas de precipitaciones anuales, tanto en A2 como B2 (ver anexo 4), el aumento de la concentración de CO₂ y el aumento de la temperatura media (ODEPA, 2013; IPCC, 2014, 2013, 2007), estimularía la actividad fotosintética de las plantas y consecuentemente el crecimiento de éstas (Nadal-Salas *et al.*, 2013). Además el índice de área foliar en ambos escenarios registra aumentos en la cobertura vegetal de los biomas, sobre todo en el escenario A2 (Bosque Valdiviano 10%, Bosque Magallánico 15%; datos no mostrados), lo que reforzaría las predicciones del modelo.

La disminución en ambos escenarios de los valores de NEE significaría que los ecosistemas estarían aumentando su capacidad de actuar como sumidero de carbono con el paso del tiempo (Schimel *et al.*, 2001; Gilmanov *et al.*, 2010), esto a pesar de que las tasas de respiración heterotrófica tiendan a aumentar en el tiempo, condición que es contrarrestada por los aumentos de NPP.

Pese a que los Bosques Magallánico, Valdiviano y Esclerófilo presentan liberación de carbono hacia la atmósfera en ambos escenarios, el intercambio de carbono neto es cercano al equilibrio, ya que los resultados en la mayoría de los biomas son cercanos a 0 (ver tabla 4).

6.2 Limitaciones asociadas a la aplicación del modelo LPJ-GUESS en Chile

6.2.1 Limitantes generales

LPJ-GUESS presenta una alta sensibilidad frente a parámetros de las funciones que representan la fotosíntesis. De acuerdo a Pappas *et al.*, 2013, la eficiencia cuántica intrínseca explica la mayor parte de la variabilidad en los flujos de carbono entre la vegetación, el suelo y la atmósfera independiente de la composición de la vegetación y el clima. Esto último significa que el modelo tiene una alta incertidumbre frente a este parámetro lo que demanda la

implementación de representaciones más mecanísticas de los procesos de fijación y distribución del carbono en la planta.

6.2.2 Limitantes asociadas a la representación del ciclo hidrológico

Estas limitantes son reconocidas en primera instancia por Escobar, 2013, y son aplicables al presente AFET luego de analizados los resultados correspondientes:

- Las representaciones de los procesos hidrológicos del suelo relacionada con las condiciones de suelos anegados no es representada por la versión del modelo utilizada en este AFET, lo que no permite la simulación de ecosistemas en condiciones de saturación como turberas o de bosques resinosos de coníferas o siempreverdes, que son característicos en toda la zona austral occidental de Chile, desde Chiloé hacia el sur (Pliscoff y Luebert, 2006).
- El suelo está representado por un esquema simple de dos capas, el cual carece de una representación para almacenamiento de agua subterránea (Wramneby *et al.*, 2008). Esto puede traer como consecuencia que no se pueda simular, en algunos casos, ecosistemas en climas semiáridos (ej. matorral y bosque esclerófilo en Chile) en

donde muchas especies dependen del agua almacenada en acuíferos.

- La versión de LPJ-GUESS utilizada en este trabajo carece de una representación de los procesos de transporte lateral de agua (el modelo aplicado solo incluye una representación del movimiento vertical del agua entre la atmósfera, planta y suelo). Esto último es de importancia ya que tanto los procesos como funciones ecosistémicas de los biomas simulados están directamente influenciadas por la disponibilidad de agua. Por ejemplo, debido a la no inclusión de un esquema que represente el movimiento lateral del agua (ej. entre celdas simuladas), la diversidad en la predicción espacial de la distribución de la vegetación así como de los principales componentes del ciclo del carbono pueden ser limitados.

6.2.3 Limitantes asociadas a la representación de las dinámicas ecosistémicas

Estas limitantes son reconocidas en primera instancia por Escobar, 2013, y son aplicables al presente AFET luego de analizados los resultados correspondientes:

1. Debido a que LPJ-GUESS está diseñado para ser aplicado a nivel regional, no incluye representaciones de diversas estrategias de

reproducción tales como la reproducción vegetativa. Esta se ha atribuido como un factor importante que explica en parte la persistencia a largo plazo de algunas especies de árboles en los bosques lluviosos templados de Chile.

2. El modelo no tiene incluido un código para simular los efectos de perturbaciones a gran escala, tales como terremotos.
3. Las variables climáticas (temperatura media, precipitación y porcentaje de cobertura de nubes) son obtenidas de la base de datos climáticos CRU 3.0, en una resolución espacial de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ para todo el territorio chileno, esto es aproximado 50 km x 50 km de tamaño de área a modelar, siendo una medida muy gruesa; ya que el ideal para modelar Chile es de 100 mts por la geografía que presenta el territorio.

6.2.4 Limitaciones asociadas a las variables de entrada

Estas limitantes son reconocidas en primera instancia por Escobar, 2013, y son aplicables al presente AFET luego de analizados los resultados correspondientes:

1. El problema que presentan los modelos en general al simular cambio climático, es que existe una gran incertidumbre en los datos de entrada, no sabemos cómo será el rango de emisiones en un futuro, este es el

punto de mayor de incertidumbre, si bien existen cálculos de escenarios futuros, no hay una certeza que se cumplan las condiciones, por lo que se parte la modelación con un dato de entrada asociado a un grado de incertidumbre, a esto se debe sumar la incertidumbre de los modelos que simulan emisiones de escenarios futuros y escenarios actuales, por lo tanto LPJ-GUESS es una representación simplificada de la realidad, por lo que es una buena herramienta para explicar procesos y hacer proyecciones futuras.

