



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y**  
**DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO**  
**AMBIENTE**

---

**PRODUCTIVIDAD PRIMARIA BRUTA Y NETA EN**  
**PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D. Don EN LA REGIÓN**  
**DEL BÍO BÍO, CHILE**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**FELIPE IGNACIO CAMACHO FOCACCI**

Profesor Guía: Ing. Forestal, Horacio Bown Intveen, Ph.D

---

Santiago, Chile

2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA**  
**CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO**  
**AMBIENTE**

---

**PRODUCTIVIDAD PRIMARIA BRUTA Y NETA EN**  
**PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D. Don EN LA REGIÓN**  
**DEL BÍO BÍO, CHILE**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**FELIPE IGNACIO CAMACHO FOCACCI**

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Horacio Bown Intveen	...7,0...	.....
Prof. Consejero Sr. Juan Caldentey Pont	...7,0...	.....
Prof. Consejero Sr. Patricio Corvalán Vera	...7,0...	.....

## TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVOS .....	5
2.1	Objetivo General .....	5
2.2	Objetivos Específicos .....	5
3.	MATERIAL Y MÉTODO .....	6
3.1	Material .....	6
3.1.1	Área de Estudio .....	6
3.1.2	Zonas de Crecimiento .....	7
3.1.3	Instalación del Ensayo.....	8
3.2	Método .....	10
3.2.1	Inventario Forestal .....	10
3.2.2	Índice de Área Foliar.....	10
3.2.3	Flujo de CO <sub>2</sub> desde los Suelos y Fustes .....	10
3.2.4	Caída de Hojarasca.....	11
3.2.5	Contenido Volumétrico de Agua en el Suelo.....	11
3.2.6	Información Meteorológica.....	11
3.2.7	Determinación de biomasa y volumen.....	14
3.2.8	Eficiencia de Crecimiento .....	16
3.2.9	Balance de Carbono .....	16
3.2.10	Modelo 3-PG .....	18
4.	RESULTADOS.....	20
4.1	Inventario Forestal .....	20
4.2	Crecimiento y rendimiento forestal.....	22
4.2.1	Índice de área foliar.....	22

4.2.2 Biomasa.....	23
4.2.3 Volumen.....	30
4.3 Productividad primaria.....	32
4.3.1 Productividad primaria bruta.....	32
4.3.2 Productividad primaria neta.....	36
4.3.3 Partición de la productividad primaria bruta en sus componentes.....	39
4.4 Modelación de Productividad.....	42
4.4.1 Nacimiento.....	44
4.4.2 Lomas Coloradas.....	47
4.4.3 Santa Bárbara.....	51
4.4.4 Tapihue.....	54
5. DISCUSIÓN.....	58
5.1 Biomasa y volumen.....	58
5.2 Productividad primaria.....	59
5.3 Partición de GPP.....	62
5.4 Modelación de Productividad.....	62
6. CONCLUSIONES.....	64
7. BIBLIOGRAFÍA.....	65
APÉNDICE 1.....	71
APÉNDICE 2.....	74
APÉNDICE 3.....	83
APÉNDICE 4.....	85

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Identificación de predios donde se realizó el estudio. Información de Agosto de 2010.....	9
<b>Cuadro 2.</b> Información climática relevante para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para las estaciones meteorológicas de Santa Bárbara representando al predio Santa Bárbara ubicado en la zona de crecimiento IV, Trilahue al predio Tapihue ubicado en la zona de crecimiento V, Escuadrón al predio Lomas Coloradas ubicado en la zona de crecimiento VI y Pichún al predio Nacimiento ubicado en la zona de crecimiento VII. ....	12
<b>Cuadro 3.</b> Índice de área foliar ( <i>L</i> ) en las distintas clases de edad y sitio comprendidas en el estudio en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012. ....	22
<b>Cuadro 4.</b> Biomasa de cada componente en las distintas clases de edad y sitios comprendidos en el estudio, para los años 2010, 2011 y 2012.....	23
<b>Cuadro 5.</b> Volumen en las distintas clases de edad y sitios comprendidos en el estudio, para los años 2010, 2011 y 2012.....	30
<b>Cuadro 6.</b> Componentes de la productividad primaria bruta por sitio y por clase de edad. Dónde ANPP corresponde a la productividad primaria neta aérea, APR a la respiración aérea de la planta, TBCF al carbono total asimilado bajo el suelo y GPP a la productividad primaria bruta.....	33
<b>Cuadro 7.</b> Razones entre GPP y todos sus componentes en todos los sitios y clases de edad, para ambos períodos.....	39
<b>Cuadro 8.</b> Valores del coeficiente de eficiencia de modelación de Nash y Sutcliffe (1970), para las variables $DAP_g$ , área basal, altura dominante y volumen, para todas las parcelas que formaron parte del estudio.....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación de parcelas permanentes del ensayo en las zonas de crecimiento en la VIII Región del Bío Bío. Fuente: Elaboración Propia.....	6
<b>Figura 2.</b> Diagrama de la estructura del conglomerado formado por tres parcelas circulares de 1.000 m <sup>2</sup> cada una separada equidistantemente 43,3 m (medidos desde el centro de las parcelas). .....	9
<b>Figura 3.</b> Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Santa Bárbara del predio Santa Bárbara. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010. ....	12
<b>Figura 4.</b> Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Trilahue del predio Tapihue. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010.....	13
<b>Figura 5.</b> Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Escuadrón del predio Lomas Coloradas. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010. ....	13
<b>Figura 6.</b> Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Pichún del predio Nacimiento. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010.....	14
<b>Figura 7.</b> Trayectoria de la densidad para las tres clases de edad y cuatro zonas de crecimiento del ensayo.....	20
<b>Figura 8.</b> Trayectorias de crecimiento para las tres clases de edad y cuatro zonas de crecimiento del ensayo para el DAP <sub>g</sub> , área basal (G), altura (H <sub>100</sub> ) y volumen (Vol). .....	21
<b>Figura 9.</b> Índice de área foliar ( <i>L</i> ) para los cuatro sitios en estudio y tres clases de edad en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012.....	22
<b>Figura 10.</b> Biomasa total de todas las parcelas del estudio en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012. ....	24
<b>Figura 11.</b> Biomasa total de todas las parcelas y clases de edad comparadas con altura dominante y área basal. ....	25
<b>Figura 12.</b> Partición de la biomasa en sus componentes versus edad, dónde Biomasa <sub>f</sub> : biomasa del fuste, Biomasa <sub>r</sub> : biomasa de ramas, Biomasa <sub>fo</sub> : biomasa del follaje, Biomasa <sub>ra</sub> : biomasa de raíces, Biomasa <sub>T</sub> : biomasa total. ....	26

<b>Figura 13.</b> Partición de la biomasa en sus componentes versus área basal ( $G$ ), dónde Biomasa <sub>f</sub> : biomasa del fuste, Biomasa <sub>r</sub> : biomasa de ramas, Biomasa <sub>fo</sub> : biomasa del follaje, Biomasa <sub>ra</sub> : biomasa de raíces, Biomasa <sub>T</sub> : biomasa total. ....	27
<b>Figura 14.</b> Partición de la biomasa en sus componentes versus altura dominante ( $H_{100}$ ), dónde Biomasa <sub>f</sub> : biomasa del fuste, Biomasa <sub>r</sub> : biomasa de ramas, Biomasa <sub>fo</sub> : biomasa del follaje, Biomasa <sub>ra</sub> : biomasa de raíces, Biomasa <sub>T</sub> : biomasa total. ....	28
<b>Figura 15.</b> Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en biomasa ( $t\ ha^{-1}$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ , $m^2\ m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad. ....	29
<b>Figura 16.</b> Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en biomasa ( $t\ ha^{-1}$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ , $m^2\ m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad. ....	29
<b>Figura 17.</b> Volumen de todas las parcelas del estudio en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012. ....	30
<b>Figura 18.</b> Volumen de todos los sitios y clases de edad comparadas con altura dominante y área basal. ....	31
<b>Figura 19.</b> Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en volumen ( $m^3\ ha^{-1}$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ , $m^2\ m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad. ....	31
<b>Figura 20.</b> Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en volumen ( $m^3$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ , $m^2\ m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad. ....	32
<b>Figura 21.</b> Relación entre ANPP y GPP para el periodo 2010-2011 y el período 2011-2012. ....	34
<b>Figura 22.</b> Relación entre APR y GPP para el periodo 2010-2011 y el período 2011-2012. ....	34
<b>Figura 23.</b> Relación entre TBCF y GPP para el periodo 2010-2011 y el período 2011-2012. ....	35
<b>Figura 24.</b> GPP para los cuatro sitios en estudio en ambos períodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara. ....	35
<b>Figura 25.</b> GPP para las tres clases de edad en estudio en el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. ....	36

<b>Figura 26.</b> Relación entre NPP y GPP para el periodo 2010-2011 y el período 2011-2012.	36
<b>Figura 27.</b> NPP para los cuatro sitios en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.	37
<b>Figura 28.</b> NPP para las tres clases de edad en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.	37
<b>Figura 29.</b> CUE (NPP:GPP) para los cuatro sitios en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.	38
<b>Figura 30.</b> CUE (NPP:GPP) para las tres clases de edad en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.	38
<b>Figura 31.</b> Razón APR:GPP para los cuatro sitios en estudio en el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.	40
<b>Figura 32.</b> Razón ANPP:GPP en las tres clases de edad comprendidas en el estudio para el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.	40
<b>Figura 33.</b> Razón APR:GPP en las tres clases de edad comprendidas en el estudio para ambos períodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.	41
<b>Figura 34.</b> Razón TBCF:GPP en las tres clases de edad comprendidas en el estudio para el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.	41
<b>Figura 35.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Nacimiento.	44
<b>Figura 36.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Nacimiento.	45
<b>Figura 37.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 14+ años en el sitio Nacimiento.	47

<b>Figura 38.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Lomas Coloradas. ....	48
<b>Figura 39.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Lomas Coloradas. ....	49
<b>Figura 40.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 14+ años en el sitio Lomas Coloradas. ....	50
<b>Figura 41.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Santa Bárbara. ....	51
<b>Figura 42.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Santa Bárbara. ....	52
<b>Figura 43.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 14+ años en el sitio Santa Bárbara. ....	53
<b>Figura 44.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Tapihue. ....	54
<b>Figura 45.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Tapihue. ....	55
<b>Figura 46.</b> Comparación entre valores observados y valores estimados para $DAP_g$ (cm), $H_{100}$ (m), $G$ ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 14+ años en el sitio Tapihue. ....	56

## RESUMEN

Se realizaron inventarios forestales mensuales y mediciones fisiológicas trimestrales en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en la Región del Bío Bío en las cuatro principales zonas de crecimiento para esta especie (IV, V, VI y VII) durante 24 meses entre Agosto de 2010 y Agosto de 2012. Los predios donde se ubicaron los ensayos fueron Lomas Coloradas en la Comuna de San Pedro de la Paz, Nacimiento en la Comuna de Nacimiento, Santa Bárbara en la Comuna de Santa Bárbara y Tapihue en la Comuna de Cabrero. Para cada sitio se consideraron tres clases de edad (0-7, 7-14 y 14+ años). En cada uno de las 12 instancias de Zona-Edad, se procedió a instalar un conglomerado de 3 parcelas permanentes de 1.000 m<sup>2</sup>, totalizando 36 parcelas. Estos predios y rodales se ubicaron a menos de 10 km de las estaciones meteorológicas de Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) y Trilahue (Tapihue), pertenecientes a Forestal Mininco S.A.

El objetivo de este estudio fue evaluar la productividad primaria bruta y neta de Pino Radiata en tres clases de edad y cuatro zonas de crecimiento en la Región del Bío Bío. Para lograr este objetivo se compararon la productividad entre sitios y zonas de crecimiento y se modelaron variables de estado utilizando el modelo de crecimiento 3-PG.

La biomasa total (estimada) de cada parcela y de cada componente del árbol se calculó a base de la información colectada de los inventarios forestales realizados y de las ecuaciones de biomasa desarrolladas por Madwick (1994). Con la biomasa calculada se procedió a obtener el contenido de carbono, el que se asumió como el 50% de la biomasa (Bown, 2007).

Para el cálculo de la productividad primaria bruta (GPP) se utilizaron las ecuaciones planteadas por Giardina *et al.* (2003), las cuales sirven para calcular los tres componentes de GPP, que son la productividad primaria neta aérea (ANPP), la respiración aérea de la planta (APR) y el carbono total asimilado bajo el suelo (TBCF). La productividad primaria neta (NPP) fue calculada como GPP menos la respiración autotrófica. Estos valores fueron comparados mediante análisis de varianza para determinar la influencia de los efectos principales e interactivos del sitio y de la clase de edad. Cuando se encontraron diferencias significativas se llevó a cabo una prueba de comparaciones múltiples (test de Tukey) para identificar diferencias entre las medias.

Se utilizó el modelo 3-PG para modelar las trayectorias de las variables de estado de las parcelas (DAPg, área basal, altura dominante y volumen) con la información climática, de la vegetación y de suelos requerida por el modelo. Los valores estimados mediante 3-PG fueron graficados contra los valores observados, ajustando un modelo de regresión lineal. Además se utilizó el coeficiente de eficiencia de modelación de Nash y Sutcliffe (1970) para evaluar simultáneamente precisión y sesgo.

Como se esperaba la biomasa aumentó con la edad durante los dos años que duró el estudio, sin embargo también se presentaron disminuciones en la biomasa debido a raleos que se realizaron en dos de los sitios en el segundo año del estudio. Los mayores incrementos en biomasa y contenido de carbono fueron observados en la clase de edad 0-7

años. Los sitios Nacimiento y Santa Bárbara mostraron valores máximos similares de crecimiento seguidos por Lomas Coloradas, mientras que Tapihue presentó el menor valor. El mismo patrón fue observado en todos los sitios para la productividad primaria bruta (GPP) y neta (NPP). La eficiencia en el uso del carbono (CUE) fue  $0,53 \pm 0,08$  SD (n=36).

La partición de GPP en ANPP incrementó con la edad mientras que la partición de GPP en TBCF disminuyó con la edad. La mayor partición de GPP en APR fue encontrada en la clase de edad 7-14 años, probablemente asociado al incremento en la respiración y el índice de área foliar en esa clase de edad.

Las variables modeladas con 3-PG fueron el DAPg, el área basal, la altura dominante y el volumen para cada parcela del estudio. En la mayoría de las parcelas se encontraron niveles de eficiencia de modelación sobre el 75%. El DAPg y el área basal fueron las variables que presentaron los mejores ajustes, mientras que la altura tuvo la menor eficiencia de modelación. Los mismos parámetros fueron utilizados en todos los sitios a excepción de las relaciones alométricas DAP:Altura que fueron particulares para cada sitio.

**Palabras claves:** Zonas de crecimiento, Chile, clases de edad, productividad primaria bruta, 3-PG, *Pinus radiata*.

## SUMMARY

Monthly forest inventories and quarterly physiological measurements were conducted in *Pinus radiata* D. Don in the Region of Bío Bío in the four main growth areas for this species (IV, V, VI and VII) during 24 months between August 2010 and August 2012. The sites were: Lomas Coloradas in the borough of San Pedro de la Paz, Nacimiento in the borough of Nacimiento, Santa Barbara in the borough of Santa Barbara and Tapihue in the borough of Cabrero. For each site, three age classes (0-7, 7-14 and 14+ years) were considered. In each of the 12 instances of Age Class  $\times$  Zone, we installed a cluster of three permanent plots of 1.000 m<sup>2</sup> each, totaling 36 plots. These stands were located within 10 km of the weather stations Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) and Trilahue (Tapihue) maintained by Forestal Mininco S.A.

The aim of this study was to assess gross and net primary productivity of radiata pine in three age classes and four zones of growth in the Region of Bío Bío. To achieve this aim, productivity between sites and growth areas were compared and state variables modelled using 3-PG.

The total biomass (estimated) for each plot and each tree component was calculated using the collected information of the forest inventories and biomass equations developed by Madwick (1994). Carbon content was determined as 50% of total biomass (Bown, 2007).

To calculate gross primary production (GPP), equations by Giardina *et al.* (2003) were used to calculate the three components of GPP, which are aboveground net primary production (ANPP), aboveground plant respiration (APR) and total belowground carbon flux (TBCF). Net primary productivity (NPP) was calculated as GPP minus autotrophic respiration. These values were compared by analysis of variance to determine the influence of the main and interactive effects of the site and age class. When significant differences occur, a test of multiple comparisons (Tukey test) was performed to detect differences between means.

The 3-PG model was used to model the trajectories of the state variables of the plots (DBH<sub>g</sub>, basal area, dominant height and volume) based on the climate, vegetation and soils information required by the model. The estimated values using 3-PG were plotted against the observed values, fitting a linear regression model. Besides, the modeling efficiency coefficient of Nash and Sutcliffe (1970) was used to simultaneously evaluate precision and bias.

As expected biomass increased with age during the two years of the study, although declines in biomass also occurred due to thinning that were made at two of the sites in the second year of the study. The greatest relative increases in biomass and carbon content were observed in the 0-7 years old age class. The Nacimiento and Santa Bárbara sites exhibited similar maximums in growth followed by Lomas Coloradas while Tapihue exhibited the least. The same pattern was observed across sites for Gross (GPP) and net (NPP) primary productivity. Carbon use efficiency (CUE) was  $0,53 \pm 0,08$  SD (n=36).

The partitioning of GPP to ANPP increased with age while the partitioning of GPP to TBCF decreased with age. The greatest partitioning of GPP to APR was found in the age class 7-14 years old, probably associated to increased respiration and leaf area index in this age class.

The variables modeled with 3-PG were the DBH, basal area, dominant height and volume for each study plot. In most of the plots, modeling efficiency levels above 75% were found. DBH and basal area were the variables that presented the best fit, while the height had the lowest modeling efficiency. The same parameters of 3-PG were used across all sites except for the DBH:height allometric relationships which were site specific.

**Keywords:** Growth areas, Chile, age class, gross primary production, 3-PG, *Pinus radiata*.

## 1. INTRODUCCIÓN

El establecimiento y manejo de plantaciones forestales comerciales es una actividad que requiere información básica para identificar los sitios más aptos para lograr los objetivos de producción propuestos. Es importante identificar los factores que componen el sitio como son el clima, el suelo y factores biológicos, con el fin de crear bosques más estables y optimizar la calidad del sitio (Schlatter, 1977).

La productividad de las plantaciones de Pino Radiata depende de las condiciones meteorológicas y del suelo. Al conocer estas variables, es posible determinar condiciones más favorables para el crecimiento de Pino Radiata, permitiendo estimar rangos de productividad potencial en diferentes sitios (Flores y Lee, 2004). Jackson *et al.* (1973) señalan que la precipitación está directamente relacionada con el crecimiento de Pino Radiata en Nueva Zelanda, presentando dos máximos, uno en primavera y el otro a principios de otoño, para el crecimiento en altura. Otro factor importante es la temperatura, ya que los meristemas apicales cesan su actividad cuando la temperatura desciende a 5 o 6°C (Gutiérrez, 1977). La especie presenta diferentes patrones de crecimiento a medida que varía el sitio, por lo que el crecimiento en diámetro no se comporta de la misma manera que el crecimiento en altura (Tennent, 1986 y Burdon, 1994; citados por Toral *et al.*, 2005).

Por lo tanto, entender como inciden las condiciones climáticas, edáficas y fisiológicas en el crecimiento, es importante para aumentar la productividad y para desarrollar la industria forestal (Flores y Lee, 2004; Toro, 2004).

Este estudio compara la productividad de Pino Radiata en diferentes zonas de crecimiento y en distintas clases de edad, de acuerdo a variables edáficas, climáticas y fisiológicas en la Región del Bío-Bío, Chile. Para ello se utilizó la información colectada durante los años 2010 a 2012 de un ensayo establecido en conjunto entre la empresa Forestal Mininco S.A. y la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile.

### **Antecedentes Generales de la Especie *Pinus radiata* D. Don**

Pino Radiata es una conífera perteneciente a la familia Pinaceae, es nativa de la zona costera de California, Estados Unidos (Moran y Bell, 1987).

El Pino Radiata se ha convertido en la principal especie del sector forestal chileno. Con la promulgación del Decreto Ley 701, en el año 1974, se estimuló la expansión de las plantaciones en el país (Frêne y Núñez, 2010). En el año 2009, las plantaciones de la especie cubrían una superficie de 1,46 millones de hectáreas (Instituto Forestal, 2005). Las plantaciones de Pino Radiata se extienden desde los 32° hasta los 41° de latitud sur, lo que permite que se establezca en diversos tipos de suelos y de condiciones climáticas (Huber e Iroumé, 2006), destacando el amplio rango de precipitaciones que comienza en 500 mm hasta más de 3.200 mm por año (Flores y Lee, 2004).

## **Productividad Primaria**

La productividad de una plantación forestal está determinada básicamente por el área foliar y las relaciones suelo-planta-atmósfera. El área foliar, medida a través del Índice de Área Foliar ( $L$ ), determina la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta, la que se encuentra ligada a la productividad primaria neta (Flores y Lee, 2004).

Según McMurtrie *et al.* (1990) la producción de madera depende de la tasa de asimilación neta y de los productos de la fotosíntesis asignados al crecimiento fustal. Además la fotosíntesis depende de la producción de follaje y de la tasa de asimilación de carbono por unidad de área o masa foliar (Wang y Jarvis, 1990). Debido a la relación inversa entre la eficiencia de crecimiento y el índice de área foliar, el tamaño y estructura de las copas y la densidad del rodal influyen tanto la ganancia como la distribución de carbono (Perry, 1985). Debido a esto, la producción de madera es función de la estructura del rodal, la disponibilidad de recursos del sitio y limitantes climáticas (Waring y Running, 1998). Para Pino Radiata, McMurtrie y Landsberg (1992) determinaron que la disponibilidad de agua y nutrientes serían más importantes en la asimilación de carbono y su localización en el fuste que la estructura del rodal.

## **Índice de Área Foliar**

La biomasa foliar es uno de los componentes que presenta mayor variación a través de los distintos tipos de bosques, dado que no incrementa necesariamente con el crecimiento y tamaño del rodal, como lo hace la biomasa. Pardé (1980) plantea que llega un momento en que se estabiliza y pocos factores pueden influir en ella.