VII. CONCLUSIÓN

Es importante ir mejorando los resultados obtenidos por el modelo, es por ello que es vital realizar nuevas investigaciones que permitan perfeccionar las parametrizaciones e incertidumbres asociadas a este, de esta manera se genera una data más sólida que permitirá a los tomadores de decisiones diseñar políticas más eficientes para enfrentar el cambio climático.

En general LPJ-GUESS replicó de buena manera en la mayoría de los biomas los patrones estacionales tanto para NPP como NEE, registrando los picos de absorción durante los meses de verano y la liberación en los meses de invierno.

Bajo las condiciones de cambio climático, los biomas se caracterizaron por presentar un incremento en los valores de NPP, no existiendo grandes variaciones en magnitud entre ambos escenarios. Pese a este aumento en la productividad por parte de la vegetación, el intercambio neto de carbono (NEE), se mantuvo cerca del equilibrio para ambos escenarios de cambio climático, explicado por un aumento de la tasas de R_h lo cual contrarresta los aumentos de NPP en un contexto de cambio climático.

Es importante señalar que el clave desarrollar nuevas investigaciones que permitan perfeccionar las parametrizaciones de los PFTs considerados, las bases de datos relacionadas con las variables de entrada del modelo y la inclusión de nuevos componentes que permitan simular de mejor manera tanto las perturbaciones de gran escala que inciden en la dinámica de los ecosistemas en Chile como la representación de procesos hídricos entre el suelo y la vegetación.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- ASHWORTH, A.; TAYLOR, A.; REED, D.; ALLEN, F.; KEYSER, P. Y TYLER, D. 2015. Environmental impact assessment of regional switchgrass feedstock production comparing nitrogen input scenarios and legumeintercropping systems. *Journal of Cleaner Production*. 87: 227-234.
- BADECK, F.; LISCHKE, H.; BUGMANN, H.; HICKLER, T.; HÖNNINGER, K.; LASCH, P.; LEXER, M.; MOUILLOT, F.; SCHABER, J. y SMITH, B. 2001. Tree species composition in European pristine forests: comparison of stand data to model predictions. *Climatic Change* 51 (3):307–347.
- BACHELET, D.; NEILSON, D.R.; HICKLER, T.; DRAPEK, R.; LENIHAN, J.; SYKES, M.T.; SMITH, B.; SITCH, S. y THONICKE, K. 2003. Simulating past and future dynamics of natural ecosystems in the United States. *Global Biogeochem. Cycles*, 17(2):1045.
- BRADSHAW, R. H. W.; JONES, C. S.; EDWARDS, S. J. y HANNON, G. E. 2015. Forest continuity and conservation value in Western Europe. *Holocene*. 25(1): 194-202.
- BUSTAMANTE, R.O.; SIMONETTI, J.A.; GREZ, A.A.y SAN MARTÍN, J. 2005. La fragmentación del bosque maulino y su dinámica regeneracional: diagnóstico actual y perspectivas futuras, In *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques de la cordillera de la Costa*, ed C. Smith, J.J. Armesto, and C. Valdovinos, 555-564. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- CABRERA, H. 2002. Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de alta montaña. *Revista Chilena de Historia Natural*. 75: 625-637.
- CEPAL. 2012. La economía del cambio climático en Chile. Santiago. Chile. 367. [En línea] <[http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/0/47220/La economia del cambio climatico en Chile Completo.pdf](http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/0/47220/La_economia_del_cambio_climatico_en_Chile_Completo.pdf)> [Consulta: enero 2014].
- CHEN, C.; ZUO, J.; CHEN, M.; GAO, Z. y SHUM, C. 2014. Sea level change under IPCC-A2 scenario in Bohai, Yellow, and East China Seas. *Water Science and Engineering* 7(4): 446-456.
- CIREN. 2011. Sistematización de información para el diagnóstico del estado actual del bosque esclerófilo en Chile. Informe Final. 84. [En línea] <<http://bosques.ciren.cl/xmlui/bitstream/handle/123456789/193/Bosque%20Escler%C3%B3filo-1.pdf?sequence=1>> [Consulta: marzo 2014].
- CONAF, CONAMA, BIRF, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE et al. (1999a) Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe nacional con variables ambientales. Santiago, Chile. 88.
- CONAF, CONAMA, BIRF, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE & UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN (1999b) Catastro y evaluación de los

recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo de cambios. Santiago, Chile. 12.

CONAMA. 2009. Plan de Acción Nacional de Cambio climático 2008 – 2012.

COX, P.; BETTS, R.; JONES, C.; SPALL, S. y TOTTERDELL, I. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408 (6809): 184–187.

DEMARIA, E.M.C.; MAURER, E.O.; THRASHER, B.; VICUÑA, S. y MEZA, F.J. 2013. Climate change impacts on an alpine watershed in Chile: Do new model projections change the story?. *Journal of Hydrology* 502:128–138.