El índice de área foliar proporciona información para la evaluación de la productividad primaria de los ecosistemas forestales (Gholz y Cropper, 1991), ya que está relacionada con muchos procesos biológicos y fisiológicos, incluyendo la intercepción de luz por el dosel, la respiración, la transpiración y la fotosíntesis neta (Pierce y Running, 1988). Además es un parámetro explicativo de la variabilidad en la productividad primaria aérea neta, debido a su importancia en los mecanismos fisiológicos desde el nivel de la hoja al nivel del dosel del bosque (Running y Coughlan, 1988). Sin embargo, Bréda (2003), expone que es uno de los parámetros más difíciles de cuantificar correctamente, debido a la gran variabilidad espacial y temporal.

Las mediciones de  $L$ , pueden llevarse a cabo mediante variados métodos, los que se clasifican en:

Métodos directos: Aquellos métodos donde se busca medir el  $L$  a través de técnicas destructivas en las que generalmente el dosel es perturbado en algún grado (He *et al.*, 2007). Las ventajas de estos métodos es que se utilizan para comparar y calibrar métodos indirectos (Jonckheere *et al.*, 2004). Las desventajas radican principalmente en los daños provocados al dosel, los costos y el consumo de tiempo (He *et al.*, 2007).

Métodos indirectos: Están basados en mediciones de la intercepción de radiación y en la reflectancia de la vegetación (Norman y Campbell, 1989). Las ventajas de estos métodos se

sustentan en la no destrucción del dosel (Bréda, 2003), y requieren mediciones sencillas y rápidas en terreno (Norman y Campbell, 1989). Las desventajas presentadas por estos métodos se asocian a la dificultad de los algoritmos para la reducción de datos (Norman y Campbell, 1989), ya que no entregarían mediciones de índice de área foliar, puesto que incluyen otros elementos de la cubierta vegetal como ramas y troncos. Por lo tanto, algunos autores prefieren utilizar el concepto de índice de área de planta (IAP) en vez de índice de área foliar (He *et al.*, 2007).

### **Modelos de Crecimiento**

Los modelos de crecimiento se utilizan para predecir el crecimiento y desarrollo de rodales bajo diferentes condiciones de sitio y manejo (Flores y Lee, 2004). Pueden clasificarse de acuerdo a su naturaleza en tradicionales, fisiológicos e híbridos.

Los modelos tradicionales se crean a partir de patrones históricos de crecimiento para predecir el desarrollo futuro de rodales (Proe *et al.*, 1994). Estos modelos son apropiados cuando las condiciones ambientales y de cultivo permanecen similares a las del pasado. Sin embargo, factores como el uso de material genético mejorado, tratamientos silviculturales y los procesos de cambio global, generan diferencias en las condiciones presentes, pasadas y futuras (Johnsen *et al.*, 2001).

Los modelos fisiológicos están basados en el funcionamiento biológico de las plantas y predicen la productividad sobre un mayor rango de condiciones ambientales como son el aumento de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Landsberg y Gower, 1997; Johnsen *et al.*, 2001; Landsberg, 2003). La importancia de estos modelos es fundamental en la evaluación del cambio ambiental global, el balance de carbono y la eficiencia en el uso de agua y nutrientes (Jarvis, 1995).

Los modelos híbridos combinan características de los modelos tradicionales y de los modelos fisiológicos, entregando un mayor realismo biológico, además de requerir menos parámetros que los modelos fisiológicos (Landsberg, 2003). La falta de comprensión en los procesos de asimilación y distribución de carbono en el ecosistema, la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo y el ingreso y redistribución interna de nutrientes en los árboles ha limitado el avance en el desarrollo de estos modelos (Waring *et al.*, 1998; Johnsen *et al.*, 2001; Landsberg, 2003).

El modelo 3-PG (Physiological Principles Predicting Growth), desarrollado por Landsberg y Waring (1997), sirve para representar la relación entre la radiación solar fotosintéticamente activa que es absorbida por la vegetación ( $Q_a$ ) y la productividad primaria neta en bosques ( $P_N$ ).

$$P_N = C_E \varepsilon \Sigma Q_a \min \{f_0, f_D\} f_T f_N f_A$$

Donde  $\varepsilon$  es la eficiencia en el uso de la radiación y los  $f_i$  son los factores modificadores que reducen la efectividad de una unidad de  $Q_a$ , como resultado del contenido de agua en el

suelo ( $\theta$ ), el déficit de presión de vapor de la atmósfera ( $D$ ), la temperatura ( $T$ ), la fertilidad ( $N$ ) y la edad del cultivo ( $A$ ). Estos modificadores son adimensionales con valores entre cero (0, no hay crecimiento) y la unidad 1 (1, sin restricciones ambientales). Debido a que el contenido de agua en el suelo y el déficit de presión de vapor en la atmósfera controlan la conductancia estomática, es que sólo el más limitante es incluido en los cálculos. El valor resultante de  $Q_a$  puede ser interpretado como la radiación que efectivamente es utilizada por las plantas. El modelo usa la razón de productividad primaria neta (NPP) a productividad primaria bruta (GPP); que se denomina Eficiencia en el Uso de Carbono ( $C_E$ ), el cual ha resultado ser relativamente estable en bosques ( $0,45 \pm 0,05$ ), lo que significa que aproximadamente un 45% de todo el carbono que se fija por fotosíntesis se traduce en productividad primaria, mientras que el 55% restante se vuelve a liberar a la atmósfera por procesos de respiración autotrófica. (Landsberg y Waring, 1997).

3-PG es un modelo de procesos que utiliza datos climáticos mensuales, incluyendo variables como temperatura máxima, mínima y promedio, precipitación y radiación solar, entre otras. Las salidas del modelo incluyen biomasa del fuste, hojas y raíces, atributos de rodal convencionales como volumen, área basal y número de árboles por hectárea y parámetros de interés ecofisiológicos como índice de área foliar, conductancia estomática, tasa de transpiración y contenido de agua en el suelo (Flores y Lee, 2004).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Evaluar la productividad primaria bruta y neta de *Pinus radiata* D. Don. en tres clases de edad y cuatro zonas de crecimiento en la Región del Bío-Bío.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Comparar la productividad de *P. radiata* en distintas zonas de crecimiento y clases de edad.
- Modelar variables de estado utilizando el modelo de crecimiento 3-PG a base de información climática, fisiológica y de suelos.

### 3. MATERIAL Y MÉTODO

#### 3.1 Material

##### 3.1.1 Área de Estudio

El área de estudio correspondió a plantaciones de Pino Radiata en tres clases de edad (0-7 años, 7-14 años y 14+ años), en las cuatro principales zonas de crecimiento en la Región del Bío-Bío (IV, V, VI y VII). Las parcelas permanentes, instaladas para el ensayo, se ubicaron en cuatro sitios correspondientes a diferentes suelos. Los sitios fueron Santa Bárbara, Tapihue, Lomas Coloradas y Nacimiento (Figura 1), dónde los suelos, a nivel nacional, se les denominan Trumaos, Arenales, Metamórficos y Rojos Arcillosos, respectivamente.

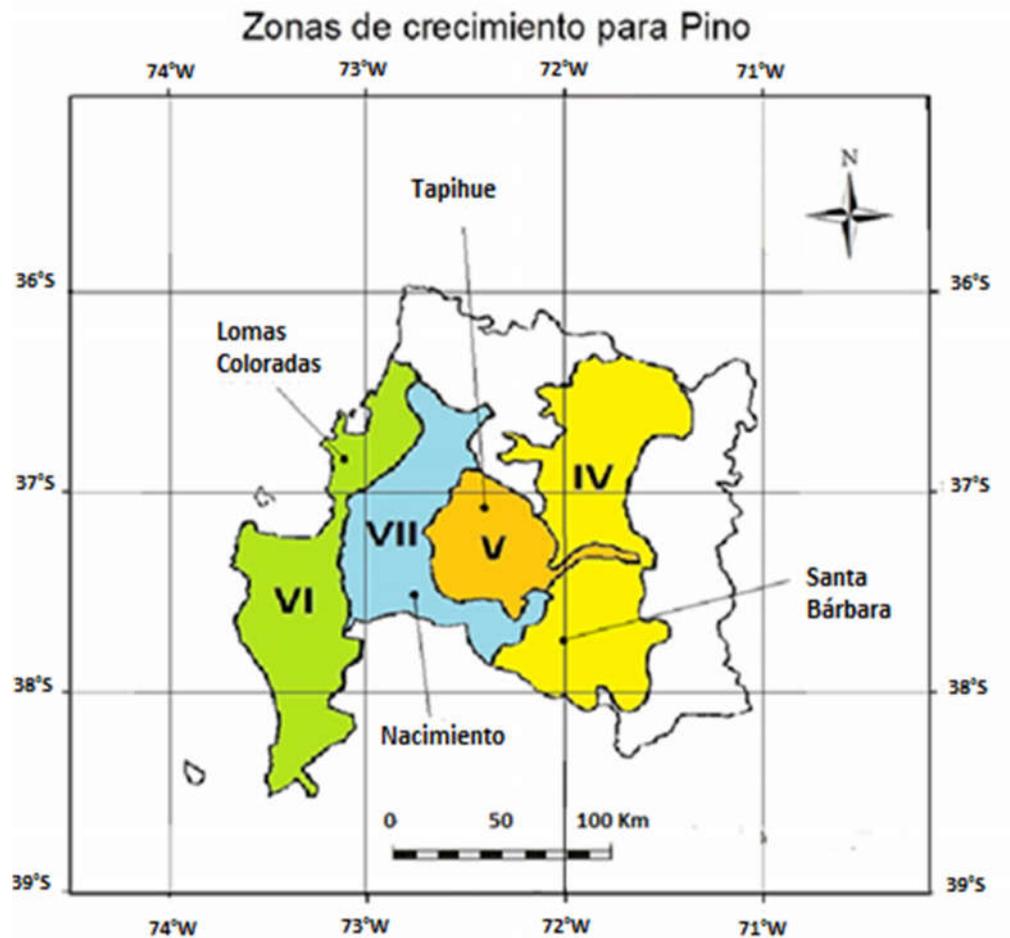


Figura 1. Mapa de ubicación de parcelas permanentes del ensayo en las zonas de crecimiento en la VIII Región del Bío Bío. Fuente: Elaboración Propia.

### **3.1.2 Zonas de Crecimiento**

En Chile se identifican 10 zonas de crecimiento, las que se extienden desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Los Ríos, estas fueron clasificadas en base a la productividad en área basal presente en cada zona (Fundación Chile, 1990). Los sitios donde fueron instaladas las parcelas permanentes son representativos de la zona de crecimiento correspondiente.

#### **Zona de Crecimiento IV**

Santa Bárbara se encuentra en la zona de crecimiento IV. Presenta un suelo perteneciente a la serie Santa Bárbara, miembro de la Familia medial, métrica de los *Typic Haploxerands* (Andisol) (Kühne *et al.*, 2005).

Según Kühne *et al.* (2005), son suelos poco evolucionados, formados sobre cenizas volcánicas recientes (trumaos), depositados sobre sustrato fluvioglaciales o materiales fluviales difícilmente detectables por la profundidad a la que se encuentran. La topografía donde se ubica este suelo corresponde a lomajes y cerros, mostrando una superficie reducida de suelos ligeramente ondulados y ocasionalmente suelos de topografía casi plana. Son suelos profundos a muy profundos, de textura media, generalmente franca o franco limosa en el primer horizonte y franco limosa en profundidad, bien estructurados, de buen arraigamiento, muy porosos y sin gravas en los primeros 160 cm. La permeabilidad es moderada y el escurrimiento superficial moderadamente lento en pendiente de hasta el 3%, aumentando hasta muy rápido en pendientes superiores a 15%.

Estos sitios reciben una precipitación de 1.000 a 1.500 mm anuales y presentan una temperatura del aire media anual entre 10 y 12°C (Álvarez *et al.*, 1999).

#### **Zona de Crecimiento V**

El sitio Tapihue se encuentra ubicado en la zona de crecimiento V. Presenta un suelo correspondiente a la serie arenales, miembro de la Familia mixta, térmica de los *Dystric Xeropsammments* (Entisol), de topografía ligeramente inclinada y pendiente del orden de 1 a 2% (CIREN, 1999).

Kühne *et al.* (2005) los describe como suelos de origen aluvial reciente, profundo, de escaso desarrollo, derivado de arenas volcánicas de color negro, de origen andesítico y basáltico. Presenta principalmente textura gruesa. El drenaje es bueno a excesivo, con permeabilidad rápida a muy rápida y con escurrimiento superficial lento. Ocupa una topografía plana a casi plana dentro de la formación correspondiente al Abanico Aluvial del Laja. Existen áreas de topografía plana y posición fisiográfica deprimida con niveles freáticos permanentes. Además alrededor del 50% de estos suelos presentan un nivel freático temporal, desde fines de otoño hasta mediados de primavera.

La precipitación en estos sitios fluctúa entre 800 y 1.100 mm anuales, con una temperatura media anual del aire de 12 a 13,5°C, con cinco a siete meses secos durante el año (Álvarez *et al.*, 1999).

## **Zona de Crecimiento VI**

La zona de crecimiento VI está representada por el sitio Lomas Coloradas, el cual se encuentra ubicado en la Cordillera de la Costa. Es parte de la Asociación Nahuelbuta, miembro de la Familia muy fina, mixta, isotérmica de los *Rhodic Paleudults* (Ultisol) (CIREN, 1999).

Se describen como suelos profundos formados a partir de rocas metamórficas especialmente filitas y micaesquistos, de texturas arcillosas de color pardo rojizo oscuro en la superficie y texturas franco arcillo limosa y arcillo limosa de colores rojo fuerte y pardo rojizo oscuro en profundidad, con topografía escarpada de pendientes dominantes sobre 20%. La profundidad efectiva es superior a los 140 cm, aunque pueden existir sectores más delgados, el drenaje es moderado y la erosión es moderada a fuerte (CIREN, 1999).

La precipitación fluctúa entre los 1.000 y 1.500 mm anuales, presenta una temperatura media anual del aire entre 11 y 13°C con cinco meses secos (Álvarez *et al.*, 1999).

## **Zona de Crecimiento VII**

El sitio denominado Nacimiento se encuentra ubicado en la zona de crecimiento VII. Presenta un suelo del tipo Rojo Arcilloso, que corresponde a un grupo extenso de suelos en la Cordillera de la Costa y en la Depresión Intermedia, coincidentes en ciertas características morfológicas y propiedades, pero provenientes de distintos materiales como granito, micaesquistos, sedimentos marinos terciarios, basalto o cenizas volcánicas (Bonelli y Schlatter, 1995).

Su textura es franco arcillosa a arcillosa, presenta una escasa profundidad arraigable, poseen una baja capacidad de retención de humedad, son bastante susceptibles a la compactación, presentan bajos niveles de materia orgánica, con deficiencias de nitrógeno, fósforo, potasio y boro. Este sitio presenta una temperatura media anual del aire de 11,5 a 12,5°C, con precipitaciones que fluctúan entre 1.200 a 1.800 mm anuales (Álvarez *et al.*, 1999).

### **3.1.3 Instalación del Ensayo**

Durante Agosto y Septiembre del año 2010, se instalaron 9 parcelas permanentes en cada zona de crecimiento, correspondiendo tres parcelas en bosque juvenil (0-7 años), tres parcelas en bosque intermedio (7-14 años) y tres parcelas en bosque adulto (14+ años), totalizando 36 parcelas permanentes para el estudio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Identificación de predios donde se realizó el estudio. Información de Agosto de 2010.

Zona Crec.	Localidad	Clase Edad	Predio	Parcelas	Año Plant.	Edad (Años)
IV	Santa Bárbara	0-7	Las Manchurías	16, 17, 18	2007	3
		7-14	San Sebastián y Santa Olga	22, 23, 24	2002	8
		14+	Las Mercedes	19, 20, 21	1995	15
V	Tapihue	0-7	Tapihue	31, 32, 33	2008	2
		7-14	Tapihue	25, 26, 27	2000	10
		14+	Tapihue	28, 29, 30	1993	17
VI	Lomas Coloradas	0-7	Lomas Coloradas	43, 44, 45	2008	2
		7-14	Lomas Coloradas	40, 41, 42	1998	12
		14+	Lomas Coloradas	37, 38, 39	1994	16
VII	Nacimiento	0-7	Siete Árboles	7, 8, 9	2003	7
		7-14	El Litral	10, 11, 12	1996	14
		14+	Santa Isabel	4, 5, 6	1991	19

Las parcelas eran de forma circular con una superficie de 1.000 m<sup>2</sup> cada una (Figura 2). Adicionalmente se georeferenció el punto centro del conglomerado (UTM-WGS84), y a través de coordenadas polares, el centro de cada parcela. Los predios y las parcelas están ubicados a menos de 10 km de las estaciones meteorológicas de Escuadrón, Pichún, Santa Bárbara y Trilahue, a cargo de Forestal Mininco S.A.

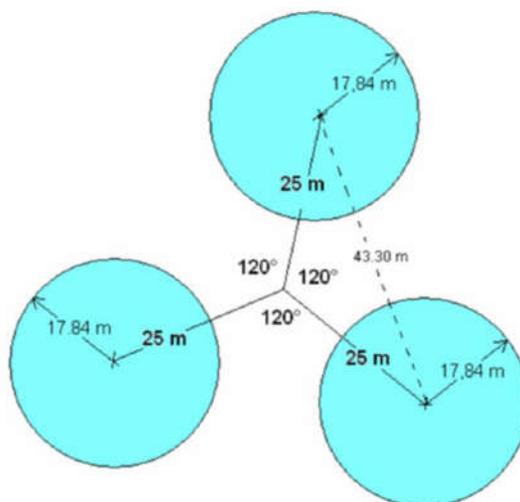


Figura 2. Diagrama de la estructura del conglomerado formado por tres parcelas circulares de 1.000 m<sup>2</sup> cada una separada equidistantemente 43,3 m (medidos desde el centro de las parcelas).

## 3.2 Método

Los datos fueron obtenidos a través de inventarios forestales mensuales, mediciones fisiológicas trimestrales e información meteorológica.

### 3.2.1 Inventario Forestal

Las parcelas permanentes establecidas para el ensayo se midieron mensualmente desde Agosto de 2010 hasta Agosto de 2012. Las variables registradas correspondieron a: DAP, DAC, altura total, altura de poda, estado fitosanitario y forma del fuste. Así las variables dasométricas agregadas monitoreadas en la red completa de parcelas permanentes fueron: densidad, área basal, DAP, altura, altura dominante, altura de poda, altura de inicio de copa viva y volumen.

### 3.2.2 Índice de Área Foliar

El estudio de la biomasa foliar permite describir el sistema fotosintético y relacionarlo con la productividad del bosque. Asociado a la biomasa foliar se encuentra el área foliar, que se expresa a través del índice de área foliar ( $L$ ), que se define como el área foliar que sustenta una unidad de superficie de suelo (He *et al.*, 2007). Esta variable ayuda a explicar el microclima presente bajo el dosel, la intercepción de agua, la extinción de la radiación y el intercambio de agua y  $\text{CO}_2$ , de la vegetación con la atmósfera (Bréda, 2003).

El  $L$  se determinó a partir de la biomasa foliar ( $w_f$ ) y el área foliar específica ( $M$ ), mediante la siguiente fórmula:

$$L = w_f M \quad (1)$$

Donde  $w_f$  corresponde a la biomasa foliar por unidad de superficie ( $\text{kg m}^{-2}$ ) y  $M$  es la razón entre el área foliar y el peso de una muestra de hojas expresada en  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ .

En el presente estudio se utilizó esta fórmula para calcular el  $L$  para su uso en el modelo 3-PG y en el balance de carbono. Para el área foliar específica ( $M$ ) se ocuparon los valores de Bown (2007) con un promedio de  $8,7 \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$ .

### 3.2.3 Flujo de $\text{CO}_2$ desde los Suelos y Fustes.

Los flujos de  $\text{CO}_2$  desde los suelos y desde los fustes fueron medidos en las 36 parcelas permanentes del ensayo utilizando una cámara de respiración de suelos (Modelo SRC-1, PP Systems, EE.UU.) conectada a un sensor infrarrojo (Modelo EGM-4, PP Systems, EE.UU.). Las mediciones se realizaron en la vecindad de seis estacas establecidas al inicio del ensayo, tres entre hileras y tres en las hileras de cada parcela permanente.

Para las mediciones de respiración de fuste se instalaron cinco collares de goma fijados con un adhesivo de silicona como lo establece Xu *et al.* (2000, citado por Curtis *et al.*, 2005).

Luego de la medición con la cámara de respiración por 120 segundos, se procedió a medir la temperatura superficial del fuste con un termómetro infrarrojo de puntero laser (Extech, Modelo 42515, EE.UU.).

Los flujos de CO<sub>2</sub> del suelo fueron medidos directamente con la cámara de respiración por 120 segundos, a continuación se midió la temperatura superficial del suelo con el termómetro infrarrojo de puntero laser y la temperatura a una profundidad de 10 cm, utilizando un termómetro digital (CheckTemp 1, Hanna, EE.UU.).

Luego de las mediciones de respiración de suelos, se tomaron tres muestras de suelo a 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad para la determinación del contenido gravimétrico de agua en el suelo. Estas muestras fueron rotuladas y almacenadas en frío, posteriormente fueron pesadas para determinar su peso en húmedo. Mediante secado en una cámara de aire forzado a una temperatura de 104°C se determinó el peso seco de cada muestra y así se derivó el contenido gravimétrico de agua en el suelo, con periodicidad mensual.

### **3.2.4 Caída de Hojarasca**

En cada parcela se establecieron mallas plásticas para colectar la caída de hojarasca estacionalmente. Se colectó todo el material vegetal acumulado en bolsas de papel etiquetadas para luego ser secadas en un horno de aire forzado a 70°C hasta alcanzar peso constante.

### **3.2.5 Contenido Volumétrico de Agua en el Suelo**

Se instalaron cuatro unidades de colecta automática del contenido volumétrico de agua y temperatura del suelo en los cuatro sitios bajo estudio. Las unidades consistían en cinco sensores (ECH2O EC-TM, Decagon Devices, EE.UU.) conectados a un equipo de almacenamiento de información (DataLogger, EM-50, Decagon Devices, EE.UU.). Se instalaron a profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm. Adicionalmente se tomaron muestras gravimétricas de calibración a profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm en la vecindad de cada datalogger, en cada estación del año. Para ello se utilizó un barreno de golpe. Los valores promedios obtenidos, para todo el período comprendido entre Septiembre de 2010 y Septiembre de 2012, fueron similares para los sitios Nacimiento (0,23 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) y Santa Bárbara (0,23 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), mientras que Lomas Coloradas (0,18 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) y Tapihue (0,14 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) presentaron valores inferiores en comparación a los otros sitios.

### **3.2.6 Información Meteorológica**

Se utilizó la información de precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas del aire y radiación solar para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta el 27 de Septiembre de 2012, día Juliano 1.000, Día Base: 1 de Enero de 2010) de las estaciones meteorológicas Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) y Trilahue (Tapihue) de Forestal Mininco S.A.

El Cuadro 2 muestra la información relevante para cada año del ensayo, los promedios y agregados de las principales variables meteorológicas.

Cuadro 2. Información climática relevante para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para las estaciones meteorológicas de Santa Bárbara representando al predio Santa Bárbara ubicado en la zona de crecimiento IV, Trilahué al predio Tapihue ubicado en la zona de crecimiento V, Escuadrón al predio Lomas Coloradas ubicado en la zona de crecimiento VI y Pichún al predio Nacimiento ubicado en la zona de crecimiento VII.

	Zona de Crecimiento											
	IV			V			VI			VII		
	Santa Bárbara			Trilahué			Escuadrón			Pichún		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Precipitaciones (mm)	833	1038	695	451	607	738	856	723	539	961	921	610
Temp. Mínima (°C)	-1,1	-1,1	-3,3	-2,8	-2,8	-3,6	-2,2	-3,1	-3,8	0,1	0,5	-0,9
Temp. Media (°C)	11,7	12,2	12,2	12,3	13,2	12,5	11,8	12	11,9	12,8	12,9	13
Temp. Máxima (°C)	32,2	32,4	36,4	36,9	37,4	36,9	28,6	28,6	29,6	35,6	36,4	36,6
Radiación Solar (MJ/m <sup>2</sup> )	5.626	5.869	3.395	5.436	5.342	3.245	5.487	5.426	3.458	6.106	6.101	3.395
Humedad Relativa (%)	71,2	76,8	78,4	74,6	73,8	76,3	85,7	87,1	88,7	72,8	73,5	73,7

Las Figuras 3, 4, 5 y 6 presentan los valores de precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, de radiación solar y de humedad relativa para todo el período del ensayo de las estaciones Santa Bárbara, Trilahué, Escuadrón y Pichún, respectivamente.

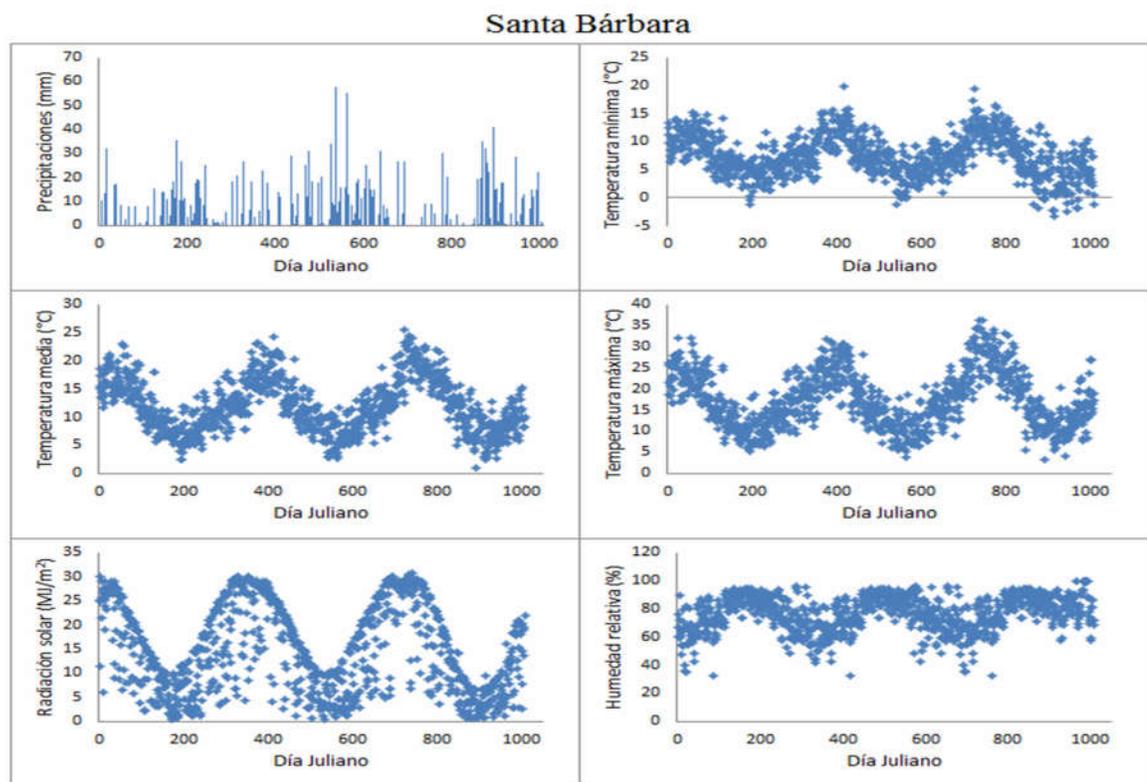


Figura 3. Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Santa Bárbara del predio Santa Bárbara. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010.

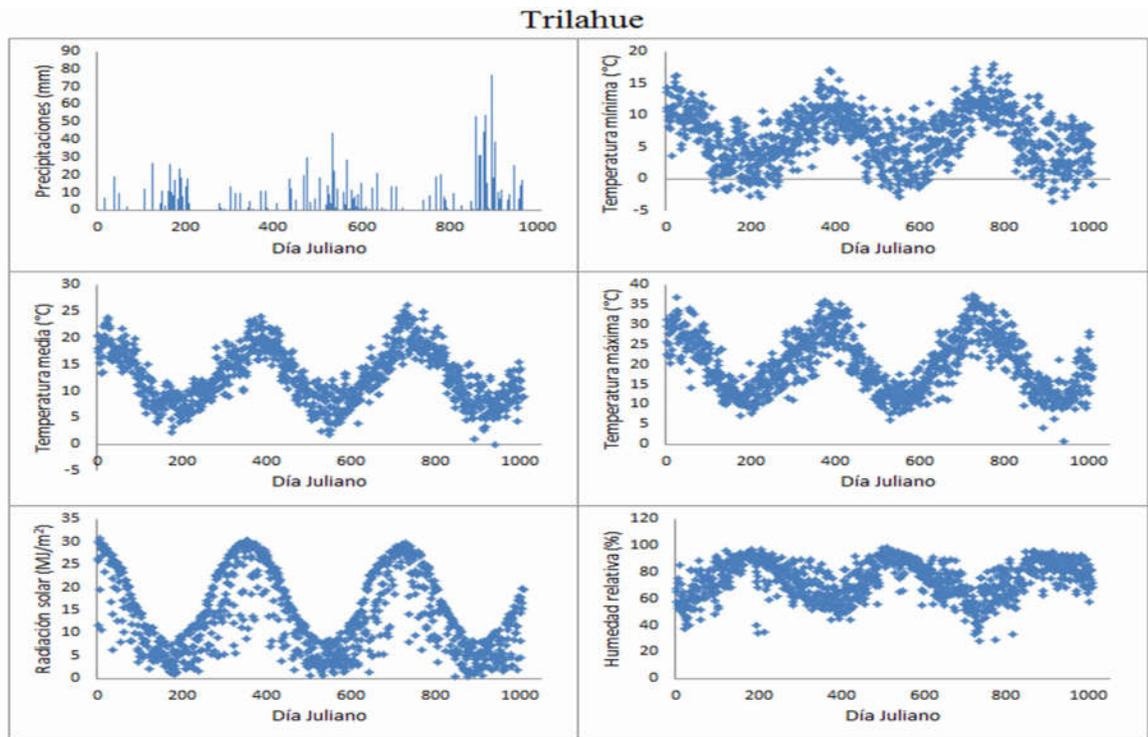


Figura 4. Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Trilahue del predio Tapihue. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010.

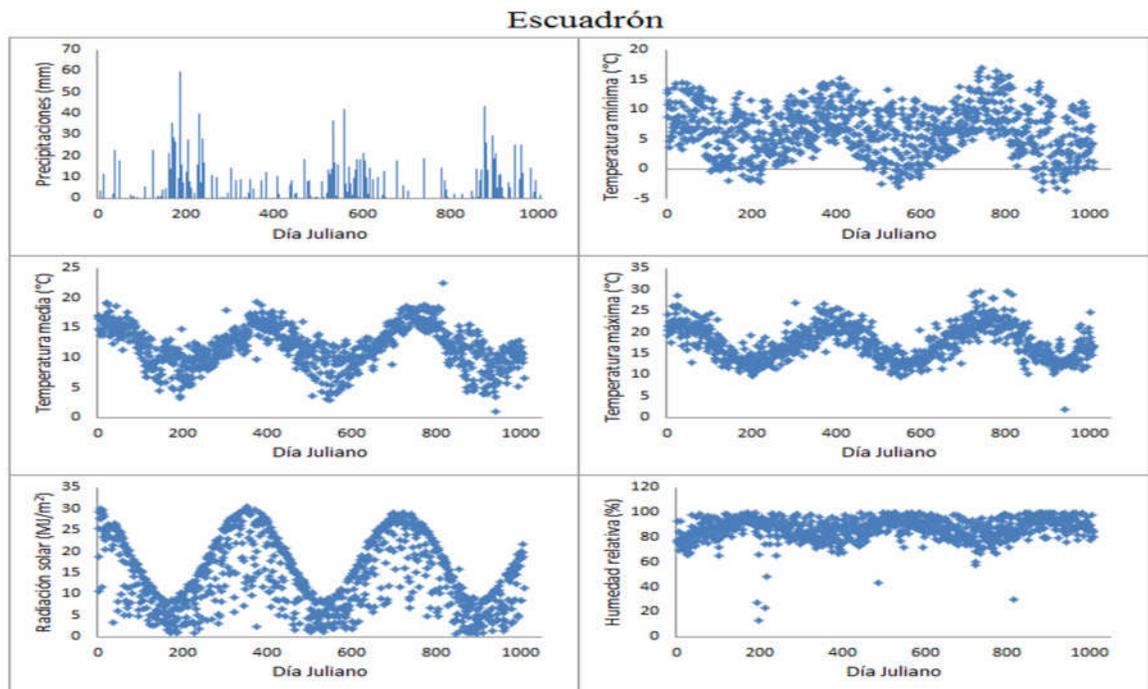


Figura 5. Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Escuadrón del predio Lomas Coloradas. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010.

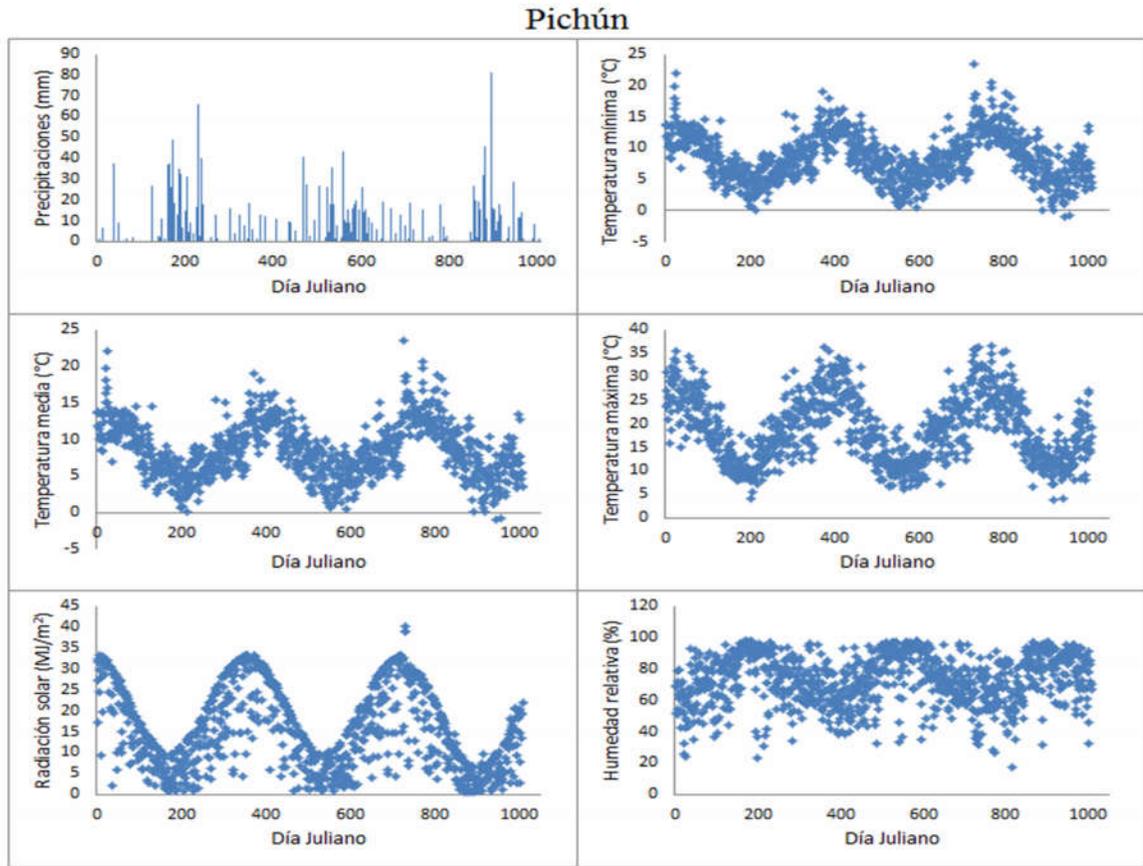


Figura 6. Precipitaciones, temperaturas mínimas, medias y máximas, radiación solar y humedad relativa para los años 2010, 2011 y 2012 (hasta Septiembre de 2012, día Juliano 1.000) para la estación meteorológica Pichún del predio Nacimiento. Día Juliano comienza el 1 de Enero de 2010.

### 3.2.7 Determinación de biomasa y volumen

A partir de la información registrada en los inventarios realizados mensualmente, desde Agosto de 2010 a Agosto de 2012, en cada una de las parcelas permanentes, se procedió a calcular la biomasa total. Se utilizaron las ecuaciones de biomasa desarrolladas para Nueva Zelanda por Madwick (1994) para cada componente (fuste, follaje, ramas y raíces) y para el total.

#### Biomasa de fustes ( $w_s$ )

La biomasa fustal ( $w_s$ ,  $t\ ha^{-1}$ ) fue estimada mediante la siguiente ecuación, donde H corresponde a la altura media del rodal (m), G al área basal ( $m^2\ ha^{-1}$ ), A a la edad (años) y N a la densidad ( $\text{árb.}\ ha^{-1}$ ).

$$\ln(w_s) = -3.56 + 1.10 \ln H + 0.62 \ln(G + 1) + 0.36 \ln A + 0.28 \ln N \quad (\text{Ec } 2)$$

### **Biomasa de Follaje ( $w_f$ )**

La biomasa de follaje ( $w_f$ , t ha<sup>-1</sup>) fue determinada con el área basal ( $G$ , m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y la edad ( $A$ , años) a partir de la siguiente ecuación:

$$\ln(w_f) = -1.337 + 0.742 \ln(G + 1) + 1.478 \ln(A) - 0.404 (\ln(A))^2 \quad (\text{Ec 3})$$

### **Biomasa de Ramas ( $w_b$ )**

La biomasa de ramas vivas ( $w_b$ , t ha<sup>-1</sup>) aumentó con la altura media del rodal ( $H$ ) y con la biomasa del follaje ( $w_f$ , t ha<sup>-1</sup>) y disminuyó en la medida que aumentó la densidad del rodal ( $N$ ).

$$w_b = -1.13 + 0.45 H - 0.0011 N + 1.33 w_f \quad (\text{Ec 4})$$

### **Biomasa de Raíces ( $w_r$ )**

La biomasa de raíces ( $w_r$ , kg), mayores a 5 mm de diámetro, se relacionó con el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) de la siguiente manera:

$$\ln w_r = 2.73 \ln \text{DAP} - 5.009 \quad (\text{Ec 5})$$

### **Biomasa Total ( $w_w$ )**

La biomasa total ( $w_w$ , t ha<sup>-1</sup>) se calculó mediante la sumatoria de la biomasa de todos los componentes fuste ( $w_s$ ), follaje ( $w_f$ ), ramas ( $w_b$ ) y raíces ( $w_r$ ), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$w_w = w_s + w_f + w_b + w_r \quad (\text{Ec 6})$$

### **Volumen (V)**

El volumen se calculó a partir de la altura ( $H$ , m) y el área basal ( $G$ , m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{G H}{3} \quad (\text{Ec 7})$$

### 3.2.8 Eficiencia de Crecimiento

Dado que las parcelas difieren ampliamente en ocupación de sitio y edades, es que se optó por estandarizar la productividad utilizando el concepto de eficiencia de crecimiento (growth efficiency,  $G_E$ ), que consistió en dividir el incremento periódico ( $PAI$ ) por el índice de área foliar ( $L$ ,  $m^2 m^{-2}$ ), esto se realizó para la biomasa ( $t ha^{-1}$ ) y para el volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ). Para efectos de llevar la eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) a un intervalo de tiempo equivalente es que se estandarizó a un año, a pesar que los valores se midieron con intervalos aproximadamente mensuales (Bown, 2007).

$$G_E = \frac{PAI}{L} \quad (Ec 8)$$

### 3.2.9 Balance de Carbono

La productividad primaria bruta (GPP, del inglés gross primary productivity), corresponde al carbono total asimilado a través del proceso de fotosíntesis en un intervalo dado de tiempo, mientras que la productividad primaria neta (NPP, del inglés net primary productivity) corresponde a todo el carbono asimilado menos la respiración autotrófica ( $GPP-R_a$ ) (Waring *et al.*, 1998).

La productividad primaria bruta fue estimada a través de la siguiente ecuación, planteada por Giardina *et al.* (2003):

$$GPP = ANPP + APR + TBCF \quad (Ec 9)$$

Donde ANPP, del inglés above-ground net primary productivity, es la producción primaria neta aérea, APR, del inglés above-ground plant respiration, corresponde a la respiración aérea de la planta y TBCF, del inglés total below-ground carbón flux, es el carbono total asimilado bajo el suelo.

La productividad primaria neta aérea (ANPP) fue calculada como:

$$ANPP = F_A + F_W + \Delta C_C + \Delta C_W \quad (Ec 10)$$

Donde  $F_A$  es el flujo de carbono asociado a la caída de hojarasca compuesta por hojas, ramas, frutos y corteza,  $F_W$  es el flujo de carbono asociado a la mortalidad,  $\Delta C_C$  corresponde al incremento en el contenido de carbono en el follaje y  $\Delta C_W$  es el incremento en el contenido de carbono de ramas, corteza y madera.

La respiración aérea de la planta (APR) se calculó como:

$$APR = L_{RC} + L_{RM} + W_R \quad (\text{Ec 11})$$

Dónde  $L_{RC}$  corresponde a la respiración de construcción del follaje,  $L_{RM}$  a la respiración de mantención del follaje y  $W_R$  a la respiración de mantención y construcción de madera.

Gran parte del carbono (C) asimilado por los árboles es respirado, asignado a micorrizas, exudado por las raíces o cae al suelo del bosque en forma de hojarasca. El carbono total asimilado bajo el suelo (TBCF) es una parte importante de la productividad primaria bruta (GPP) (Ryan *et al.*, 1996).

El carbono total asimilado bajo el suelo (TBCF) fue calculado a través de la siguiente ecuación:

$$TBCF = F_S + F_E - F_A + \Delta C_S + \Delta C_R + \Delta C_L \quad (\text{Ec 12})$$

Donde  $F_S$  es el flujo de salida de  $\text{CO}_2$  hacia la superficie,  $F_E$  corresponde al flujo de carbono transportado fuera a través del proceso de lixiviación,  $\Delta C_S$  es el cambio en el contenido de carbono en el suelo mineral,  $\Delta C_R$  es el incremento en el contenido de carbono de raíces y  $\Delta C_L$  es el cambio en el contenido de carbono en la capa de litera. Para estimar TBCF, la caída de hojarasca ( $F_A$ ) es sustraída de  $F_S$  ya que  $F_S$  incluye el carbono liberado por la descomposición de la litera en un sistema estable.

La productividad primaria bruta (NPP) fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$NPP = GPP - APR - F_S \quad R_h/R_a \quad (\text{Ec 13})$$

Donde GPP corresponde a la productividad primaria bruta, APR a la respiración aérea de la planta,  $F_S$  al flujo de salida de  $\text{CO}_2$  hacia la superficie y  $R_h/R_a$  es la relación entre la respiración heterotrófica y autotrófica en el suelo, valor que se asumió 0,5 (Bown, 2007).

### **Productividad primaria neta aérea**

Los valores de ANPP fueron calculados mediante la Ec 10. La litera ( $F_A$ ) fue colectada estacionalmente. Durante el experimento hubo mortalidad ( $F_W$ ) por la caída de árboles por viento en los sitios Lomas Coloradas y Nacimiento, y fue incluida como una disminución de la densidad en el cálculo de la biomasa. Los valores de  $\Delta C_C$  y  $\Delta C_W$  fueron calculados como el incremento anual en biomasa para cada componente (fuste, ramas, follaje y raíces), mediante las ecuaciones desarrolladas por Madgwick (1994). Para todos los cálculos, el contenido de carbono se asumió como el 50% de la biomasa (Bown, 2007).

## Respiración aérea de la planta

Los valores de APR fueron calculados mediante la Ec 11, que corresponden a la suma de la respiración de construcción y mantenimiento del follaje y de la madera. La respiración de construcción del follaje ( $L_{RC}$ ) y de la madera ( $W_R$ ) fueron asumidos como el 25% de la productividad primaria neta del follaje y de la madera, respectivamente (Ryan, 1991a, Ryan, 1991b).