DONOSO, C. 1981. *Tipos forestales de los bosques nativos de Chile*. Investigación y Desarrollo Forestal CONAF-FAO. 70.

ESCOBAR, C. 2013. Simulating current regional pattern and composition of Chilean native forests using a dynamic ecosystem model. Suecia, Lund University, Department of Physical Geography and Ecosystems Science. 63.

EVANS, M. R.; NORRIS, K. y BENTON, T. 2012. Predictive ecology: Systems approaches, *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.*, 367(1586):163–169.

FAO. 1991. The digitized soil map of the world (release 1.0). Vol. 67/1. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. . [En línea] <<http://www.fao.org/docrep/007/y5738e/y5738e00.htm> > [Consulta: enero 2014].

FAO. 2011. Situación de los bosques del mundo. Roma. 176.

GARREAUD, R. 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro*. 93.

GILMANOV, T.; AIRES, L.; BARCZA, Z.; BARON, V.S.; BELELLI, L.; BERINGER, J.; BILLESBACH, D.; BONAL, D.; BRADFORD, J.; CESCHIA, E.; COOK, D.; CORRADI, C.; FRANK, A.; GIANELLE, D.; GIMENO, C.; GRUENWALD, T.; GUO, H.; HANAN, N.; HASZPRA, L.; HEILMAN, J.; JACOBS, A.; JONES, M.B.; JOHNSON, D.A.; KIELY, G.; LI, K.; MAGLIULO, V.; MOORS, E.; NAGY, Z.; NASYROV, M.; OWENSBY, C.; PINTER, K.; PIO, C.; REICHSTEIN, M.; SANZ, M.J.; SCOTT, R.; SOUSSANA, J.F.; STOY, P.C.; SVEJCAR, T.; TUBA, Z. y ZHOU, G. 2010. Productivity, Respiration, and Light-Response Parameters of World Grassland and Agroecosystems Derived From Flux-Tower Measurements. *Rangeland Ecol Manage* 63:16–39.

GONZALES, P.; NEILSON, R.; LENIHAN, J. y DRAPEK, R.J. 2010. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*. 1-14.

GRACIA, C.A.; SABATE, S.; MARTINEZ, J.M. y ALBEZA, E. 1999. Functional responses to thinning. In: *Ecology of the Mediterranean Evergreen Oak Forests*. RODA, F.; RETANA, J.; GRACIA, C.A.; BELLOT, J. *Ecological Studies* 137: 329-337.

GRITTI, E. 2006. *Global Changes and European Terrestrial Ecosystems*. Suecia, Universidad de Lund, Departamento de Geografía de la Tierra y Ecosistemas. 184.

GRUBER, N.; FRIEDLINGSTEIN, P.; FIELD, C. B.; VALENTINI, R.; HEIMANN, M.; RICHEY, J. E.; ROMERO LANKAO, P.; SCHULZE, E. D. y CHEN, C. T. A. 2004. The Vulnerability of the Carbon Cycle in the 21st Century: An Assessment of Carbon-Climate-Human Interactions, In: *Global Carbon Cycle, Integrating Human, Climate, and the Natural World*(C. B. Field & M. R. Raupach, Ed), Island Press, Washington, D.C. 45-76.

GUTIÉRREZ, A.G. y HUTH, A. 2012. Successional stages of primary temperate rainforests of Chiloé Island, Chile. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. (14): 243-256.

HANNAH, L. 2015. Modeling Species and Ecosystem Response. *Climate Change Biology*. 2: 237–262.

HANSEN, A.; IRELAND, K. y POULTER, B. 2011. Modeling Vegetation Dynamics with LPJ-GUESS. *Bioscience*. 61:363-373.

HARRIS, I.; JONES, P.D.; OSBORN, T.J. y LISTER, D.H. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* 34: 623-642. [En línea] <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3711/epdf> > [Consulta: Septiembre 2015].

HAXELTINE, A. y PRENTICE, I.C. 1996. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*10: 693–710.

CANNABY, H.; FACH, B.; ARKIN, S. y SALIHOGLU, B. 2015. Climatic controls on biophysical interactions in the Black Sea under present day conditions and a potential future (A1B) climate scenario. *Journal of Marine Systems* 141: 149–166.

HICKLER, T.; SMITH, B.; SYKES, M.T.; DAVIS, M.B.; SUGITA, S.; y WALKER, K. 2004. Using a generalized vegetation model to simulate vegetation dynamics in northeastern USA. *Ecology*. 85: 519–530.

HICKLER, T.; VOHLAND, K.; FEEHAN, J.; MILLER, P.A.; SMITH, B.; COSTA, L.; GIESECKE, T.; FRONZEK, S.; CARTER, T.R.; CRAMER, W.; KÜHN, I. y SYKES, M. T. 2012. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecol. Biogeogr.* 21:50–63.

HOEGH-GULDBERG, O. y BRUNO, J.F. 2010. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science*. 328:1523-1527.

HOUGHTON, R.A. 2008. Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850-2005. In *TRENDS: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

IPCC. 2000. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Resumen para responsables de políticas. 17.

IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 104. [En línea] <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf> [Consulta: octubre 2013].

IPCC. 2012. Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Resumen para responsables de políticas. 32.

IPCC. 2013: "Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. [En línea] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf> [Consulta: enero 2014].

IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza. 34.

KHANDEKAR, M. 2013. The Global Warming Extreme Weather Link. A Review Of The State Of Science. 28.

KICKLIGHTER, D.; BONDEAU, B.; SCHLOSS, A.L.; KADUK, J. y MCGUIRE, A.D. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. *Global Change Biology* 5(1):16-24.

KOCA, D. 2006. Impacts of Regional Climate Change on Swedish Forest. An evaluation using process-based regional ecosystem modeling approach, Suecia, Departamento de Geografía de la Tierra y Ecosistemas. 116.

KOCA, D.; SMITH, B. y SYKES, M.T.; 2006. Modeling regional climate change effects on potential natural ecosystems in Sweden. *Climatic Change*. 78:381-406.

LENIHAN, J.; D, BACHELET.; NEILSON, R. Y DRAPEK, R. 2008. Response of vegetation distribution, ecosystem productivity, and fire to climate change scenarios for California. *Climatic Change*. 87(1):215–230.

LEVY, P.E.; CANNELL, M.G.R. y FRIEND, A.D. 2004. Global Environmental Change. 14: 21–30.

LOVEJOY, T. y HANNAH, L. 2006. *Climate Change and Biodiversity*. India, Tery press, 2006. 401.

LUCHT, W.; PRENTICE, C.; MYNENI, R.; SITCH, S.; FRIEDLINGSTEIN, P.; CRAMER, W.; BOUSQUET, P.; BUERMANN, W. y SMITH, B. 2002. Climatic Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect. *Science*. 296: 1687-1689.

LUEBERT, F. y PLISCOFF, P. 2005. Sobre los límites del bosque valdiviano. *Chloris Chilensis* 8:1. [En línea] <<http://www.chlorischile.cl/luebertvald/luebertvald.htm>> [Consulta: marzo 2014].

LUEBERT, F.yPLISCOFF, P. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 316.

LUYSSAERT, S.; INGLIMA, I.; JUNGS, M.; RICHARDSON, A.D.; REICHSTEINS, M.; PAPALE, D.; PIAO, S.L.; SCHULZES, E.D.; WINGATE, L.; MATTEUCCI, G.; ARAGAO, L.; AUBINET, M.; BEER, C.; BERNHOFER, C.; BLACK, K.G.; BONAL, D.; BONNEFOND, J.M.; CHAMBERS, J.; CIAIS, P.; COOK, B.; DAVIS, K.J.; DOLMAN, A.J.; GIELEN, B.; GOULDEN, M.; GRACE, J.; GRANIER, A.; GRELE, A.; GRIFFIS, T.; GRÜNWARD, T.; GUIDOLOTTI, G.; HANSON, P.J.; HARDING, R; HOLLINGER, D.Y.; HUTYRA, L.R.; KOLARI, P.; KRUIJT, B. KUTSCH, W.; LAGERGREN, F.; LAURILA, T.; LAW, B.E.; LEMAIRE, G.; LINDROTH, A.; LOUSTAU, D.; MALHI, Y.; MATEUS, J.; MIGLIAVACCA, M.; MISSON, L.; MONTAGNANI, L.; MONCRIEFF, J.; MOORS, E.; MUNGER, J.W.; NIKINMAA, E.; OLLINGER, S.V.; PITA, G.; REBMANN, C.; ROUPSARD, O.; SAIGUSA, N.; SANZ, M.J.; SEUFERT, G.; SIERRA, C.; SMITH, M.L.; TANG, J.; VALENTINI, R.; VESALA, T. y JANSSENS, I.A. 2007. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*.13: 2509–2537.

MAIGNAN, F.; BREON, F.M.; CHEVALLIER.F.; VIOVY, N.; CIAIS, P.; GARREC, C.; TRULES, J. y MANCIP, M. 2011.Evaluation of a Global Vegetation Model using time series of satellite vegetation índices.*Geoscientific Model Development*. 4:1103–1114.

MARQUET, P.; ABADES, S.; ARMESTO, J.; BARRIA, I.; ARROYO, M.; CAVIERES, L.; GAJARDO, R.; GARÍN.; LABRA, F.; MEZA, F.; PRADO.; RAMÍREZ DE ARELLANO, P. y VICUÑA, S. 2009. Estudio de vulnerabilidad de la biodiversidad terrestre en la eco-región mediterránea, a nivel de ecosistemas y especies, y medidas de adaptación frente a escenarios de cambio climático. Centro Cambio Global UC. 156.

McGUIRE, A. D.; SITCH, S.; CLEIN, J.S.; DARGAVILLE, R.; ESSER, G.; FOLEY, J.; HEIMANN, M.; JOOS, F. y KAPLAN, J. 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global BiogeochemicalCycles*.15:183-206.

MEARNS, L.; HULME, M.; CARTER, TR.; LEEMANS, R.; LAL, M. y WHETTON, P. 2001. *Climate Scenario Development*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Chang (IPCC). Climate Change. 2001. The Scientific Basis. J. Houghton, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaoxu D (eds). Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 739-768.