El principal componente de APR, la respiración de mantenimiento del follaje ( $L_{RM}$ ), fue estimado como la tasa de respiración nocturna ( $R_d$ ) escalada para toda la temporada de crecimiento usando un  $Q_{10}$  igual a 2, los promedios mensuales de la temperatura del aire por hora y los valores interpolados del  $L$  (Ryan, 1991a).

$$R_d = L \pi R_o e^{0,0693 T} \quad (\text{Ec 14})$$

Donde  $L$  corresponde al índice de área foliar proyectado,  $R_o$  se asume un valor de  $0,28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  como promedio calculado por Bown (2007),  $T$  corresponde a la temperatura del aire medida en  $^{\circ}\text{C}$  y  $0,0693$  corresponde a la constante de escalamiento exponencial asumiendo un  $Q_{10}$  igual a 2.

## Carbono total asimilado bajo el suelo

La respiración de suelos ( $F_S$ ) fue escalada a toda la temporada de crecimiento con las mediciones realizadas con la cámara de respiración de suelos. El carbono perdido por lixiviación ( $F_E$ ), el cambio de carbono en el suelo mineral ( $\Delta C_S$ ) y el incremento en la capa de litera ( $\Delta C_L$ ) fueron asumidos cero. El incremento en el contenido de carbono de raíces ( $\Delta C_R$ ) fue determinado como la diferencia entre los valores iniciales y finales de carbono contenido en la biomasa de las raíces.

Finalmente la productividad primaria bruta (GPP) fue calculada para cada parcela basada en balance de masa (Giardina y Ryan, 2002; Giardina *et al.*, 2003) de acuerdo a las Ec 9 a Ec 12 presentadas anteriormente. La productividad primaria neta (NPP) fue calculada como el GPP menos la respiración autotrófica (Ec 13). Los valores de GPP, NPP, ANPP, APR y TBCF fueron comparados mediante análisis de varianza para determinar la influencia de los efectos principales e interactivos del sitio y de la clase de edad sobre estas variables. Cuando existieron diferencias significativas se llevó a cabo una prueba de comparaciones múltiples (Tukey) para identificar diferencias entre las medias. Los supuestos de homogeneidad de varianza y normalidad de residuos, del análisis de varianza, fueron evaluados mediante la prueba de Bartlett y Shapiro-Wilk, respectivamente.

### 3.2.10 Modelo 3-PG

Para modelar las variables de interés se utilizó el modelo de procesos 3-PG contando con la información climática, de la vegetación y de suelos requerido por el modelo. Los residuos entre los valores predichos y estimados mediante 3-PG de NPP y GPP, fueron graficados

contra los valores predichos (y contra las variables de estado de las parcelas), ajustando un modelo de regresión lineal de la forma  $V_O = V_E \alpha$  que de no ser significativo indicaría que el modelo sería insesgado. El coeficiente de determinación del modelo de regresión entre los valores observados y estimados indicó la precisión del ajuste. Además se utilizó el coeficiente de eficiencia de modelación de Nash y Sutcliffe (1970) como indicador de precisión y sesgo de los modelos.

$$NS = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}_i)^2} \right) \quad (\text{Ec 15})$$

Donde  $o_i$  son los valores observados,  $\bar{o}_i$  es la media de los valores observados y  $m_i$  son los valores estimados por el modelo. El máximo valor alcanzable de NS es 1 que significa completa concordancia entre los valores observados y predichos. Un valor de 0 se obtiene cuando las predicciones no son mejores que un promedio simple, y negativo cuando las predicciones son peores que el promedio (Burkhart y Tomé, 2012).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Inventario Forestal

En el inventario forestal realizado a todas las parcelas del estudio, se midieron variables como densidad, DAP y altura, entre otras. Para cada parcela se calculó el área basal y el volumen usando la ecuación de Álvarez *et al.* (2013) y la biomasa de cada componente utilizando las ecuaciones de biomasa de Madwick (1994).

En la Figura 7, se muestra las densidades de los rodales en las tres clases de edad dentro de cada sitio. Con esto, la intención fue aproximarse a la curva completa de crecimiento de cada sitio. Para los sitios de Lomas Coloradas y Santa Bárbara esto se logró bastante bien apreciando una disminución en la densidad inicial ( $> 1000$  árb.  $ha^{-1}$ ) a alrededor de 300-400 árb.  $ha^{-1}$  posterior a los 15 años. En este sentido la selección de rodales en distintas clases de edad en Tapihue y Nacimiento fue atípica. En Tapihue, las densidades en las parcelas de mayor edad fueron mayores que en las de menos edad. En Nacimiento, las parcelas en la edad intermedia tuvieron mayor densidad que las de menor y mayor edad. Esto se debió a que las parcelas son independientes entre clases de edad, razón por la cual las muestras son desequilibradas. Por este motivo no se tomó como una cronosecuencia el incremento de las variables entre las clases de edad, sino como una tendencia general en el crecimiento de la especie.

En Santa Bárbara y Tapihue, se aprecian raleos en la clase de edad 7-14 años. En Tapihue, en la clase de edad 14+ años, se observa que hubo caída de árboles al principio y al final del ensayo y un raleo en una parcela. Además se puede observar una leve disminución en la densidad en la clase de edad 7-14 años en el sitio Nacimiento, situación que se presentó por la caída de árboles por efecto del viento.

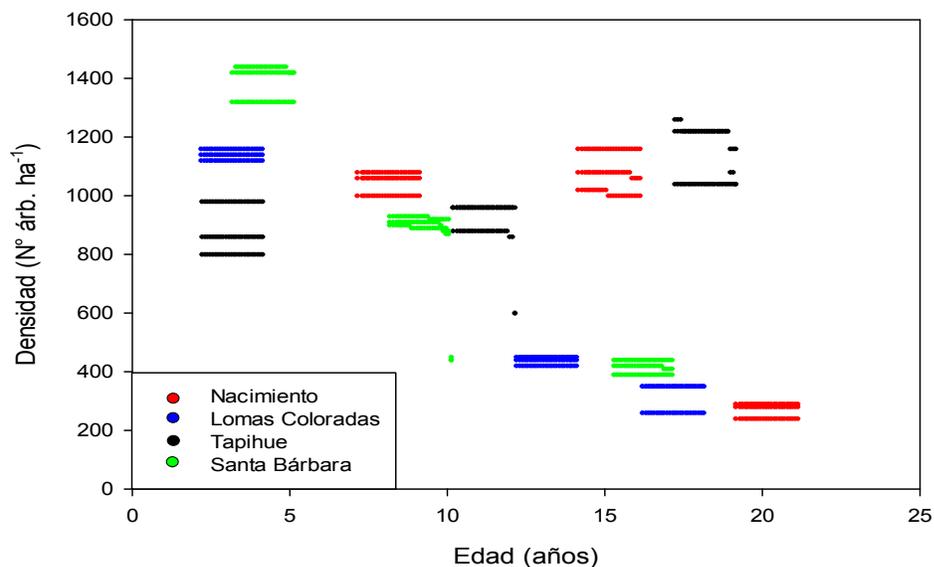


Figura 7. Trayectoria de la densidad para las tres clases de edad y cuatro zonas de crecimiento del ensayo.

En términos de las densidades globales, la clase de edad 0-7 años en el sitio Santa Bárbara presentó la densidad más alta y Tapihue la densidad más baja. En la clase de edad 7-14, Nacimiento fue el sitio que presentó una mayor densidad, mientras Lomas Coloradas presentó la menor densidad. En la clase de edad 14+ años, Tapihue fue el sitio con mayor densidad, mientras que Nacimiento y Lomas Coloradas los con menores densidades.

En la Figura 8 están trazadas las trayectorias de crecimiento en  $DAP_g$ , área basal, altura dominante y volumen de las 36 parcelas que componen el ensayo.

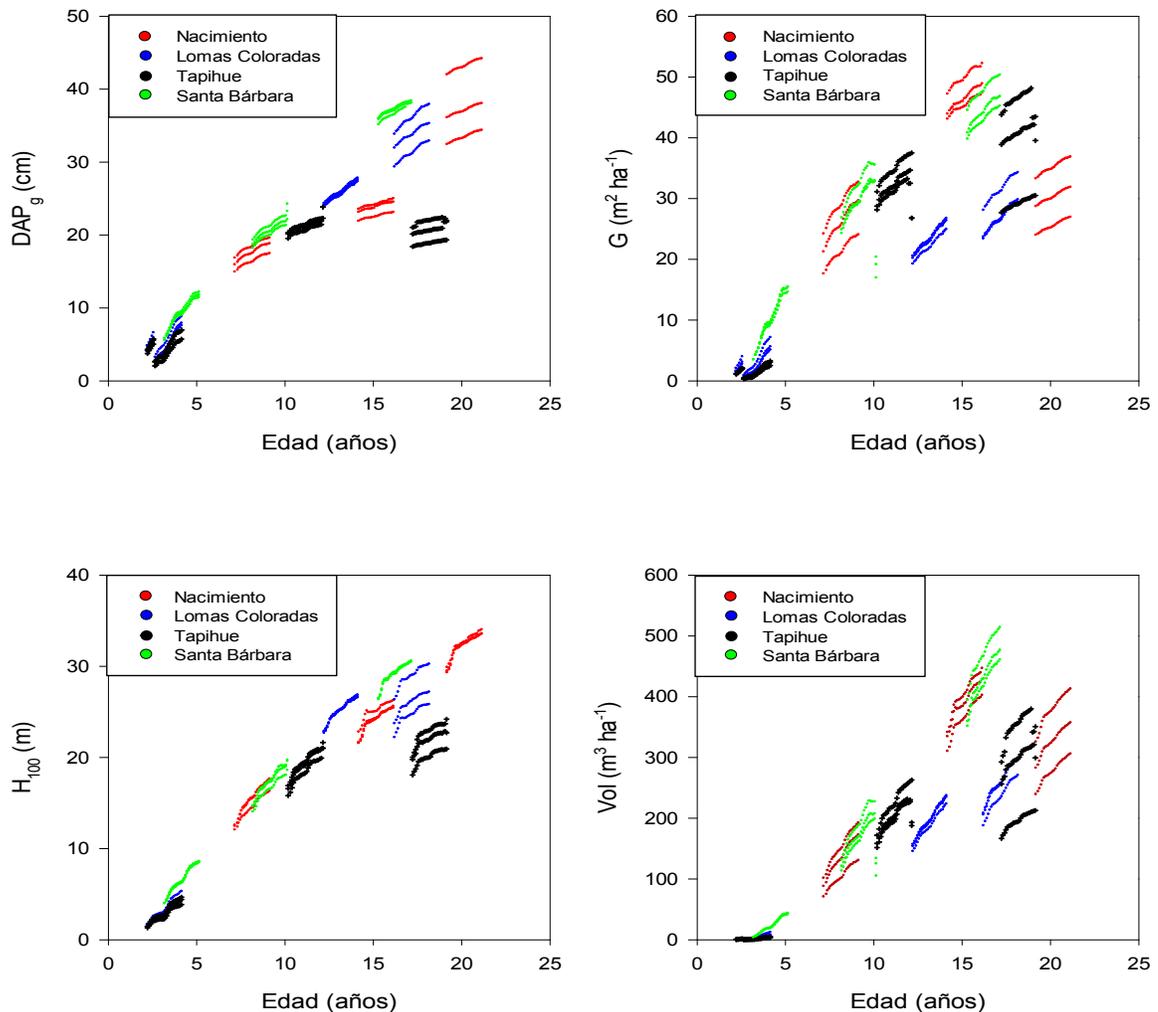


Figura 8. Trayectorias de crecimiento para las tres clases de edad y cuatro zonas de crecimiento del ensayo para el  $DAP_g$ , área basal ( $G$ ), altura dominante ( $H_{100}$ ) y volumen ( $Vol$ ).

Se puede observar que existen similitudes entre Nacimiento y Santa Bárbara, en el  $DAP_g$ ,  $G$ ,  $H_{100}$  y  $Vol$ , a la edad de 8 años aproximadamente. Esto se debe al desequilibrio en las muestras mencionado anteriormente.

## 4.2 Crecimiento y rendimiento forestal

### 4.2.1 Índice de área foliar

El Cuadro 3 muestra los valores de  $L$  calculados mediante la Ec 1, para los distintos sitios y las distintas clases de edad. En promedio los mayores valores de  $L$  se encontraron en Nacimiento y Santa Bárbara, seguido por Tapihue y finalmente Lomas Coloradas. Es interesante apreciar como el valor de  $L$  culmina en la clase de edad intermedia (7-14 años) para posteriormente decrecer.

Cuadro 3. Índice de área foliar ( $L$ ) en las distintas clases de edad y sitio comprendidas en el estudio en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012.

$L$ ( $m^2 m^{-2}$ )	Clase de Edad									Sub-Total		
	0-7 años			7-14 años			14+ años					
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Nacimiento	8,70	9,65	10,34	11,49	11,40	11,27	6,56	6,54	6,49	<b>8,92</b>	<b>9,20</b>	<b>9,37</b>
Lomas Coloradas	1,21	1,51	3,50	7,06	7,39	7,80	6,88	7,11	7,32	<b>5,05</b>	<b>5,34</b>	<b>6,21</b>
Santa Bárbara	2,65	4,69	6,88	9,73	10,73	7,38	10,35	10,46	10,41	<b>7,57</b>	<b>8,63</b>	<b>8,23</b>
Tapihue	1,01	1,11	2,29	10,08	10,42	9,49	8,58	8,53	8,00	<b>6,55</b>	<b>6,69</b>	<b>6,59</b>
<b>Sub-Total</b>	<b>3,39</b>	<b>4,24</b>	<b>5,75</b>	<b>9,59</b>	<b>9,99</b>	<b>8,98</b>	<b>8,09</b>	<b>8,16</b>	<b>8,06</b>	<b>7,02</b>	<b>7,46</b>	<b>7,60</b>

En la Figura 9 se observa que a menores edades el  $L$  es menor, llegando a un máximo en edades intermedias, para luego decrecer en edades adultas, esto se aprecia como una tendencia general, ya que en el estudio las parcelas son independientes respecto a las clases de edad, por lo tanto no siguen una secuencia cronológica.

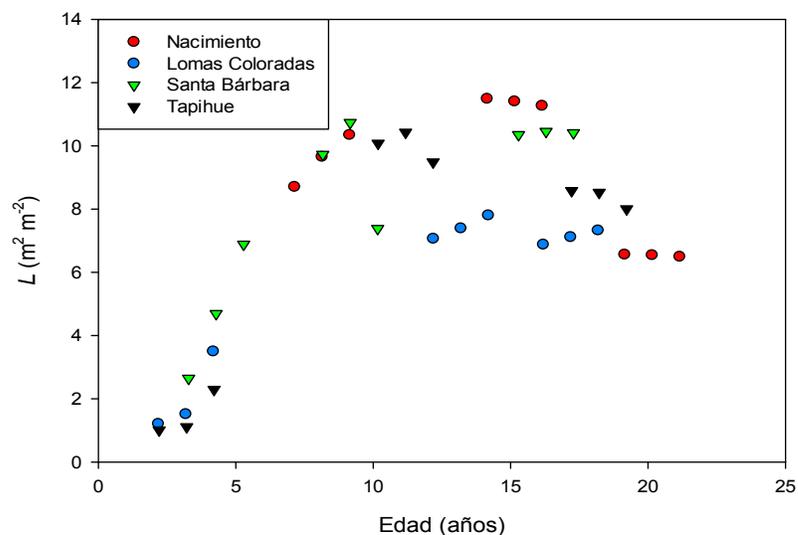


Figura 9. Índice de área foliar ( $L$ ) para los cuatro sitios en estudio y tres clases de edad en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012.

## 4.2.2 Biomasa

El Cuadro 4 muestra un resumen de la biomasa por componente para cada clase de edad y cada sitio perteneciente al estudio en Agosto de 2010, 2011 y 2012.

Cuadro 4. Biomasa de cada componente en las distintas clases de edad y sitios comprendidos en el estudio, para los años 2010, 2011 y 2012.

Componente	Sitio	Clase de Edad									Sub-Total		
		0-7 años			7-14 años			14+ años					
		2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Biomasa total (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	84,3	113,3	137,1	244,14	280,83	304,86	198,18	225,49	242,26	<b>175,56</b>	<b>206,54</b>	<b>228,08</b>
	Lomas Coloradas	2,86	5,77	18,14	124,40	149,71	166,74	151,62	180,46	201,24	<b>92,96</b>	<b>111,98</b>	<b>128,70</b>
	Santa Bárbara	10,20	29,84	50,80	107,80	140,82	102,88	241,56	277,64	301,96	<b>119,86</b>	<b>149,43</b>	<b>151,88</b>
	Tapihue	2,10	3,82	10,72	134,72	165,72	165,92	199,16	231,06	233,86	<b>111,98</b>	<b>133,53</b>	<b>136,82</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>24,87</b>	<b>38,18</b>	<b>54,19</b>	<b>152,77</b>	<b>184,27</b>	<b>185,10</b>	<b>197,63</b>	<b>228,66</b>	<b>244,83</b>	<b>125,09</b>	<b>150,37</b>	<b>161,37</b>
Biomasa raíces (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	13,64	17,55	20,90	37,52	40,51	43,28	34,34	37,06	39,70	<b>28,50</b>	<b>31,71</b>	<b>34,62</b>
	Lomas Coloradas	0,46	0,50	2,40	17,48	20,96	23,92	26,70	31,39	35,92	<b>14,88</b>	<b>17,61</b>	<b>20,74</b>
	Santa Bárbara	1,08	4,32	7,88	18,42	23,72	16,02	48,36	53,35	57,82	<b>22,62</b>	<b>27,13</b>	<b>27,24</b>
	Tapihue	0,28	0,21	1,00	22,24	25,90	25,64	27,92	30,28	29,94	<b>16,80</b>	<b>18,80</b>	<b>18,86</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>3,87</b>	<b>5,64</b>	<b>8,05</b>	<b>23,92</b>	<b>27,77</b>	<b>27,22</b>	<b>34,33</b>	<b>38,02</b>	<b>40,85</b>	<b>20,70</b>	<b>23,81</b>	<b>25,37</b>
Biomasa fustes (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	44,08	65,15	83,06	168,26	201,09	222,12	134,28	157,67	171,42	<b>115,54</b>	<b>141,30</b>	<b>158,87</b>
	Lomas Coloradas	0,84	1,98	6,56	79,34	99,10	111,90	97,12	119,43	134,70	<b>59,10</b>	<b>73,51</b>	<b>84,39</b>
	Santa Bárbara	3,88	12,29	23,26	58,94	82,70	59,98	155,14	184,74	204,10	<b>72,65</b>	<b>93,24</b>	<b>95,78</b>
	Tapihue	0,60	1,28	3,72	80,24	105,34	107,26	142,00	170,61	174,64	<b>74,28</b>	<b>92,41</b>	<b>95,21</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>12,35</b>	<b>20,17</b>	<b>29,15</b>	<b>96,70</b>	<b>122,06</b>	<b>125,32</b>	<b>132,14</b>	<b>158,11</b>	<b>171,22</b>	<b>80,39</b>	<b>100,11</b>	<b>108,56</b>
Biomasa ramas (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	16,62	19,45	21,26	25,16	26,16	26,52	21,98	23,25	23,70	<b>21,26</b>	<b>22,95</b>	<b>23,82</b>
	Lomas Coloradas	0,18	1,42	5,16	19,46	21,13	22,06	19,90	21,45	22,22	<b>13,18</b>	<b>14,67</b>	<b>16,48</b>
	Santa Bárbara	2,64	7,66	11,74	19,26	22,04	18,38	26,16	27,55	28,08	<b>16,02</b>	<b>19,08</b>	<b>19,40</b>
	Tapihue	0,08	0,95	3,36	20,64	22,46	22,14	19,38	20,39	20,08	<b>13,36</b>	<b>14,60</b>	<b>15,20</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>4,88</b>	<b>7,37</b>	<b>10,38</b>	<b>21,13</b>	<b>22,95</b>	<b>22,28</b>	<b>21,86</b>	<b>23,16</b>	<b>23,52</b>	<b>15,96</b>	<b>17,82</b>	<b>18,73</b>
Biomasa follaje (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	10,00	11,16	11,88	13,20	13,08	12,94	7,58	7,51	7,46	<b>10,26</b>	<b>10,58</b>	<b>10,76</b>
	Lomas Coloradas	1,38	1,87	4,02	8,12	8,52	8,84	7,90	8,19	8,42	<b>5,80</b>	<b>6,19</b>	<b>7,09</b>
	Santa Bárbara	2,60	5,58	7,92	11,18	12,36	8,48	11,90	12,00	11,96	<b>8,56</b>	<b>9,98</b>	<b>9,45</b>
	Tapihue	1,16	1,39	2,64	11,58	12,02	10,90	9,86	9,78	9,20	<b>7,53</b>	<b>7,73</b>	<b>7,58</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>3,79</b>	<b>5,00</b>	<b>6,62</b>	<b>11,02</b>	<b>11,49</b>	<b>10,29</b>	<b>9,31</b>	<b>9,37</b>	<b>9,26</b>	<b>8,04</b>	<b>8,62</b>	<b>8,72</b>

El sitio Lomas Coloradas tuvo el menor valor en biomasa total en comparación a los otros sitios, seguido por el sitio Tapihue. Al comparar estos dos sitios mencionados, se observaron valores similares en las clases de edad 0-7 años y 7-14 años, mientras que en la clase de edad 14+ años, el sitio Tapihue, presentó valores bastantes más altos que Lomas Coloradas. En el sitio Tapihue, ocurrieron raleos durante el año 2012, razón por la cual se observa, en el Cuadro 4, que la biomasa total fue similar en el año 2011 y 2012 en las clases de edad 7-14 y 14+ años, mientras que en Lomas Coloradas no se realizaron raleos, por lo que el crecimiento se mantuvo en ambos períodos.

En contraste a la situación mencionada anteriormente, se ubica el sitio Nacimiento, que tuvo los mayores valores de biomasa en las clases de edad 0-7 años y 7-14 años, sólo superado por el sitio Santa Bárbara e igualado por el sitio Tapihue en la clase de edad 14+ años. Al final del estudio (Agosto de 2012), el sitio Nacimiento presentó el mayor valor de biomasa, seguido por el sitio Santa Bárbara, dejando para el final a los sitios Lomas Coloradas y Tapihue, con valores de biomasa similares ( $128,70 \text{ t ha}^{-1}$  y  $136,82 \text{ t ha}^{-1}$  respectivamente).

La biomasa radicular tuvo un comportamiento similar al de la biomasa total, dónde los sitios Lomas Coloradas y Tapihue presentaron los valores más bajos de biomasa, mientras que el sitio Nacimiento tuvo los valores más altos junto al sitio Santa Bárbara. Esto mismo se puede observar para la biomasa de ramas y follaje, mientras que en la biomasa fustal el valor es similar entre Santa Bárbara y Tapihue.

En la Figura 10, se puede observar la biomasa total de las 36 parcelas del estudio durante los 2 años de crecimiento con las mediciones de Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012. En el sitio Santa Bárbara, en edades entorno a los 8-10 años, se observa un decrecimiento en la biomasa total, esto se debió a raleos programados. Esta misma situación se puede observar para el sitio Tapihue entre los 10 y 12 años.

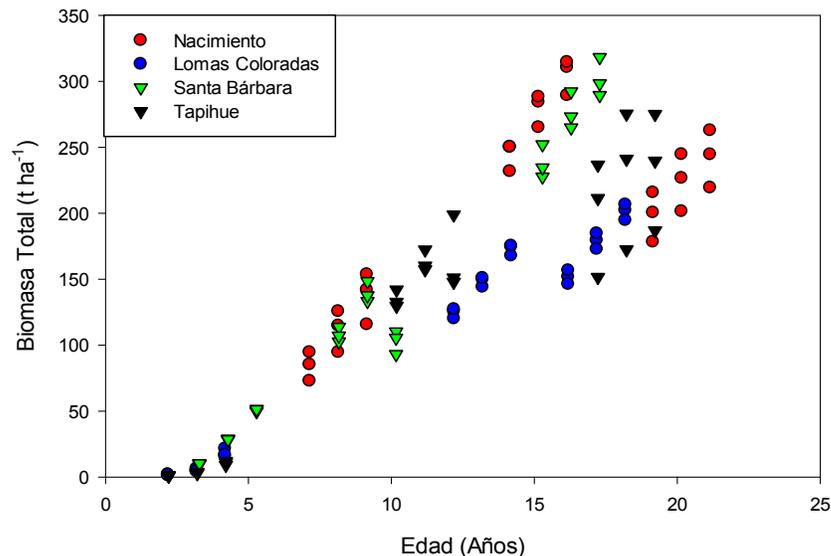


Figura 10. Biomasa total de todas las parcelas del estudio en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012.

La biomasa total también fue graficada para la altura y el área basal. La Figura 11 muestra que existe un aumento en la biomasa total con el incremento de cualquiera de estas dos variables. En el caso de la altura, en Nacimiento, se observa un valor menor de biomasa a mayor altura, esto se debe a la densidad existente en las parcelas de la clase de edad 14+ años, que son las que presentan las mayores alturas. En el área basal, se puede ver una concentración de puntos en los menores y mayores valores, mientras que en los valores intermedios se aprecia una distribución más amplia. A diferencia de la altura no se aprecia una disminución en la biomasa total en Nacimiento debido a la densidad.

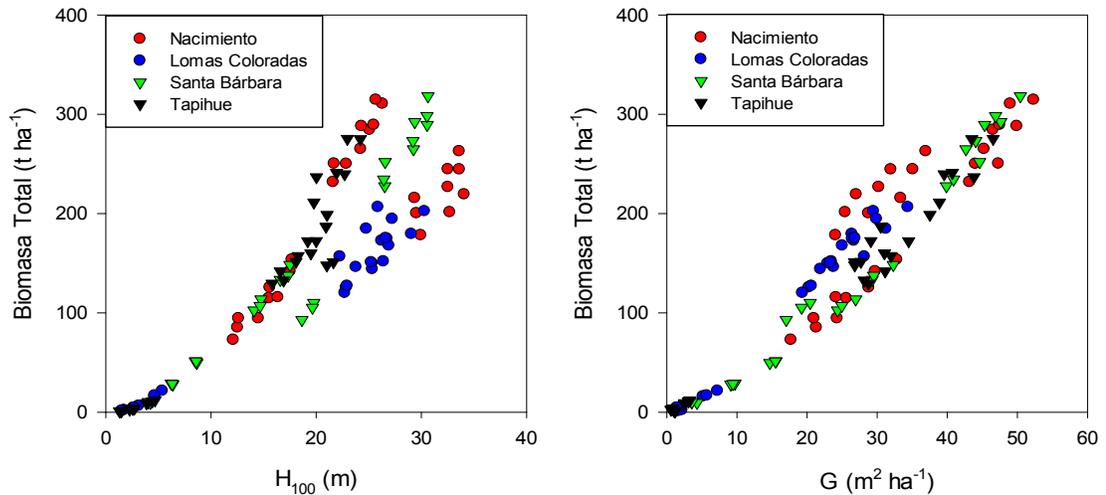


Figura 11. Biomasa total de todas las parcelas y clases de edad comparadas con altura dominante y área basal.

### Partición de biomasa en sus componentes

Se realizó una partición de la biomasa en sus distintos componentes, para esto se utilizaron los valores de la biomasa fustal ( $Biomasa_f$ ), biomasa de ramas ( $Biomasa_r$ ), biomasa de follaje ( $Biomasa_{fo}$ ) y biomasa de raíces ( $Biomasa_{ra}$ ) y de biomasa total ( $Biomasa_T$ ).

La partición de la biomasa se graficó contra la edad, la altura dominante y el área basal. En la Figura 12, se puede observar el comportamiento de cada partición en el tiempo como una tendencia general en el crecimiento de la especie. La partición del fuste incrementó su valor con la clase de edad, con un promedio de 30% a los 2 años y un 75% a los 20 años. Cabe recordar que las clases de edad son independientes entre sí, por lo que el incremento con la edad, como se aprecia en la Figura 12, no necesariamente es válido, sólo marca una tendencia en el crecimiento de la especie. Esto se debió a las diferencias encontradas en la selección de parcelas, puesto que existe una cercanía entre la edad más alta de las parcelas en la clase de edad 0-7 años con la edad más baja en la clase de edad 7-14 años, lo mismo ocurrió entre las clases de edad 7-14 años y 14+ años, lo que genera una distorsión en los resultados encontrados, además las parcelas de cada clase de edad pertenecen a rodales diferentes dentro de los sitios de estudio, por lo tanto los gráficos no muestran el crecimiento de las parcelas durante 25 años sino que durante los 2 años de estudio. Se graficaron todas las clases de edad juntas para mostrar la tendencia general que presenta la especie con la edad.

Las particiones de ramas y follaje presentaron un comportamiento completamente distinto al fuste, puesto que estas tendieron a disminuir con la edad. Comenzando con valores cercanos al 30% en las ramas a la edad de 2 años, hasta valores cercanos al 10% a los 20 años. En el caso del follaje comenzó con valores en torno al 40% hasta valores cercanos al 5%. Finalmente la proporción de raíces aumentó con la edad hasta los 8 años, para posteriormente comenzar a decrecer levemente, como se observa en la Figura 12 entre los 15 a 25 años.

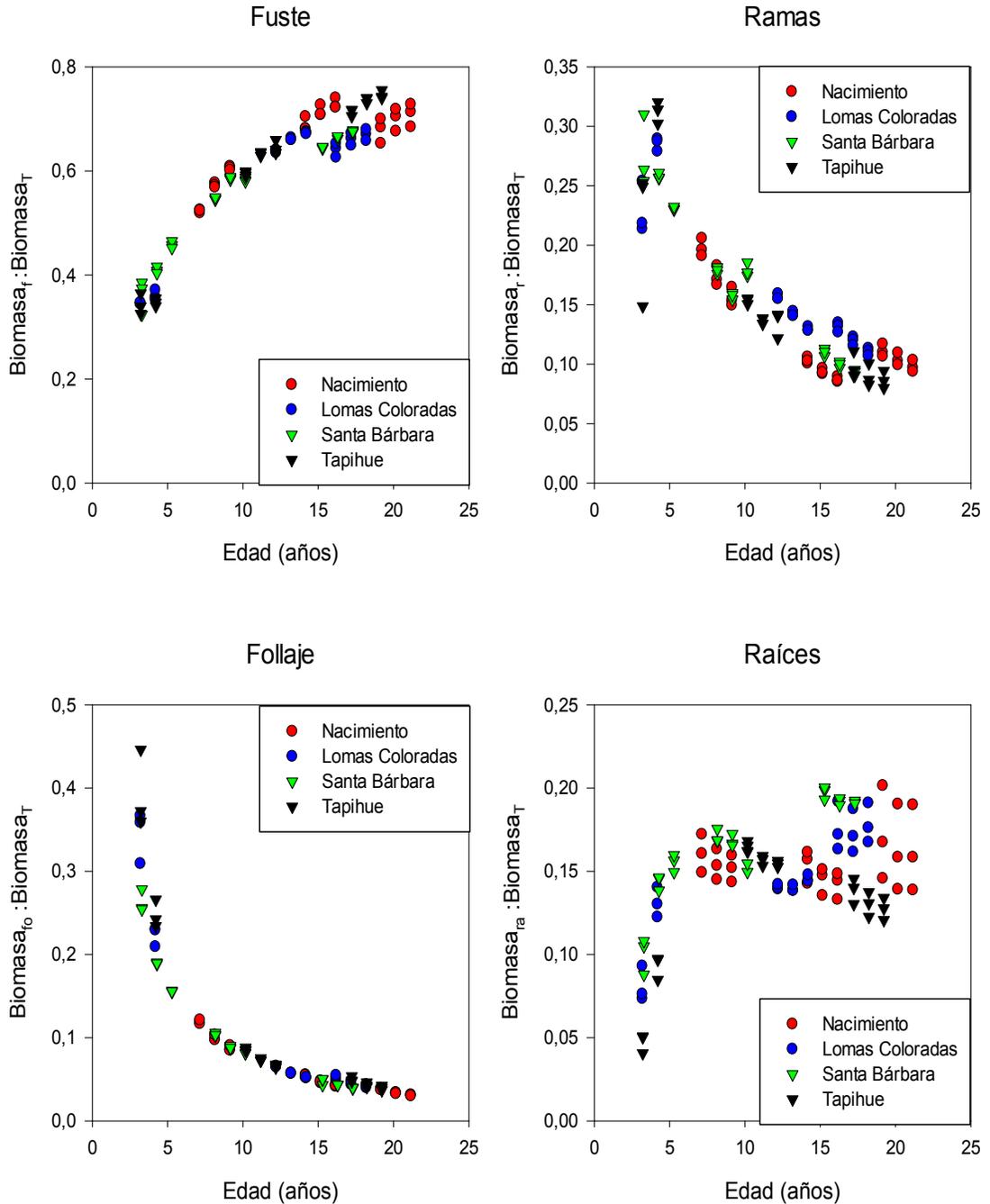


Figura 12. Partición de la biomasa en sus componentes versus edad, dónde  $Biomasa_f$ : biomasa del fuste,  $Biomasa_r$ : biomasa de ramas,  $Biomasa_{fo}$ : biomasa del follaje,  $Biomasa_{ra}$ : biomasa de raíces,  $Biomasa_T$ : biomasa total.

Como se aprecia en la Figura 13, la proporción del fuste sobre la biomasa total aumenta con un área basal mayor, en cambio, la partición de ramas y follaje disminuye con el aumento del área basal. La proporción de raíces aumentó hasta un máximo de 20% a mayor área basal.

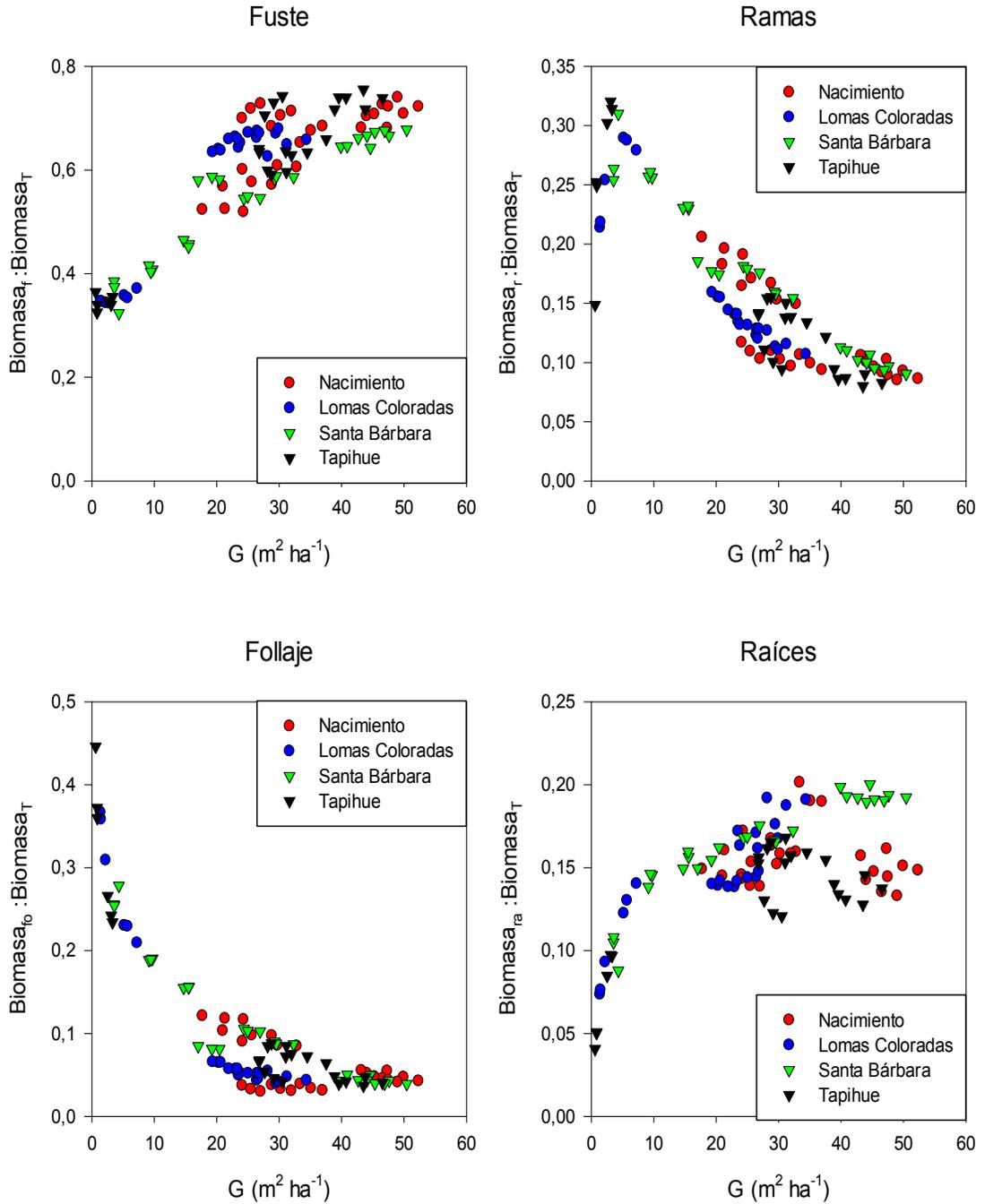


Figura 13. Partición de la biomasa en sus componentes versus área basal ( $G$ ), donde  $Biomasa_f$ : biomasa del fuste,  $Biomasa_r$ : biomasa de ramas,  $Biomasa_{fo}$ : biomasa del follaje,  $Biomasa_{ra}$ : biomasa de raíces,  $Biomasa_T$ : biomasa total.

La partición de la biomasa tuvo un comportamiento similar en la altura y en el área basal, la proporción correspondiente a fuste y raíces aumentaron a mayor altura y las proporciones de ramas y follaje disminuyeron con la altura (Figura 14).

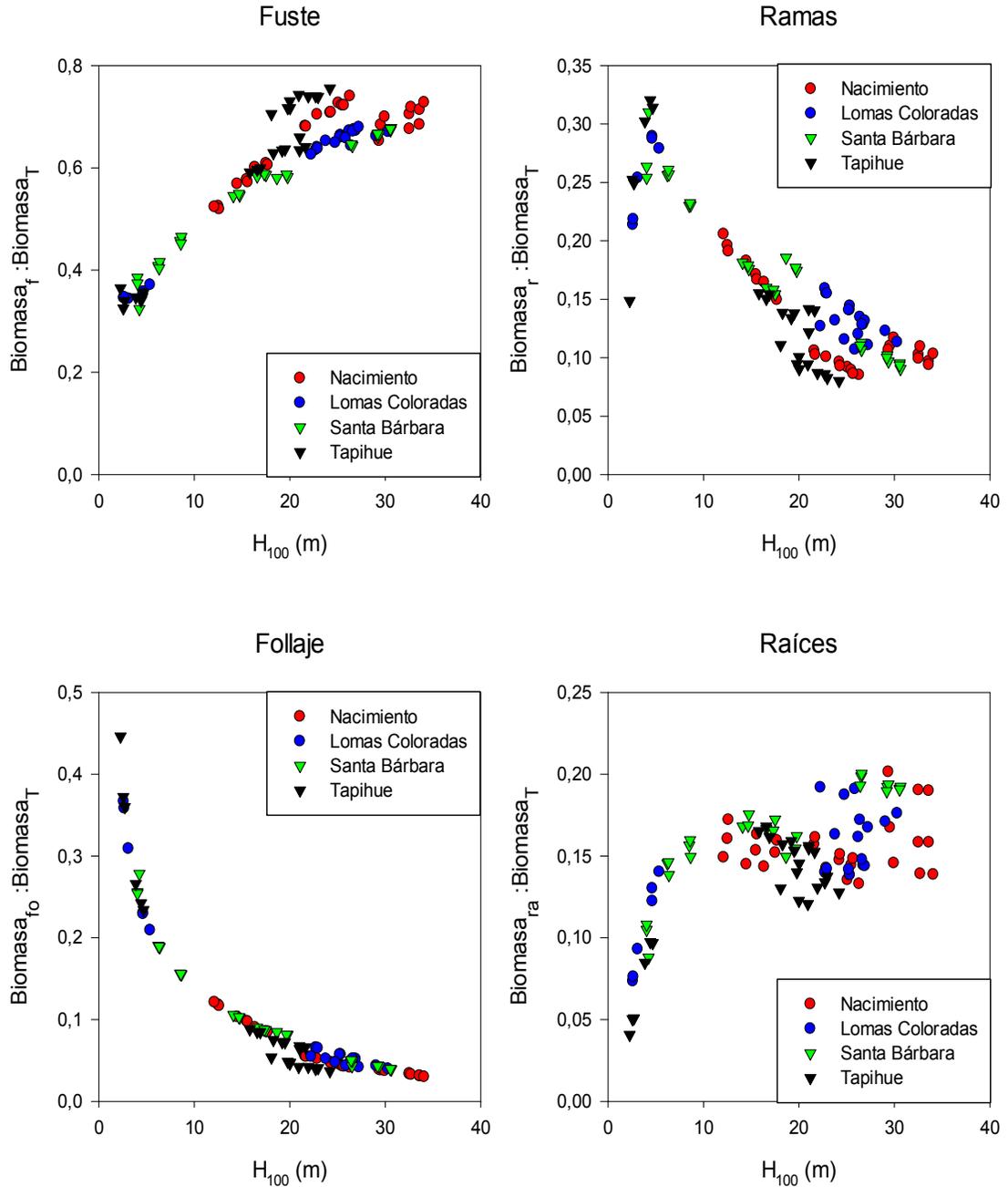


Figura 14. Partición de la biomasa en sus componentes versus altura dominante ( $H_{100}$ ), dónde  $Biomasa_f$ : biomasa del fuste,  $Biomasa_r$ : biomasa de ramas,  $Biomasa_{fo}$ : biomasa del follaje,  $Biomasa_{ra}$ : biomasa de raíces,  $Biomasa_T$ : biomasa total.

### Eficiencia de crecimiento

Se calculó la eficiencia de crecimiento a través de la Ec 8. Se encontró que en el período 2010-2011 la eficiencia presentó una tendencia a aumentar en edades mayores (Figura 15). En el período 2011-2012 ocurrieron raleos en las clases de edad 7-14 y 14+ años en el sitio Tapihue y en la clase de edad 7-14 años en el sitio Santa Bárbara, debido a esto los valores de eficiencia fueron negativos y no fueron graficados.

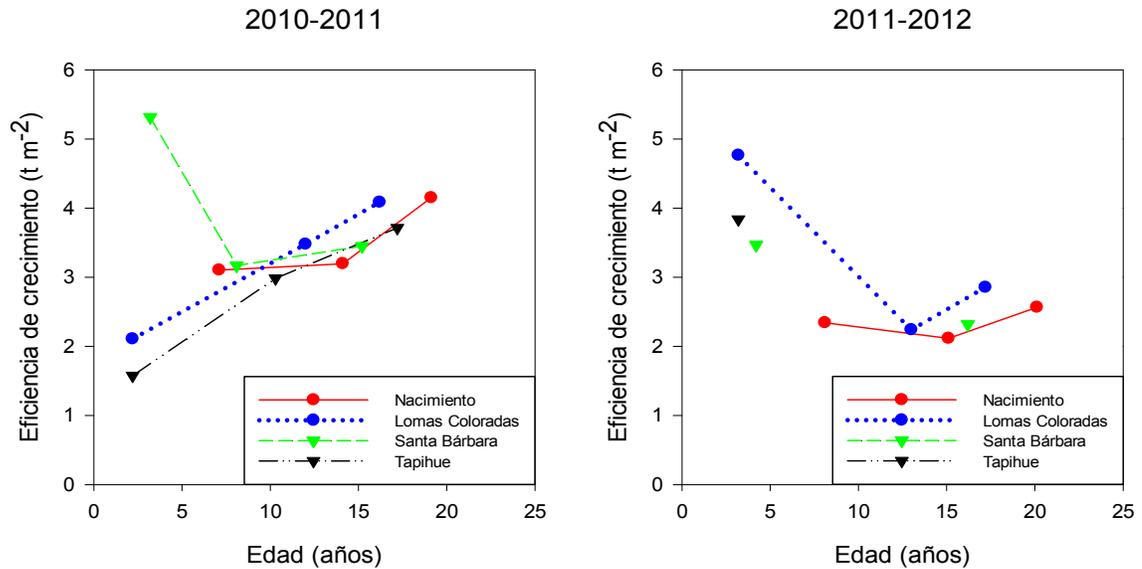


Figura 15. Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en biomasa ( $t\ ha^{-1}$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ ,  $m^2\ m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad.