MELILLO, J.; MCGUIRE, A.; KICKLIGHTER, D.; MOORE, B.; VOROSMARTY, C. y SCHLOSS, A. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363: 234 - 240

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DE CHILE. 2011. Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Santiago. Chile. 289.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DE CHILE. 2013. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Borrador). Oficina de cambio climático. Chile. 50. [En línea] <http://www.mma.gob.cl/1304/articles-50880_documentoCambioClimatico.pdf> [Consulta: enero 2014].

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2014. Plan de adaptación al cambio climático en biodiversidad. Elaborado en el marco del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático y de la actualización de la Estrategia Nacional de Biodiversidad. Santiago. Chile. 97.

MITECHELL, T.D.; CARTER, T. R; JONES, P.D.; HULME, M. y NEW, M. 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). Tyndall Centre Working Paper. 55.

MOORCROFT, P.R. 2003. Recent advances in ecosystem-atmosphere interactions: an ecological perspective. *The Royal Society*. 270:1215–1227.

MORALES, P.; SYKES, M.T.; PRENTICE, I.C.; SMITH, P.; SMITH, B.; BUGMANN, H.; ZIERL, B.; FRIEDLINGSTEIN, P.; VIOVY, N.; SABATÉ, S.; SÁNCHEZ, A.; PLA, E.; GRACIA, C.A.; SITCH, S. ; ARNETH, A. y OGEE, J. 2005. Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes. *Global Change Biology*. 11: 2211-2233.

MORALES, P. 2006. Modelling carbon and water fluxes in European terrestrial ecosystems, Universidad de Lund, Suecia, Departamento de Geografía de la Tierra y Ecosistemas. 156.

MORALES, P.; HICKLER, T.; ROWELL, D.P.; SMITH, B. y SYKES, M.T. 2007. Changes in European ecosystem productivity and carbon balance driven by regional climate model output. *Global Change Biology*. 13: 108-122.

NADAL-SALA, D.; SABATÉ, S. y GRACIA, C. 2013. GOTILWA+: Un modelo de procesos que evalúa efectos del cambio climático en los bosques y explora alternativas de gestión para su mitigación. *Ecosistemas*. 22(3):29-36.

NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; SOARES-FILHO, B. y MERRY, F. 2008. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a nearterm forest tipping point, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 363: 1737-1746.

NEUENSCHWANDER, A. 2010. El Cambio Climático en el Sector Silvoagropecuario de Chile. 126.

ODEPA. 2013. Estudio: “Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía”. Ministerio de Agricultura. 38.

O’ISHI, R. y ABE-OUCHI, A. 2013. Influence of dynamic vegetation on climate change and terrestrial carbon storage in the Last Glacial Maximum. *Climate of the Past*. 9: 1571–1587.

OCDE, CEPAL. 2005. Evaluaciones del desempeño ambiental. Chile. 246.

OCDE, 2008. Examen OCDE de políticas agrarias. Chile. 168.

PAPPAS, C.; FATICHI, S.; LEUZINGER, S.; WOLF, A. y BURLANDO, P. 2013. Sensitivity analysis of a process-based ecosystem model: pinpointing parameterization and structural issues. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 118:505-528.

PARTON, W.J.; SCURLOCK, J.M.O.; OJIMA, D.S.; GILMANOV, T.G.; SCHOLLES, R.J.; SCHIMEL, D.S.; KIRCHNER, T.; MENAUT, J-C.; SEASTEDT, T.; GARCIA MOYA, E.; KAMNARUT, A. y KINYAMARIO, J.I. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochem*. 7: 785–809.

POLLMANN, W. y HILDEBRAND, R. 2005. Structure and the composition of species in timberline ecotones of the southern Andes. Berlin:Springer. In *Mountain ecosystems. Studies in treeline ecology*, ed. G. Broll, and B. Keplin, 117-151.

POST, E.; FORCHHAMMER, M.; BRET-HARTE, M.S.; CALLAGHAN, T.; CHRISTENSEN, T.; ELBERLING, B.; FOX, A.; GILG, O.; HIK, D.; HØYE, T.; IMS, R.; JEPPESEN, E.; KLEIN, D.; MADSEN, J.; MCGUIRE, D.; RYSGAARD, S.; SCHINDLER, D.; STIRLING, I.; TAMSTORF, M.; TYLER, N.; VAN DER WAL, R.; WELKER, J.; WOOKEY, P.; SCHMIDT, N. y AASTRUP, P. 2009. Ecological Dynamics Across the Arctic Associated with Recent Climate Change. *Science*. 325: 1355-1358.

PRENTICE, I.C.; BONDEAU, A.; CRAMER, W.; HARRISON, S.P.; HICKLER, T.; LUCHT, W.; SITCH, S.; SMITH, S. y SYKES, M.S. 2007. Dynamic global vegetation modeling: quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change. Berlin: Springer. In *Terrestrial ecosystems in a changing world*, ed. J.G. Canadell, D.E. Pataki, and L.F. Pitelka. 175-192.

PRENTICE, I.C.; WOLFGANG, C.; HARRISON, S.P.; LEEMANS, R.; MONSERUD, R.A. Y SOLOMON, A.M. 1992. Special Paper: A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance, Soil Properties and Climate. *Journal of Biogeography*. 19(2): 117-134.

RAICH, J.W.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; STEUDLER, P.A. y PETERSON, B.J. 1991. Potencial net primary productivity in south america: Application of a global model. 11(4):399-429.

RAUPACH, M. y CANADELL, J. 2010. Carbon and the Anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2: 210-218.

RINGEVAL, B.; DECHARME, B.; PIAO, S. L.; CIAIS, P.; PAPA, F.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; PRIGENT, C.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOUTTEVIN, I.; KOVEN, C. y DUCHARNE, A. 2012. Modelling sub-grid wetland in the ORCHIDEE global land surface model: evaluation against river discharges and remotely sensed data. *Geosci. Model Dev.* 5:941–962.

RÜGER, N.; GUTIERREZ, A.G.; KISSLING, W.D.; ARMESTO, J.J. y HUTH, A. 2007. Ecological impacts of different harvesting scenarios for temperate evergreen rain forest in southern Chile—A simulation experiment. *Forest Ecology and Management.* 252: 52–66.

RUNNING, S.W. y HUNT, E.R. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In J.R. Ehleringer and C.B. Field (eds.) *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe.* Academic Press, Inc. New York. 141-158.

RUSTAD, L. 2008. The response of terrestrial ecosystems to global climate change: Towards an integrated approach. *Science of the total environment.* 404: 22-235.

SATO, H. y TAKESHI, I. 2012. Effect of plant dynamic processes on African vegetation responses to climate change: Analysis using the spatially explicit individual-based dynamic global vegetation model (SEIB-DGVM). *Journal of Geophysical Research.* 117:1-18.

SCHIMMEL, D.; HOUSE, J.; HIBBARD, K.A.; BOUSQUET, P.; CIAIS, P.; PEYLIN, P.; BRASWELL, B.H.; APPS, M.J.; BAKER, D.; BONDEAU, A.; CANADELL, J.; CHURKINA, G.; CRAMER, W.; DENNING, A.S.; FIELD, C.B.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GOODALE, C.; HEIMANN, M.; HOUGHTON, R.A.; MELILLO, J.M.; MOORE, B.; MURDIYARSO, D.; NOBLE, I.; PACALA, S.W.; PRENTICE, I.C.; RAUPACH, M.R.; RAYNER, P.J.; SCHOLLES, R.J.; STEFFEN, W.L. y WIRTH, C. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature.* 414: 169-172

SITCH, S.; SMITH, B.; PRENTICE, I.C.; ARNETH, A.; BONDEAU, A.; CRAMER, W.; KAPLAN, J.O.; LEVIS, S.; LUCHT, W.; SYKES, M.T.; THONICKE, K. y VENEVSKY, S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Global vegetation model. *Global Change Biology.* 9: 161-185.

SMITH, B.; PRENTICE, I.C. y SYKES, M.T. 2001. Representation of vegetation dynamics in modelling of European ecosystems: comparison of two contrasting approaches. *Global Ecology and Biogeography.* 10: 621-638.

SMITH, B.; WARLIND, D.; ARNETH, A.; HICLER, T.; LEADLEYS, P.; SILTBERG, J. y ZAEHLE, S. 2014. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model. *Biogeosciences,* 11: 2027–2054

TECKLIN, D.; DELLASALA, D.A.; LUEBERT, F. y PLISCOFF, P. 2011. Valdivian temperate rainforests of Chile and Argentina. In *Temperate and boreal rainforests of the world: ecology and conservation,* ed. D.A. DellaSala, 132-153.

TRUMPER, K.; BERTZY, M.; DICKSON, B.; VAN DER HEIDEN, G.; JENKINS, M. y MANNING, P. 2009. The Natural Fix? The role of ecosystems in climate mitigation. A UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme, UNEPWCMC, Cambridge, UK. 68.

VALLADARES, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. 461-478.

VEBLEN, T.T.; DONOSO, C.; KITZBERGER, T. y REBERTUS, A.J. 1996. Ecology of southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests. In *The ecology and biogeography of Nothofagus forests*, ed. T.T. Veblen, R.S. Hill, and J. Read, 293-353.

VEBLEN, T.T.; YOUNG, K.R. y ORNE, A.R. 2007. Future environments of South America. In: Veblen, T.T., Young, K.R., Orne, A.R. (Eds.). *The Physical Geography of South America*. Oxford University Press, New York, USA. 340-352.

VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S. y GOIC, R. 2012. A review of climate change, mitigation and adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16:878– 897.

WENNERSTEN, R.; SUN, O. y LI, H. 2015. The future potential for Carbon Capture and Storage in climate change mitigation – an overview from perspectives of technology, economy and risk. *Journal of Cleaner Production*. 103: 724–736.

WILLIS, S.G.; FODEN, W.; BAKER, D.J.; BELLE, E.; BURGESS, N.D.; CARR, J.A.; DOSWALD, N.; GARCIA, R.A.; HARTLEY, A.; HOF, C.; NEWBOLD, T.; RAHBEK, C.; SMITH, R.J.; VISCONTI, P.; YOUNG, B.E. y BUTCHART, S.H.M. 2015. Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation*. 190:167–178.

WRAMNEBY, A.; SMITH, B.; ZAEHLE, S. y SYKES, M.T. 2008. Parameter uncertainties in the modeling of vegetation dynamics-Effects on tree community structure and ecosystem functioning in European forest biomes. *Ecological Modelling*. 216: 277-290.