La Figura 16 muestra que en los sitios, durante el período 2010-2011, la clase de edad 0-7 años, en el sitio Santa Bárbara es la que presentó una mayor eficiencia de crecimiento total, mientras que Tapihue tuvo la menor eficiencia. En las clases de edad 7-14 y 14+ años, los valores de eficiencia de crecimiento fueron similares entre sitios. Durante el período 2011-2012, existieron diferencias en comparación al período 2010-2012, en la clase de edad 0-7 años, donde el sitio Lomas Coloradas es el que presentó mayor eficiencia, mientras que Nacimiento fue el con menor eficiencia. En las clases de edad 7-14 y 14+ años se observó una disminución en la eficiencia en comparación al período 2010-2011. En la clase de edad 14+ años, la eficiencia fue similar entre Nacimiento, Lomas Coloradas y Santa Bárbara.

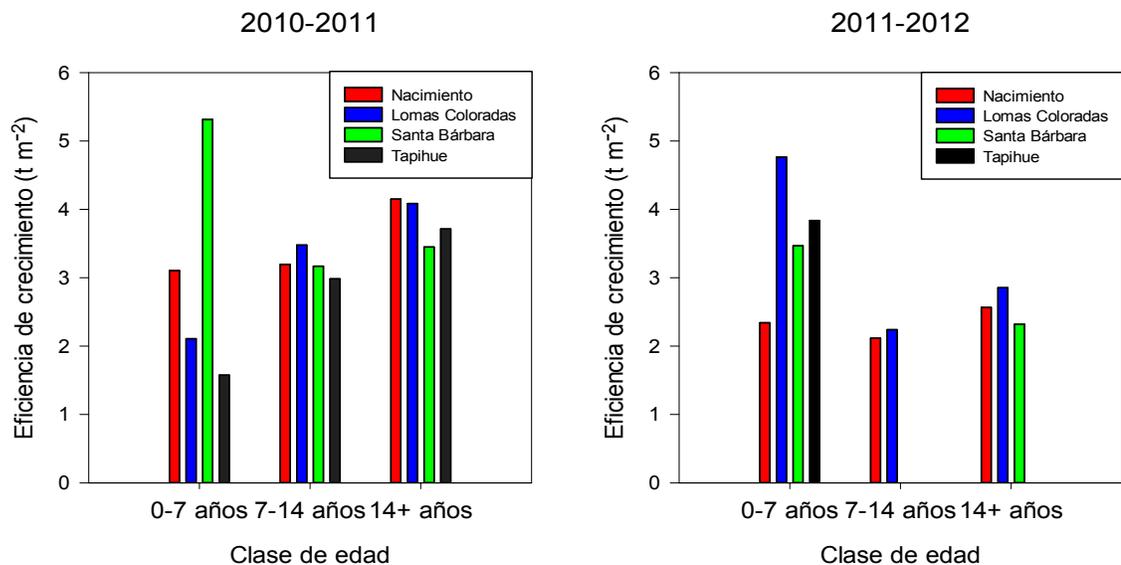


Figura 16. Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en biomasa ( $t\ ha^{-1}$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ ,  $m^2\ m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad.

### 4.2.3 Volumen

En el Cuadro 5, se puede observar que el sitio Nacimiento, en la clase de edad 0-7 años, es el que presentó un mayor valor en volumen con un total de 78,80 m<sup>3</sup>, seguido por el sitio Santa Bárbara con un volumen de 4,31 m<sup>3</sup>, a continuación Lomas Coloradas con un volumen de 0,85 m<sup>3</sup> y finalmente el sitio Tapihue, con un volumen de 0,49 m<sup>3</sup>, esto se debe a la edad de la plantación de cada sitio. Se debe considerar que Nacimiento tuvo la mayor edad promedio en esta clase, similar a la menor edad promedio de la clase siguiente.

De la misma forma que en la biomasa, el volumen aumentó en cada clase de edad a medida que avanzaron los años, desde Agosto de 2010 a Agosto de 2012, el volumen aumentó considerablemente en cada clase de edad, exceptuando los sitios Santa Bárbara y Tapihue, entre los años 2011 y 2012 en la clase de edad 7-14 años y el sitio Tapihue en la clase de edad 14+ años, debido a la ocurrencia de raleos.

Cuadro 5. Volumen en las distintas clases de edad y sitios comprendidos en el estudio, para los años 2010, 2011 y 2012.

V (m <sup>3</sup> )	Clase de Edad									Sub-Total		
	0-7 años			7-14 años			14+ años					
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Nacimiento	78,80	117,10	149,50	296,40	349,56	383,88	254,89	297,37	323,35	<b>210,03</b>	<b>254,68</b>	<b>285,58</b>
Lomas Coloradas	0,85	1,70	8,93	137,55	174,36	209,39	181,17	226,19	259,54	<b>106,53</b>	<b>134,09</b>	<b>159,29</b>
Santa Bárbara	4,31	18,97	39,28	110,60	157,58	109,93	341,38	394,48	435,88	<b>152,10</b>	<b>190,35</b>	<b>195,03</b>
Tapihue	0,49	0,75	3,88	144,67	188,70	193,11	214,58	256,23	258,82	<b>119,91</b>	<b>148,56</b>	<b>151,94</b>
<b>Sub-Total</b>	<b>21,11</b>	<b>34,63</b>	<b>50,40</b>	<b>172,31</b>	<b>217,55</b>	<b>224,08</b>	<b>248,01</b>	<b>293,57</b>	<b>319,40</b>	<b>147,14</b>	<b>181,92</b>	<b>197,96</b>

En la Figura 17, se puede observar el incremento en volumen total de las 36 parcelas durante los dos años que duró el estudio, con las mediciones de Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012.

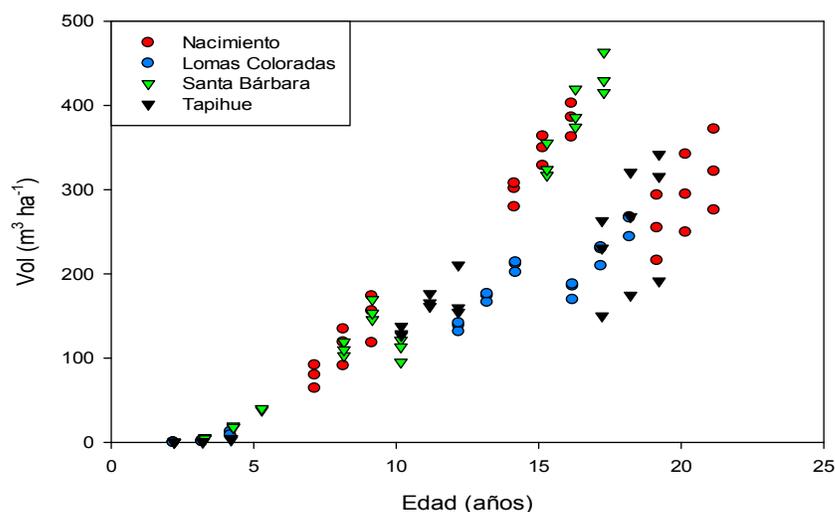


Figura 17. Volumen de todas las parcelas del estudio en Agosto de 2010, Agosto de 2011 y Agosto de 2012.

Como se observó en la biomasa, el volumen tiene un comportamiento similar con la altura y el área basal (Figura 18). En el caso de la altura se observa que frente a una diferencia de 10 metros aproximadamente, los valores del volumen siguen siendo similares, esto se debe a la diferencia entre la densidad de árboles existentes en las clases de edad 7-14 y 14+ años. El volumen tendió a incrementar a medida que aumentó el área basal.

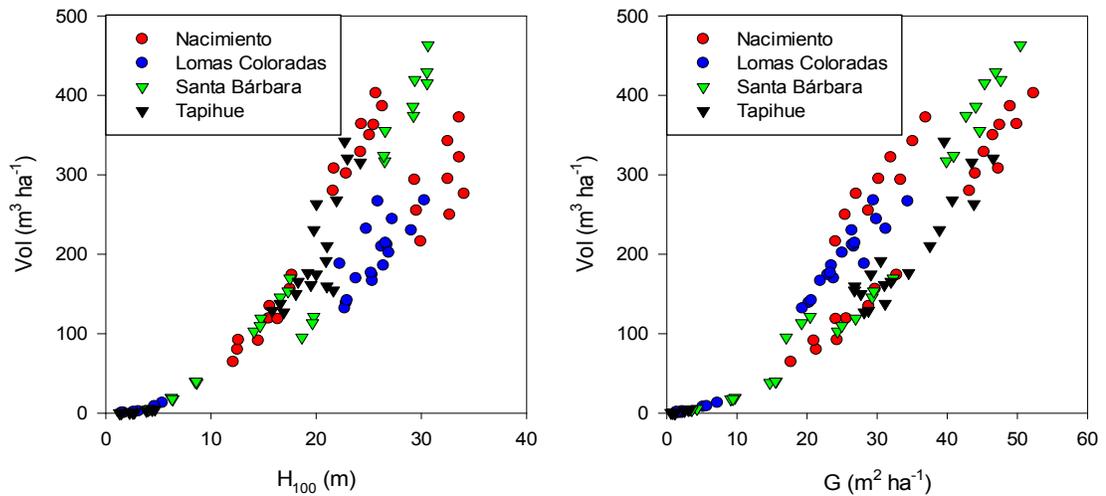


Figura 18. Volumen de todos los sitios y clases de edad comparadas con altura dominante y área basal.

### Eficiencia de crecimiento

Como se ve en la Figura 19, en el período 2010-2011, hubo mayor eficiencia de crecimiento en edades avanzadas. Nacimiento y Lomas Coloradas presentaron los valores máximos de eficiencia. Debido a la ocurrencia de raleos en los sitios Santa Bárbara y Tapihue, en el período 2011-2012, los valores de eficiencia de crecimiento fueron negativos para las clases de edad 7-14 y 14+ años, por lo que los valores no fueron graficados.

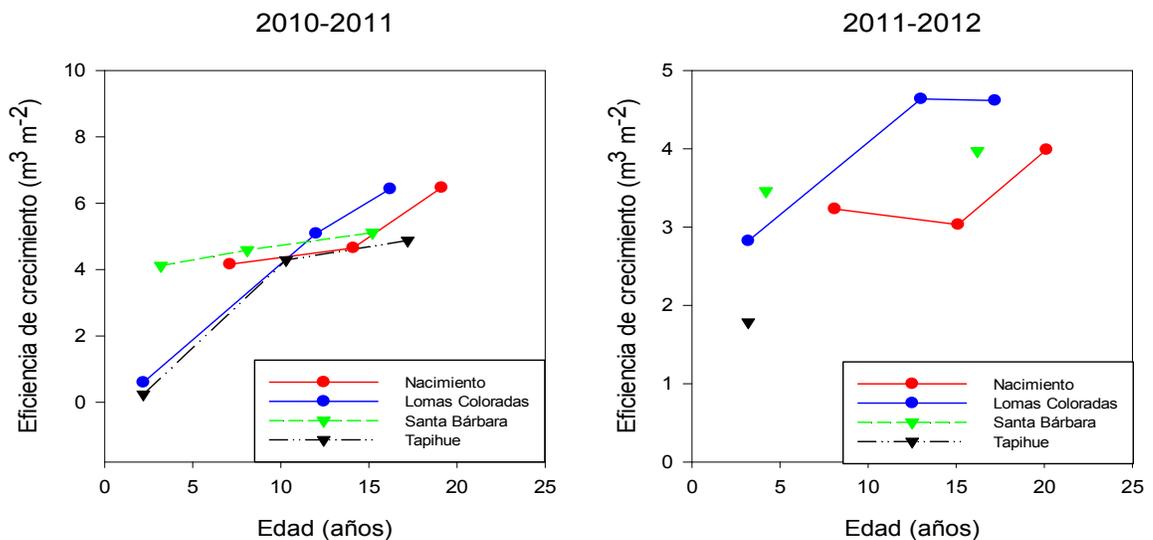


Figura 19. Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico (PAI) en volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ ,  $m^2 m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad.

Respecto a los sitios, como se mencionó anteriormente, no existió mayor diferencia en la eficiencia de crecimiento, entre Nacimiento y Santa Bárbara, en la clase de edad 0-7 años, en el período 2010-2011, de igual manera que no existió mayor diferencia entre Lomas Coloradas y Tapihue. En la clase de edad 7-14 años, los valores de eficiencia fueron similares entre sitios y en la clase de edad 14+ años, los valores de eficiencia fueron similares entre Nacimiento y Lomas Coloradas, mientras que los sitios Santa Bárbara y Tapihue presentaron los menores valores en esta clase de edad (Figura 20). También se observó un aumento en la eficiencia en Lomas Coloradas y Tapihue en la clase de edad 0-7 años con respecto a los otros sitios.

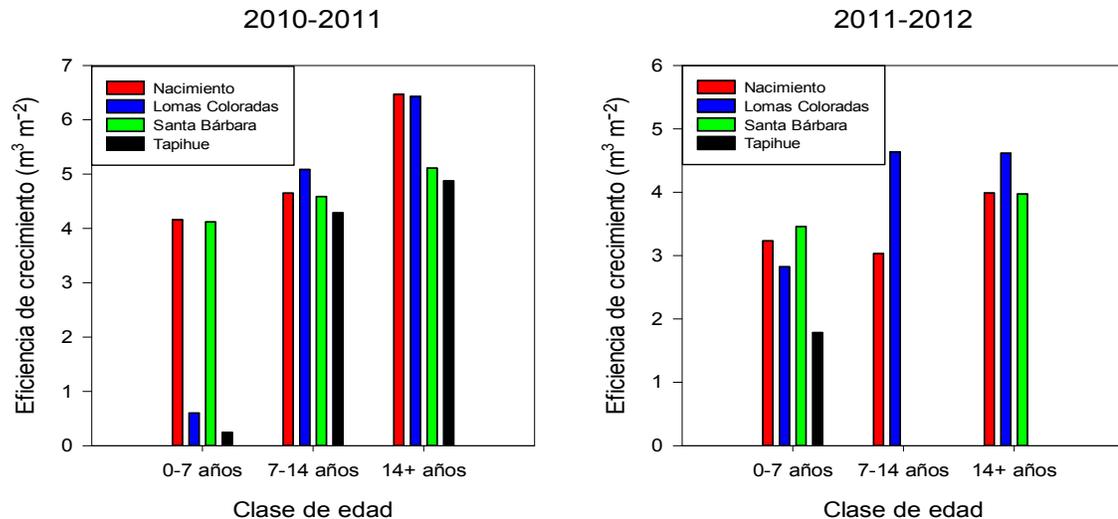


Figura 20. Eficiencia en crecimiento ( $G_E$ ) calculada como el incremento periódico ( $PAI$ ) en volumen ( $m^3$ ) dividido por el índice de área foliar ( $L$ ,  $m^2 m^{-2}$ ) para distintos sitios y distintas clases de edad.

En el período 2011-2012 en general se notó una disminución en la eficiencia de crecimiento en las tres clases de edad, además su comportamiento fue diferente en todas las clases de edad. En la clase de edad 0-7 años, el valor de Lomas Coloradas y Tapihue aumentó bastante, hasta alcanzar  $1,79 m^3 m^{-2}$  en Tapihue y  $2,82 m^3 m^{-2}$  en Lomas Coloradas, mientras que los valores de Nacimiento y Santa Bárbara disminuyeron, hasta alcanzar  $3,23 m^3 m^{-2}$  y  $3,46 m^3 m^{-2}$ , respectivamente. En las clases de edad 7-14 y 14+ años, se presentaron raleos comerciales en Santa Bárbara y Tapihue, lo que implicó una eficiencia de crecimiento negativa por lo que los valores no fueron graficados.

### 4.3 Productividad primaria

#### 4.3.1 Productividad primaria bruta

La productividad primaria bruta fue calculada basada en balance de masa (Giardina y Ryan, 2002; Giardina *et al.*, 2003) de acuerdo a la Ec 9 presentada anteriormente. Los detalles de cálculo de cada componente de GPP se encuentran en los Apéndices 2 y 3.

En el Cuadro 6, se puede observar una reducción de la productividad primaria bruta en general en los sitios Nacimiento, Santa Bárbara y Tapihue entre los períodos 2010-2011 y 2011-2012, debido a raleos comerciales y caída de árboles por viento. El único sitio que

aumentó en GPP fue Lomas Coloradas. Respecto a ANPP, en Nacimiento disminuyó en las tres clases de edad, lo que se podría atribuir a razones climáticas, en Lomas Coloradas aumentó en las clases de edad 0-7 y 7-14 años, mientras que en la clase de edad 14+ años disminuyó por efecto de caída de árboles por viento, en Santa Bárbara se mantuvo con el mismo valor en la clase de edad 0-7 años, mientras que en las clases de edad 7-14 y 14+ años disminuyó por raleos comerciales y en el caso del sitio Tapihue, ANPP aumentó en la clase de edad 0-7 años y disminuyó abruptamente en las clases de edad 7-14 y 14+ años debido a raleos comerciales.

Cuadro 6. Componentes de la productividad primaria bruta por sitio y por clase de edad. Dónde ANPP corresponde a la productividad primaria neta aérea, APR a la respiración aérea de la planta, TBCF al carbono total asimilado bajo el suelo y GPP a la productividad primaria bruta.

Sitio	Clase de edad (años)	2010-2011				2011-2012			
		ANPP	APR	TBCF	GPP	ANPP	APR	TBCF	GPP
		(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )				(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )			
Nacimiento	0-7	15,77	9,00	18,93	43,70	14,59	9,48	16,33	40,40
	7-14	21,46	11,47	18,48	51,41	15,72	10,40	16,27	42,39
	14+	19,37	7,22	18,37	44,96	14,38	6,23	16,29	36,90
	<b>Sub-Total</b>	<b>18,87</b>	<b>9,23</b>	<b>18,59</b>	<b>46,69</b>	<b>14,89</b>	<b>8,71</b>	<b>16,30</b>	<b>39,90</b>
Lomas Coloradas	0-7	7,00	1,09	11,72	19,81	11,08	2,93	15,41	29,42
	7-14	18,73	6,82	18,62	44,17	19,83	6,25	19,00	45,08
	14+	20,59	6,98	16,61	44,18	17,42	6,61	16,41	40,44
	<b>Sub-Total</b>	<b>15,44</b>	<b>4,96</b>	<b>15,65</b>	<b>36,05</b>	<b>16,11</b>	<b>5,26</b>	<b>16,94</b>	<b>38,31</b>
Santa Bárbara	0-7	12,26	4,07	18,86	35,19	12,20	6,15	16,04	34,39
	7-14	18,42	9,51	13,89	41,82	-11,02	3,37	10,15	2,50
	14+	22,66	10,25	19,34	52,25	16,56	9,30	17,16	43,02
	<b>Sub-Total</b>	<b>17,78</b>	<b>7,94</b>	<b>17,36</b>	<b>43,08</b>	<b>5,91</b>	<b>6,27</b>	<b>14,45</b>	<b>26,63</b>
Tapihue	0-7	1,87	1,02	10,37	13,26	3,90	2,03	14,08	20,01
	7-14	18,69	10,01	12,20	40,90	6,17	7,68	11,10	24,95
	14+	20,03	9,11	10,90	40,04	8,05	6,43	9,64	24,12
	<b>Sub-Total</b>	<b>13,53</b>	<b>6,71</b>	<b>11,16</b>	<b>31,40</b>	<b>6,04</b>	<b>5,38</b>	<b>11,61</b>	<b>23,03</b>

En el caso de APR, al comparar los períodos 2010-2011 y 2011-2012, se observa que en la clase de edad 0-7 años, en el sitio Nacimiento, aumentó y en las clases de edad 7-14 y 14+ años disminuyó, esto mismo se presentó en los sitios Lomas Coloradas, Santa Bárbara y Tapihue, esta situación llevó a concluir que el factor edad juega un papel importante en la respiración aérea de la planta. Comparando los períodos 2010-2011 y 2011-2012, se encontró una disminución de TBCF en todas las clases de edad del sitio Nacimiento, un aumento en las clases de edad 0-7 y 7-14 años del sitio Lomas Coloradas y un valor similar en la clase de edad 14+ años. En los sitios Santa Bárbara y Tapihue, se observa una disminución de TBCF en las clases de edad 7-14 y 14+ años debido a los raleos mencionados anteriormente, una disminución en la clase de edad 0-7 años en el sitio Santa Bárbara y un aumento en la clase de edad 0-7 años en el sitio Tapihue.

Durante el período 2010-2011 se produjo un aumento en los valores de GPP a medida que aumentó la clase de edad, es importante mencionar que las clases de edad son independientes, solamente se puede observar una tendencia general con el aumento de la edad.

Se realizó una regresión lineal y un análisis de varianza, para cada componente, para ver cómo están relacionados con GPP.

El componente ANPP tuvo una relación significativa con GPP para el período 2010-2011 ( $r^2=0,88$ ,  $P<0,001$ ) y para el período 2011-2012 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ ) (Figura 21).

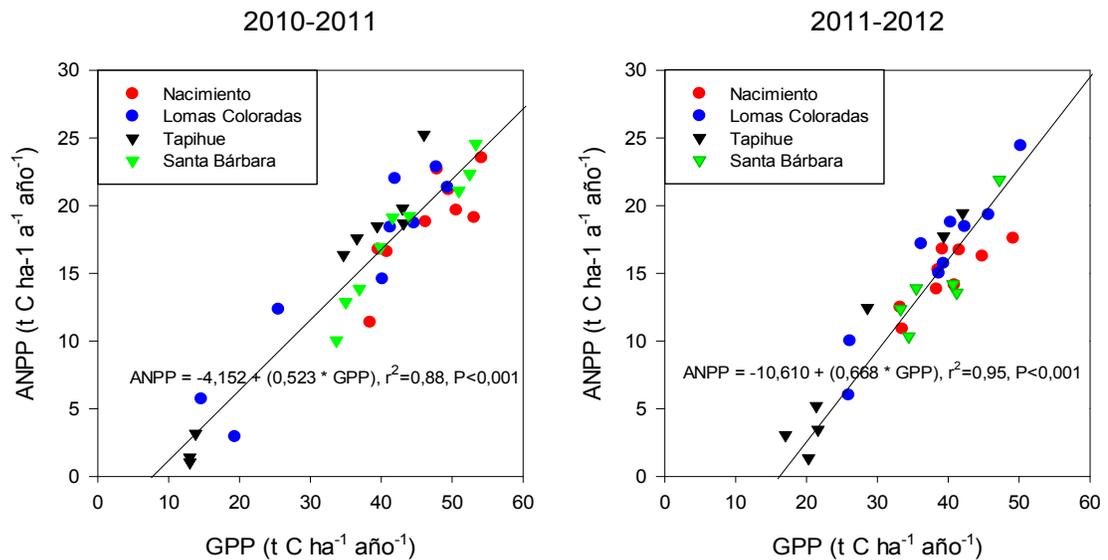


Figura 21. Relación entre ANPP y GPP para el periodo 2010-2011 y el periodo 2011-2012.

Como se observa en la Figura 22 el componente APR presentó una relación significativa con GPP en ambos períodos.

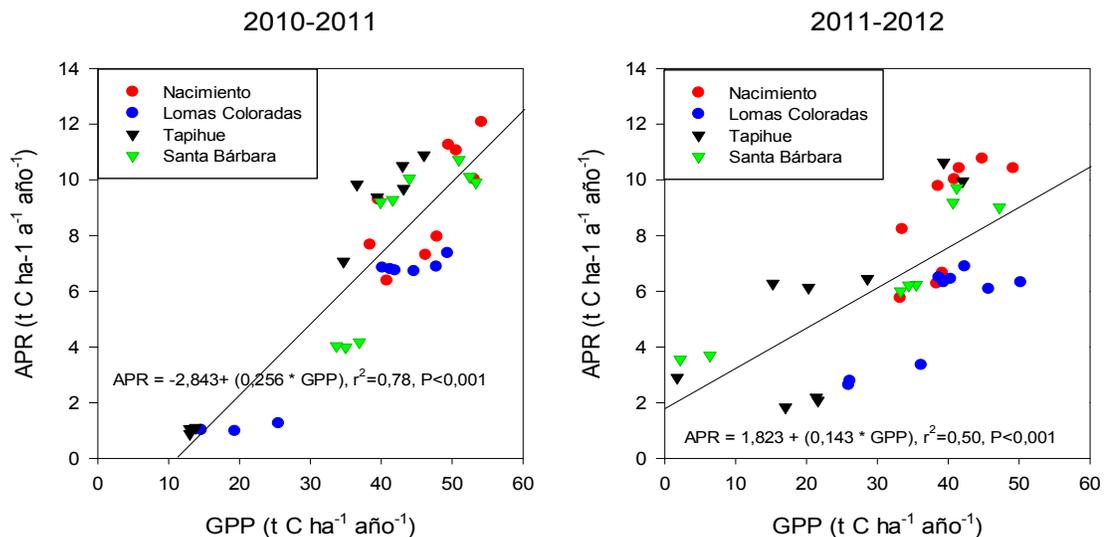


Figura 22. Relación entre APR y GPP para el periodo 2010-2011 y el periodo 2011-2012.

Finalmente TBCF (Figura 23) también presentó relaciones significativas con GPP para el período 2010-2011 ( $r^2=0,43$ ,  $P<0,001$ ) y para el período 2011-2012 ( $r^2=0,61$ ,  $P<0,001$ ).

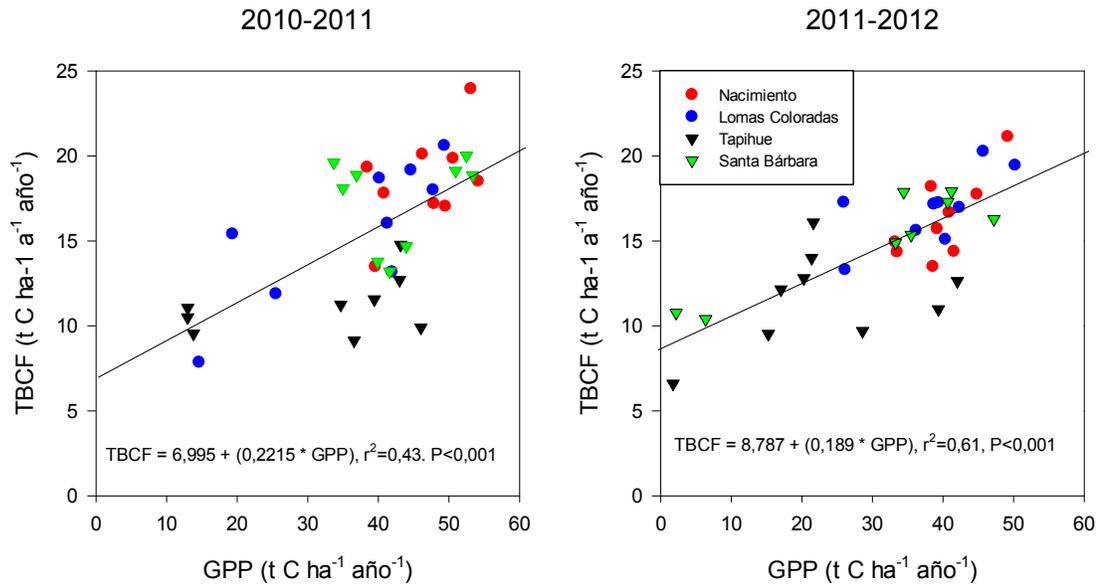


Figura 23. Relación entre TBCF y GPP para el período 2010-2011 y el período 2011-2012.

A los valores de la productividad primaria bruta se les realizó un análisis de varianza para observar diferencias entre los sitios de estudio y las clases de edad. Se encontraron diferencias significativas entre sitios para el período 2010-2011 ( $F_{3,32}=3,76$ ,  $P<0,005$ ) y el período 2011-2012 ( $F_{3,32}=4,28$ ,  $P<0,05$ ), siendo los sitios Nacimiento y Tapihue, los que presentaron mayores diferencias en ambos períodos (Figura 24).

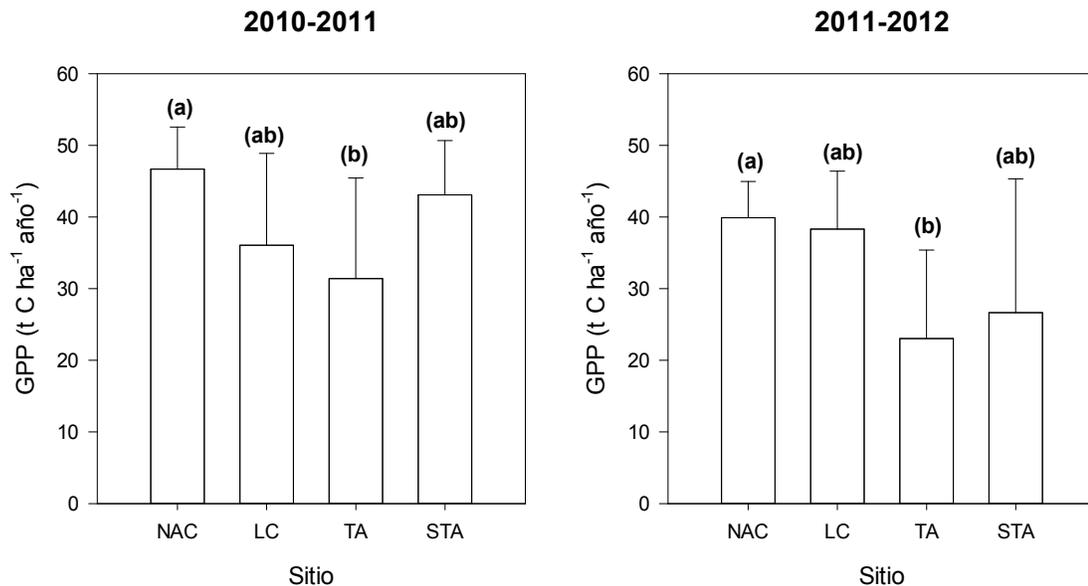


Figura 24. GPP para los cuatro sitios en estudio en ambos períodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

También se buscaron diferencias entre clases de edad, encontrándose diferencias significativas solamente en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=14,69$ ,  $P<0,001$ ), siendo la clase de edad 0-7 años la que presentó diferencias con las clases de edad 7-14 y 14+ años, mientras que en el período 2011-2012 no se encontraron diferencias significativas ( $F_{2,33}=0,89$ ,  $P=0,42$ ) (Figura 25), cabe recordar que las clases de edad son independientes por lo que este resultado se debe tomar como una tendencia general en el comportamiento de GPP respecto a la edad.

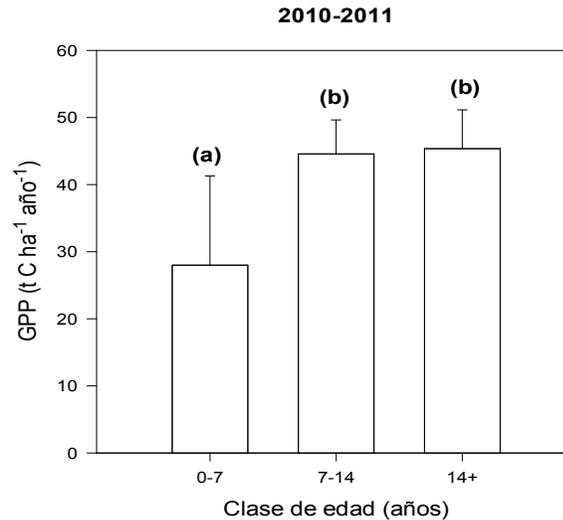


Figura 25. GPP para las tres clases de edad en estudio en el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

### 4.3.2 Productividad primaria neta

La productividad primaria neta (NPP) se calculó mediante la Ec 13. Se realizó una regresión lineal entre GPP y NPP y se encontraron relaciones significativas en ambos períodos (Figura 26).

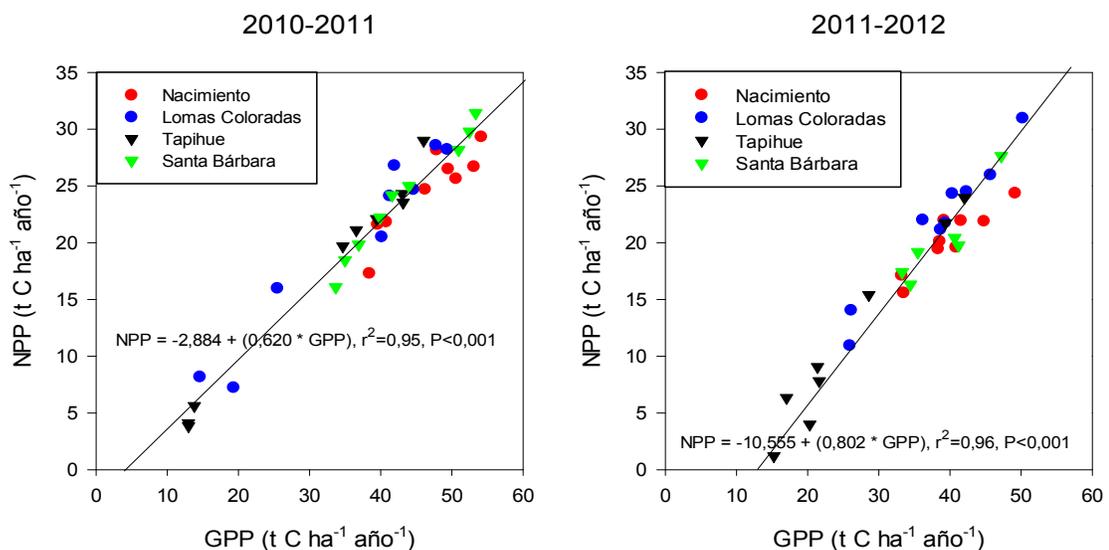


Figura 26. Relación entre NPP y GPP para el período 2010-2011 y el período 2011-2012.

Además se realizó un análisis de varianza para buscar diferencias significativas entre sitios y entre clases de edad.

Como se puede apreciar en la Figura 27, para los sitios, se encontró diferencias significativas en el período 2010-2011 ( $F_{3,32}=2,96$ ,  $P<0,05$ ) y en el período 2011-2012 ( $F_{3,32}=4,41$ ,  $P<0,05$ ), siendo los sitios Nacimiento y Tapihue los con mayor diferencia en el período 2010-2011 y los sitios Lomas Coloradas y Tapihue en el período 2011-2012.

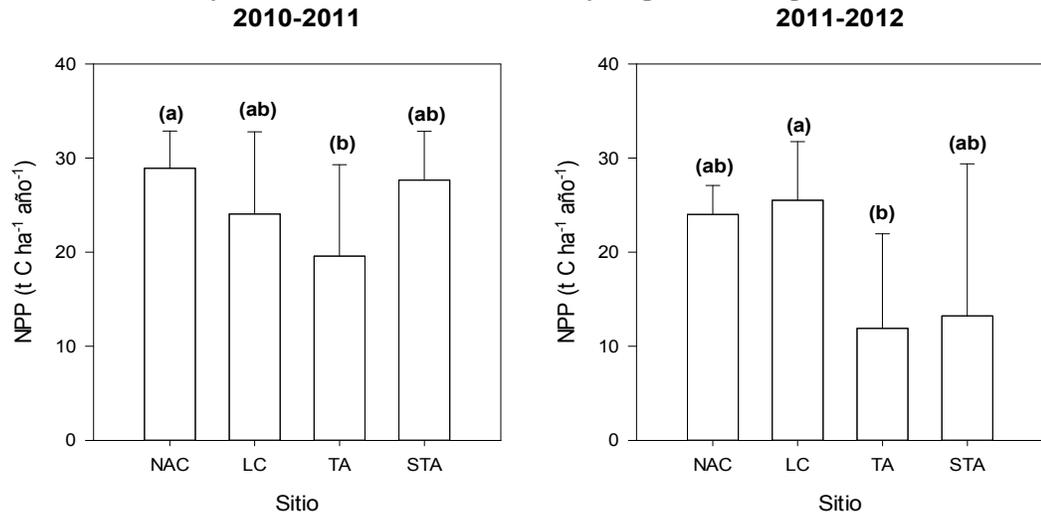


Figura 27. NPP para los cuatro sitios en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

En el caso de las clases de edad, como se muestra en la Figura 28, se encontraron diferencias significativas para NPP en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=17,11$ ,  $P<0,001$ ), mientras que en el período 2011-2012 no se encontraron diferencias significativas ( $F_{2,33}=1,27$ ,  $P=0,29$ ).

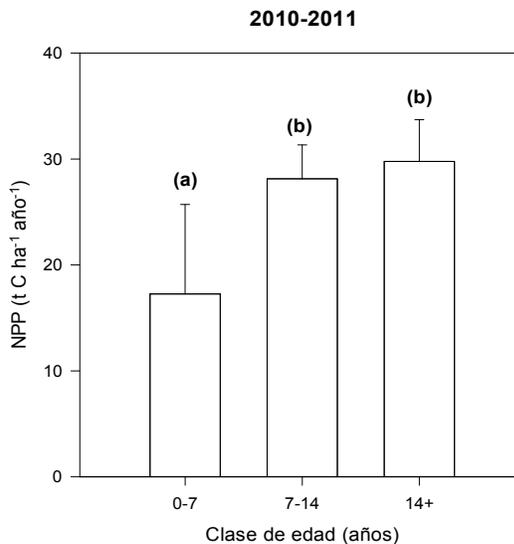


Figura 28. NPP para las tres clases de edad en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

En el período 2010-2011 ( $F_{3,32}=0,98$ ,  $P=0,42$ ) los sitios Lomas Coloradas y Santa Bárbara obtuvieron el mayor CUE con 0,55, Nacimiento con 0,53 y Tapihue con 0,5, con un promedio de 0,53. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas para este período (Figura 29). Para el período 2011-2012 ( $F_{3,28}=49$ ,  $P<0,05$ ) se obtuvieron valores de 0,50 para Nacimiento, 0,56 para Lomas Coloradas, 0,39 para Tapihue y 0,52 para Santa Bárbara. Se encontraron diferencias significativas entre Nacimiento y Tapihue, sin embargo este resultado está distorsionado por la ocurrencia de raleos en Santa Bárbara y Tapihue en las clases de edad 7-14 y 14+ años.

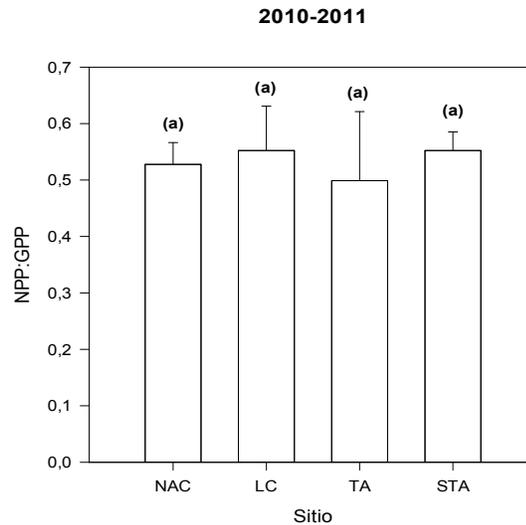


Figura 29. CUE (NPP:GPP) para los cuatro sitios en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

En la clase de edad, se encontraron diferencias significativas en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=10,67$ ,  $P<0,001$ ), entre las clases de edad 0-7 años y las otras dos (Figura 30). En el período 2011-2012 ( $F_{2,29}=2,6$ ,  $P=0,13$ ), no se encontraron diferencias.

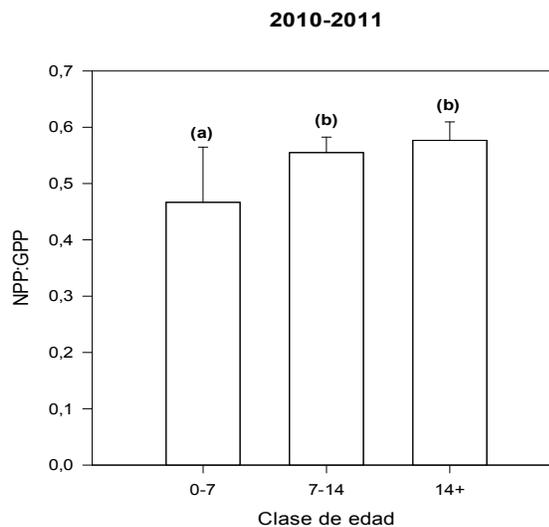


Figura 30. CUE (NPP:GPP) para las tres clases de edad en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

### 4.3.3 Partición de la productividad primaria bruta en sus componentes

Se realizó la partición de la productividad primaria bruta en sus componentes para cuantificar el aporte de cada uno al total. Como se puede observar en el Cuadro 7, en ambos períodos TBCF fue el componente que mayor aporte tuvo, con una fluctuación del 40 al 46% en el período 2010-2011 y 42 a 46% en el período 2011-2012, mientras que APR tuvo el menor aporte con una fluctuación entre el 12 al 20% en el período 2010-2011 y del 13 al 20% en el período 2011-2012

Cuadro 7. Razones entre GPP y todos sus componentes en todos los sitios y clases de edad, para ambos períodos.

Sitio	Clase de edad (años)	2010-2011			2011-2012		
		ANPP:GPP	APR:GPP	TBCF:GPP	ANPP:GPP	APR:GPP	TBCF:GPP
Nacimiento	0-7	0,36	0,21	0,43	0,36	0,24	0,40
	7-14	0,42	0,22	0,36	0,36	0,24	0,40
	14+	0,43	0,16	0,41	0,39	0,17	0,44
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,40</b>	<b>0,20</b>	<b>0,40</b>	<b>0,37</b>	<b>0,22</b>	<b>0,42</b>
Lomas Coloradas	0-7	0,35	0,06	0,59	0,36	0,10	0,54
	7-14	0,42	0,16	0,42	0,44	0,14	0,42
	14+	0,47	0,16	0,37	0,43	0,16	0,41
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,41</b>	<b>0,12</b>	<b>0,46</b>	<b>0,41</b>	<b>0,13</b>	<b>0,46</b>
Santa Bárbara	0-7	0,35	0,12	0,54	0,35	0,18	0,47
	7-14	0,44	0,23	0,33	-	-	-
	14+	0,43	0,20	0,37	0,38	0,22	0,40
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,41</b>	<b>0,18</b>	<b>0,41</b>	<b>0,37</b>	<b>0,20</b>	<b>0,43</b>
Tapihue	0-7	0,14	0,08	0,78	0,19	0,10	0,70
	7-14	0,46	0,25	0,30	0,26	0,29	0,46
	14+	0,50	0,23	0,28	0,45	0,23	0,32
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,36</b>	<b>0,18</b>	<b>0,45</b>	<b>0,30</b>	<b>0,21</b>	<b>0,49</b>

Se puede observar que existe una disminución en la razón TBCF:GPP del período 2010-2011 al período 2011-2012 y un aumento en las razones APR:GPP y TBCF:GPP del período 2010-2011 al período 2011-2012.

Se realizó un análisis de varianza para indagar si se presentaban diferencias significativas, de las mencionadas razones, entre los sitios y las clases de edad que se presentan en el estudio.

En relación al sitio, se encontraron diferencias significativas solamente en la razón APR:GPP ( $F_{3,32}=2,91$ ,  $P=0,05$ ) para el período 2010-2011 (Figura 31). En el mismo período las razones ANPP:GPP ( $F_{3,32}=0,37$ ,  $P=0,78$ ) y TBCF:GPP ( $F_{3,32}=0,33$ ,  $P=0,80$ ) no presentaron diferencias significativas. En el período 2011-2012, no existieron diferencias significativas entre los sitios para las razones ANPP:GPP ( $F_{3,27}=2,46$ ,  $P=0,08$ ), APR:GPP ( $F_{3,29}=2,60$ ,  $P=0,07$ ) y TBCF:GPP ( $F_{3,28}=1,80$ ,  $P=0,17$ ).

Con los resultados presentados anteriormente se puede observar que el sitio no influye en las razones ANPP:GPP y TBCF:GPP, siendo la razón APR:GPP la única que presenta diferencias significativas, principalmente entre los sitios Nacimiento y Lomas Coloradas. Sin embargo en el período 2011-2012, no existen tales diferencias.