YÁÑEZ-ARANCIBIA, A.; DAY, J.; TWILLEY, R. y DAY, R. 2014. Mangrove swamps: sentinel ecosystem in front of the climatic change, Gulf of Mexico. *Madera y Bosques*. 20:39-75.

IX. ANEXOS

9.1 Anexo 1

Tipos funcionales de planta (PFTs) existentes en Chile, clasificación realizada en el trabajo Simulating current regional pattern and composition of Chilean native forests using a dynamic ecosystem model de Cristián Escobar, 2013.

Tabla 5. Tipos de plantas funcionales (PFT) y sus especies representativas.

Type of ecosystem	PFT	Representative species
Sclerophyllous forest/shrubland	Mediterranean broadleaved evergreen (MeBE)	<i>Quillaja saponaria</i> , <i>Lithraea caustica</i> , <i>Peumus boldus</i> ,
	Mediterranean shrub broadleaved deciduous (MeSBD)	<i>Acacia caven</i> , <i>Prosopis spp</i>
	Desertic shrub broadleaved evergreen (DSE)	---
Valdivian and North Patagonian rain forests	Temperate shade-intolerant broadleaved evergreen (IBE)	<i>Embothrium coccineum</i> , <i>Weinmannia trichosperma</i> , <i>Nothofagus dombeyi</i>
	Temperate shade-mid-tolerant broadleaved evergreen (MBE)	<i>N. nitida</i> , <i>Eucryphia cordifolia</i> , <i>Drimys winteri</i>
	Temperate shade-tolerant broadleaved evergreen (TBE)	<i>Laureliopsis philippiana</i> , <i>Aextoxicon punctatum</i> , <i>Luma apiculata</i> , <i>Persea lingue</i> , <i>Amomyrtus luma</i>
	Temperate shade-intolerant needleleaved evergreen (INE)	<i>Fitzroya cupressoides</i> , <i>Pilgerodendron uviferum</i>
	Temperate shade-tolerant needleleaved evergreen (TNE)	<i>Saxegothaea conspicua</i> , <i>Podocarpus nubigena</i> , <i>P. salignus</i> .
Magellanic rain forest	Cool broadleaved evergreen (CBE)	<i>N. betuloides</i>
Temperate deciduous forests	Temperate shade-intolerant broadleaved summergreen (IBS)	<i>N. glauca</i> , <i>N. oblicua</i>
	Temperate shade-mid-intolerant broadleaved summergreen (MBS)	<i>N. alpina</i>
Cool deciduous forest/woodland	Cool broadleaved summergreen (CBS)	<i>N. pumilio</i> , <i>N. antarctica</i>
Magellanic rain forest; Cool deciduous forest/woodland; Magellanic steppe; High-Andean steppe	Cool shrub broadleaved evergreen (CSE)	---
---	Grasses (C3)	---

Fuente. Escobar, 2013

9.2 Anexo 2

Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) y Productividad Neta Primaria (NPP) para el período histórico 1960-1990. Set de coordenadas 2.

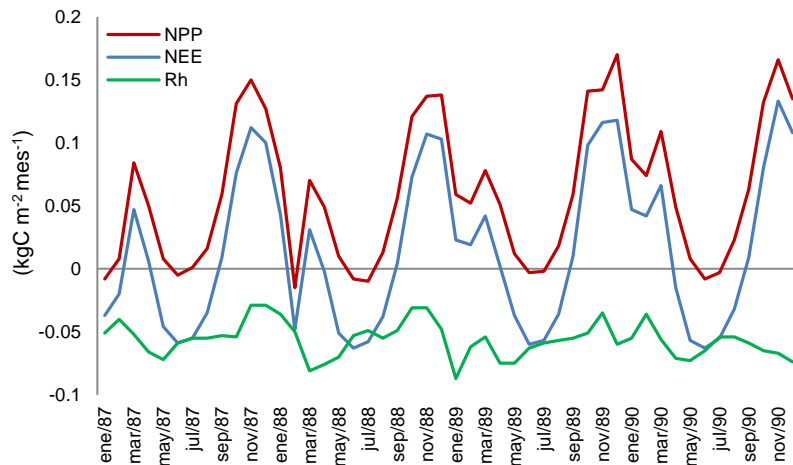


Figura 15. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Bosque Valdiviano y Nordpatagónico coordenada Lon $73^{\circ}50'$ Lat $41^{\circ}00'$.

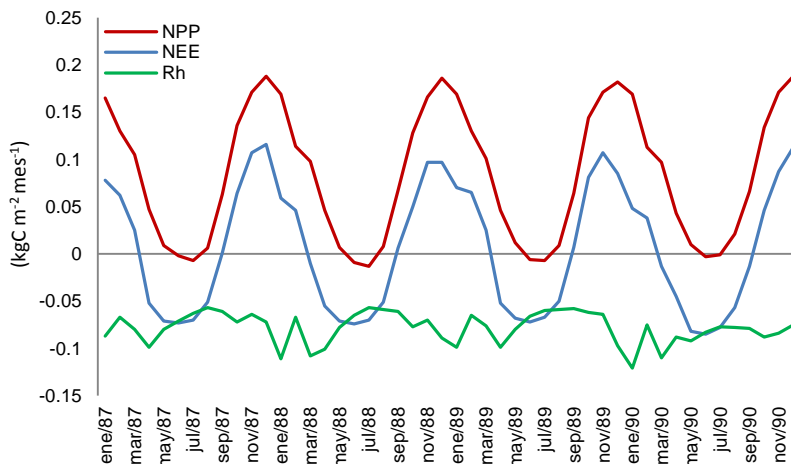


Figura 16. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bioma Bosque Magallánico coordenada Lon $73^{\circ}00'$ Lat $45^{\circ}00'$.

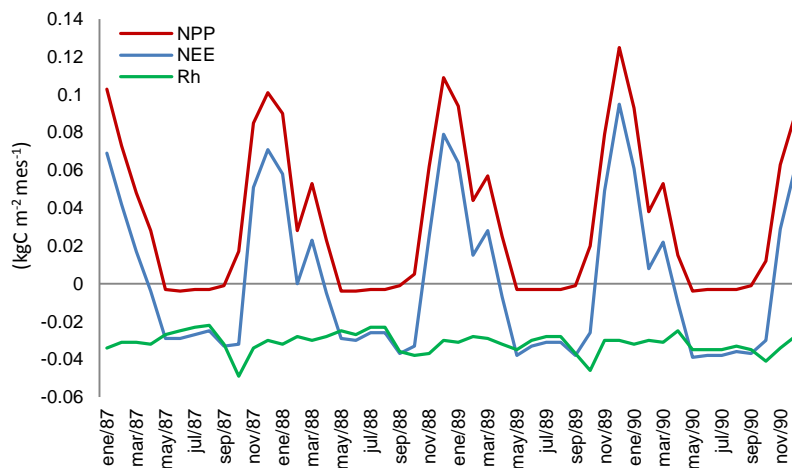


Figura 17. Comparación valores mensuales de Respiración Heterotrófica (Rh), Intercambio Neto del Ecosistema (NEE) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) y Productividad Neta Primaria (NPP) ($\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de Bosque Caducifolio Frío coordinada Lon $72^{\circ}50'$ Lat $48^{\circ}00'$.

9.3 Anexo 3

Tabla 6. Comparación de NPP, NEE y Rh ($\text{Kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$) de los años 2070-2100 con los años 1960-1990, para los biomas en estudio.

Biomás	Baseline			Δ A2			Δ B2		
	NPP	NEE	Rh	NPP	NEE	Rh	NPP	NEE	Rh
	$\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$			$\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$			$\text{kg C m}^{-2} \text{año}^{-1}$		
Bosque Valdiviano y Nordpatagónico	-0.73	-0.0557	0.61	0.73	0.05	-0.61	0.73	0.06	-0.61
Matorral y Bosque Esclerófilo	-0.31	-0.0002	0.24	-0.06	-0.10	0.03	-0.03	-0.01	0.09
Bosque Caducifolio Frío	-0.40	0.0532	0.34	0.41	-0.05	-0.35	0.41	-0.05	-0.35
Bosque Magallánico	-0.96	-0.1099	0.80	0.96	0.11	-0.80	0.96	0.11	-0.80
Promedio	-0.60	-0.0281	0.49	0.60	0.02	-0.49	0.60	0.02	-0.49

Fuente. Elaboración propia.

Las coordenadas analizadas en la tabla son las siguientes: Bosque Valdiviano y Nordpatagónico Lon 73° 50' Lat 41° 00'; Matorral y Bosque Esclerófilo Lon 72° 50' Lat 35° 50'; Bosque Caducifolio Frío Lon 72° 50' Lat 48° 00' y Bosque Magallánico 73° 00' Lat 45° 00'.

9.4 Anexo 4

Tabla 7. Comparación de la Temperatura (°C) y Precipitaciones (%) de los años 2070-2100 con los años 1960-1990, para los biomas en estudio.

Biomás	Coordenada		Baseline 60-90		A2		B2	
	Lon	Lat	T	Prep	Δt	$\Delta Prep$	Δt	$\Delta Prep$
			°C	mm	°C	(%)	°C	(%)
Bosque Valdiviano y Nordpatagónico	73°50'	41°00'	10.3 ± 0.4	115.4 ± 14.7	2.4 ± 0.5	-11	2.0 ± 0.4	-5.5
	73°50'	42°00'	10.4 ± 0.3	145.2 ± 15.4	2.3 ± 0.5	-9.3	2.0 ± 0.4	-3.7
Matorral y Bosque Esclerófilo	72°50'	35°50'	12.9 ± 0.4	64.1 ± 17.5	3.6 ± 0.7	-15.8	3.1 ± 0.5	-16.3
Bosque Caducifolio Frío	72°50'	51°50'	6.0 ± 0.4	25.8 ± 6.8	2.4 ± 0.5	19.7	2.1 ± 0.4	50.1
	72°50'	48°00'	4.4 ± 0.4	38.7 ± 9.4	2.6 ± 0.5	-0.9	2.3 ± 0.4	32.3
Bosque Magallánico	73°00'	45°50'	6.2 ± 0.4	149.5 ± 22.4	2.3 ± 0.5	-10.3	2.0 ± 0.4	-3
	73°00'	45°00'	6.2 ± 0.4	151.2 ± 22.3	2.4 ± 0.5	-10.5	2.1 ± 0.4	-2.9