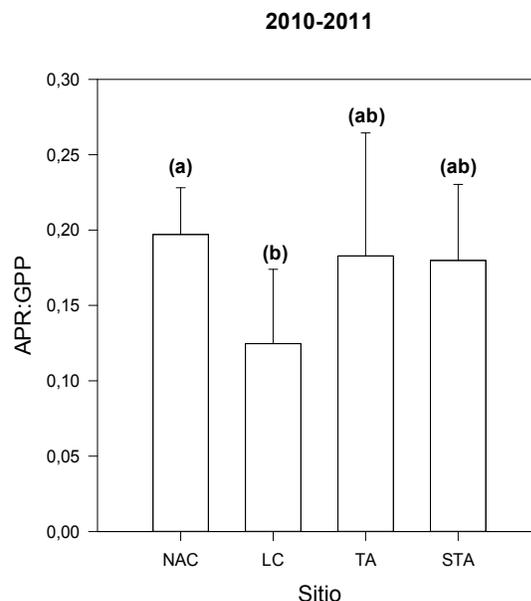


Figura 31. Razón APR:GPP para los cuatro sitios en estudio en el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

La clase de edad presentó diferencias significativas para la razón ANPP:GPP, en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=12,92$ ,  $P<0,001$ ), como se puede apreciar en la Figura 32 y en el período 2011-2012 ( $F_{2,28}=2,71$ ,  $P=0,08$ ) no presentó diferencias significativas.

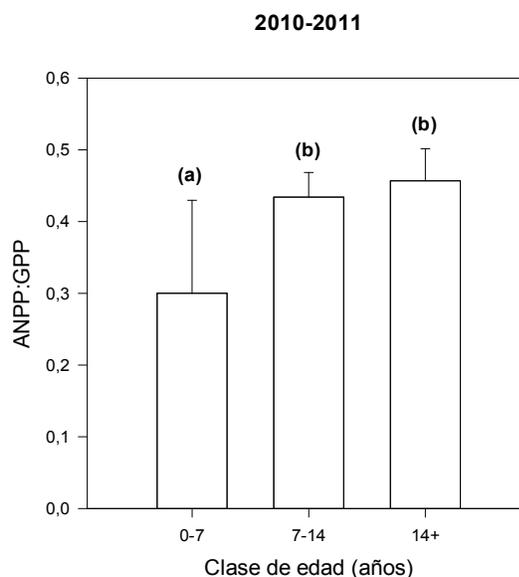


Figura 32. Razón ANPP:GPP en las tres clases de edad comprendidas en el estudio para el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

Para la razón APR:GPP, existieron diferencias significativas en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=15,01$ ,  $P<0,001$ ), y en el período 2011-2012 ( $F_{2,30}=5,02$ ,  $P<0,05$ ) (Figura 33).

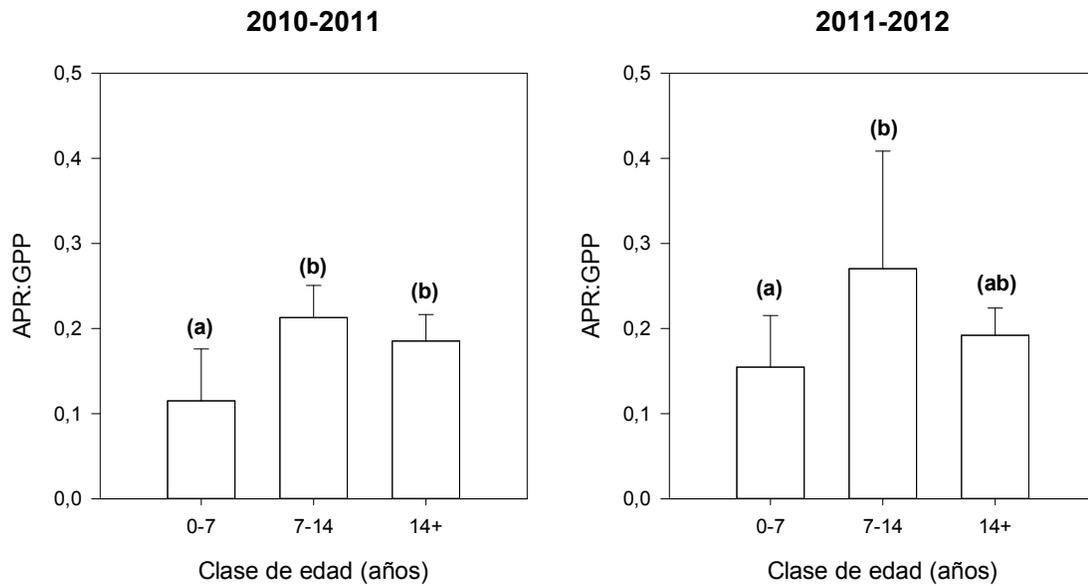


Figura 33. Razón APR:GPP en las tres clases de edad comprendidas en el estudio para ambos períodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

En el caso de la razón TBCF:GPP, se encontraron diferencias significativas en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=18,91$ ,  $P<0,001$ ) y en el período 2011-2012 ( $F_{2,29}=4,32$ ,  $P<0,05$ ), como se puede observar en la Figura 34.

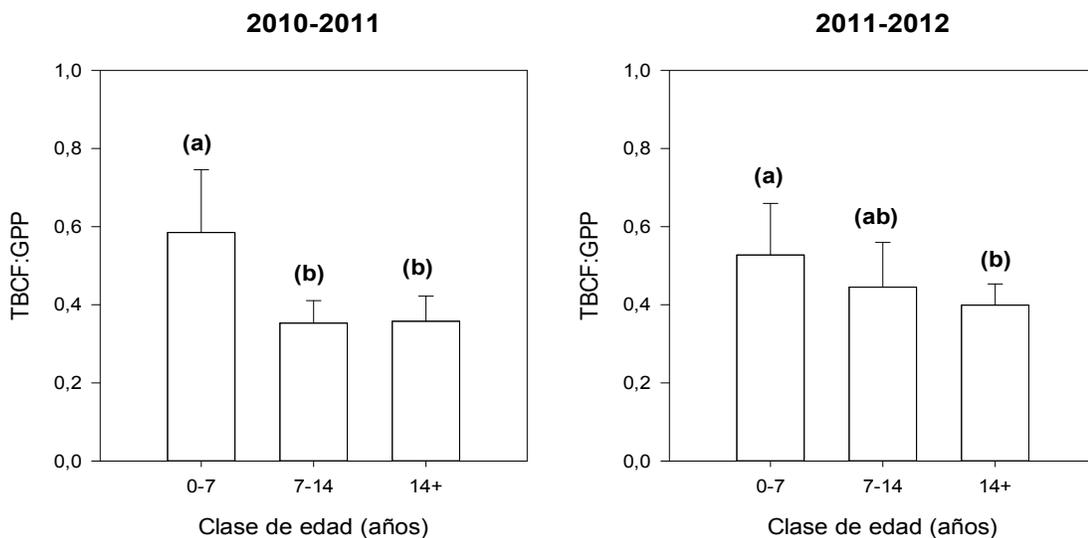


Figura 34. Razón TBCF:GPP en las tres clases de edad comprendidas en el estudio para el período 2010-2011. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

Cabe destacar que, en el período 2010-2011, las 3 razones presentaron diferencias significativas entre la clase de edad 0-7 años y las otras dos clases de edad, siendo estas últimas muy similares entre sí, ANPP:GPP ( $P=0,78$ ), APR:GPP ( $P=0,30$ ) y TBCF:GPP ( $P=0,99$ ). En el período 2011-2012, no se encontraron diferencias significativas en la razón ANPP:GPP. En la razón APR:GPP, las diferencias significativas se encontraron solamente entre las clases de edad 0-7 y 7-14 años ( $P=0,01$ ), mientras que no existieron diferencias entre las clases de edad 0-7 y 14+ años ( $P=0,56$ ) y las clases de edad 7-14 y 14+ años ( $P=0,11$ ). Para la razón TBCF:GPP, las diferencias significativas se encontraron entre las clases de edad 0-7 y 14+ años ( $P=0,02$ ), mientras que entre las clases de edad 0-7 y 7-14 años ( $P=0,20$ ) y las clases de edad 7-14 y 14+ años ( $P=0,61$ ) no se encontraron diferencias significativas. Las clases de edad son independientes entre sí, por lo que los resultados presentados sólo muestran una tendencia en el desarrollo de la especie. Esto demuestra que el balance de carbono es similar en edades superiores a los 7 años en rodales que no han sido intervenidos con raleos comerciales.

#### **4.4 Modelación de Productividad**

Se utilizó el modelo de procesos 3-PG para estimar algunas variables de estado de los rodales ( $DAP_g$ , área basal, altura dominante y volumen). En el Apéndice 4 se encuentran los parámetros utilizados en el modelo.

Se realizó una regresión lineal para cada variable entre los valores estimados y observados, resultado que fue graficado. Además se calculó el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash y Sutcliffe (1970), valores que se pueden encontrar en el Cuadro 8.

La regresión lineal mostró un buen ajuste con valores de  $r^2$  mayores a 0,80 entre las variables estimadas y observadas. Las variables  $DAP_g$  y área basal presentaron los valores más altos de  $r^2$ .

En general, la modelación de las parcelas con 3-PG, tuvo una eficiencia superior al 70%, resaltando el sitio Santa Bárbara que presentó una eficiencia superior al 80% en la mayoría de parcelas. En el sitio Nacimiento se encontró una distorsión en la muestra, en la clase de edad 14+ años, puesto que los valores de la modelación tuvieron una eficiencia positiva solamente en la parcela 4, mientras que las parcelas 5 y 6 fueron subestimada y sobreestimada, respectivamente. Esta situación se debe a la notoria diferencia entre los valores de las variables de estado al comienzo y final del período de medición. Esta misma situación se presentó en la clase de edad 0-7 años en el sitio Lomas Coloradas.

Cuadro 8. Valores del coeficiente de eficiencia de modelación de Nash y Sutcliffe (1970), para las variables DAP<sub>g</sub>, área basal, altura dominante y volumen, para todas las parcelas que formaron parte del estudio.

Sitio	Edad	Parcela	Coeficiente de eficiencia			
			DAP <sub>g</sub>	G	H <sub>100</sub>	Vol
Nacimiento	0-7 Años	7	0,85	0,86	0,89	0,98
		8	0,77	0,79	0,80	0,99
		9	0,68	0,72	0,95	0,93
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,77</b>	<b>0,79</b>	<b>0,88</b>	<b>0,97</b>
	7-14 Años	10	0,65	0,64	-2,58	0,32
		11	0,93	0,89	0,69	0,92
		12	0,90	0,90	0,69	0,93
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,83</b>	<b>0,81</b>	<b>-0,40</b>	<b>0,72</b>
	14+ Años	4	0,96	0,96	0,64	0,86
5		-41,56	-37,57	-2,01	0,28	
6		-29,67	-32,70	0,19	-17,97	
	<b>Sub-Total</b>	<b>-23,42</b>	<b>-23,10</b>	<b>-0,39</b>	<b>-5,61</b>	
Lomas Coloradas	0-7 Años	43	-1,72	-2,54	-0,83	-2,08
		44	0,14	0,25	0,74	0,47
		45	-1,14	-1,51	-0,66	-1,13
		<b>Sub-Total</b>	<b>-0,91</b>	<b>-1,26</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,91</b>
	7-14 Años	40	0,74	0,75	0,50	0,86
		41	0,33	0,31	0,79	0,64
		42	0,81	0,81	0,41	0,84
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,63</b>	<b>0,62</b>	<b>0,57</b>	<b>0,78</b>
	14+ Años	37	0,75	0,75	0,58	0,69
38		0,48	0,49	0,67	0,70	
39		0,76	0,76	0,63	0,82	
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,66</b>	<b>0,67</b>	<b>0,63</b>	<b>0,74</b>	
Santa Bárbara	0-7 Años	16	0,91	0,90	0,91	0,92
		17	0,89	0,91	0,95	0,93
		18	0,91	0,90	0,88	0,93
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>
	7-14 Años	22	0,58	0,56	0,70	0,53
		23	0,96	0,95	0,91	0,90
		24	0,89	0,96	0,85	0,92
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>	<b>0,82</b>	<b>0,78</b>
	14+ Años	19	0,90	0,90	0,58	0,78
20		0,89	0,89	0,61	0,90	
21		0,77	0,83	0,58	0,82	
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,86</b>	<b>0,87</b>	<b>0,59</b>	<b>0,84</b>	
Tapihue	0-7 Años	31	-0,01	0,15	0,30	0,62
		32	0,57	0,68	0,83	0,76
		33	0,60	0,68	0,85	0,81
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,39</b>	<b>0,50</b>	<b>0,66</b>	<b>0,73</b>
	7-14 Años	25	0,74	0,53	0,55	0,73
		26	0,90	0,84	0,66	0,88
		27	0,65	0,67	0,71	0,84
		<b>Sub-Total</b>	<b>0,76</b>	<b>0,68</b>	<b>0,64</b>	<b>0,82</b>
	14+ Años	28	0,83	0,83	0,64	0,92
29		0,72	0,88	0,58	0,82	
30		0,74	0,53	0,24	0,81	
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,76</b>	<b>0,75</b>	<b>0,49</b>	<b>0,85</b>	

#### 4.4.1 Nacimiento

En la clase de edad 0-7 años, Nacimiento tuvo una relación significativa y un alto valor del coeficiente de eficiencia (NS) con respecto al  $DAP_g$  en la parcela 7 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,85$ ), parcela 8 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,77$ ) y parcela 9 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,68$ ). El área basal también tuvo una relación significativa y un alto valor del coeficiente de eficiencia para la parcela 7 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,86$ ), parcela 8 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,79$ ) y para la parcela 9 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,72$ ). La altura presentó una eficiencia superior al 80% en la parcela 7 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,89$ ), la parcela 8 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,80$ ) y la parcela 9 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,95$ ) (Figura 35).

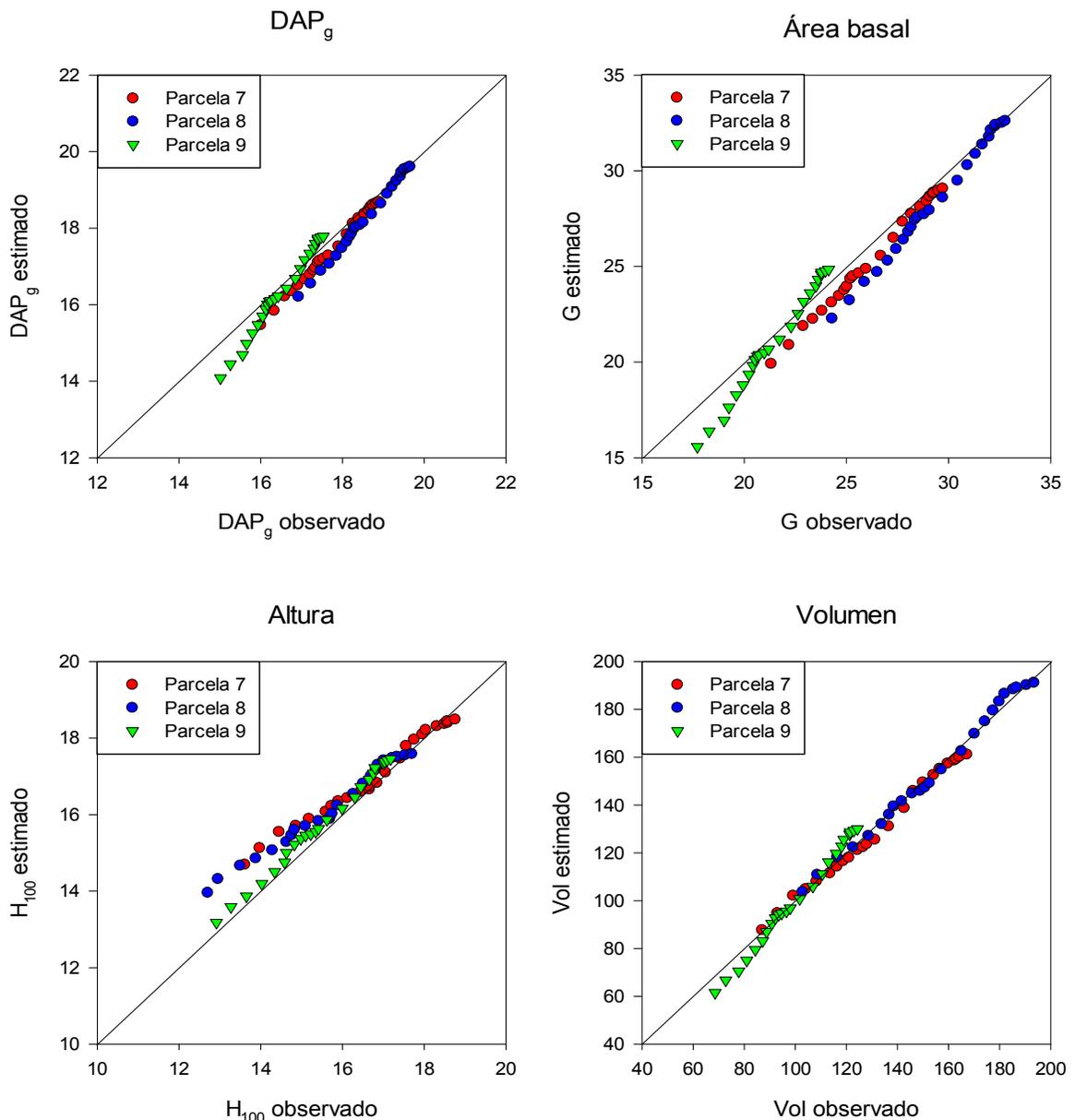


Figura 35. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Nacimiento.

En el caso del volumen, la parcela 7 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,98$ ), la parcela 8 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,99$ ) y la parcela 9 ( $r^2=0,94$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,93$ ), mostraron una relación significativa y valores superiores al 90% en el coeficiente de eficiencia. Estos resultados indicaron que el modelo se ajustó de manera correcta para el  $DAP_g$  y el área basal en las parcelas 7 y 8 con valores superiores a 75%, mientras que en la parcela 9 con valores sobre 65%. El volumen tuvo valores de eficiencia superiores a 95% en las parcelas 7 y 8 y sobre el 90% en la parcela 9. Además la altura presentó valores sobre el 80% en las tres parcelas, por lo que el modelo tuvo un buen ajuste para Nacimiento en la clase de edad 0-7 años, con todos los valores de las variables superiores al 65% de eficiencia.

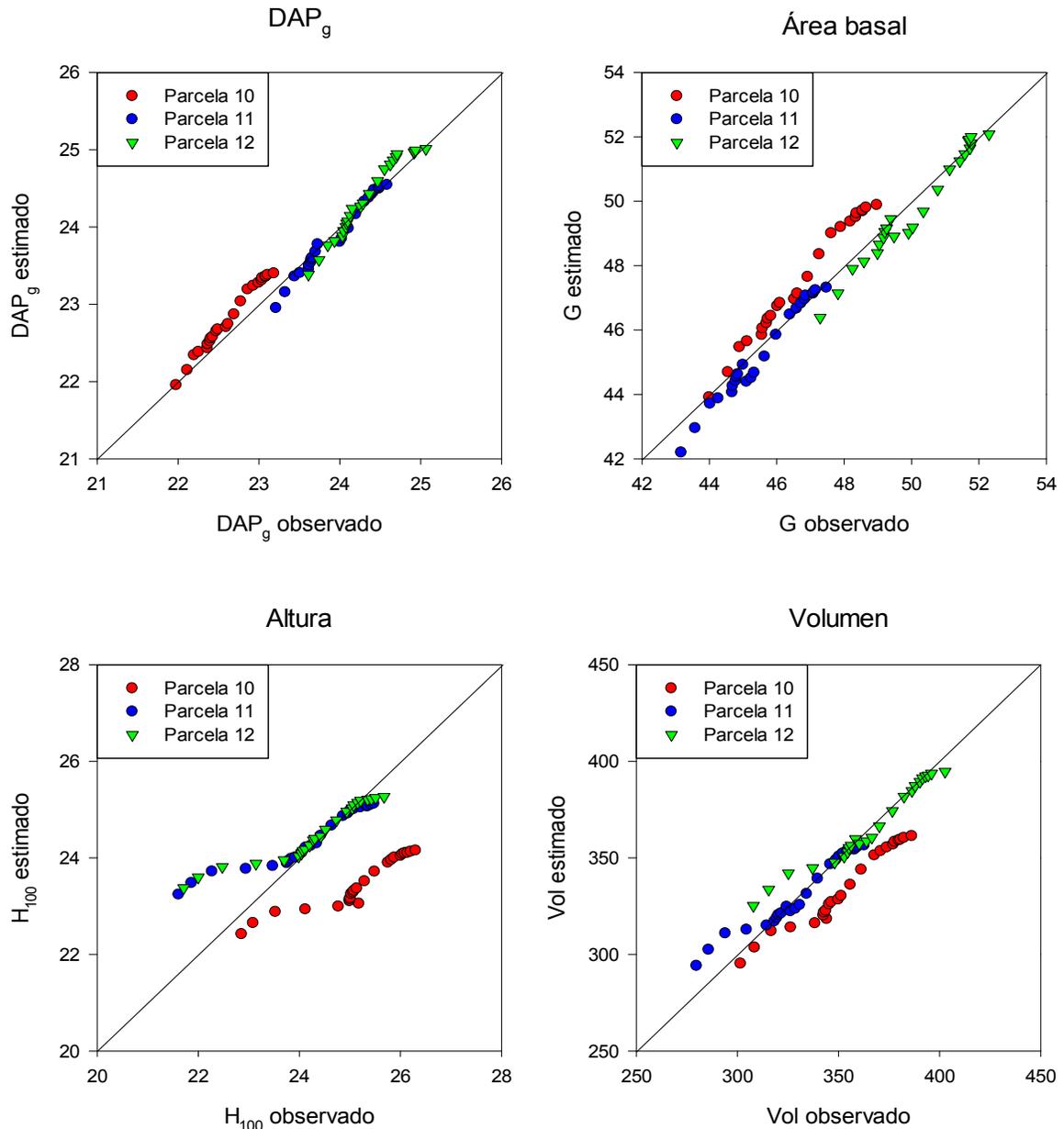


Figura 36. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Nacimiento.

La clase de edad 7-14 años presentó un comportamiento similar a la clase de edad 0-7 años, con significancia entre los valores estimados y observados y un alto valor en el coeficiente de eficiencia, para el  $DAP_g$ , área basal y volumen, mientras que para la altura el coeficiente de eficiencia fue inferior, alcanzando un valor negativo de -2,58 en la parcela 10 (Figura 36).

En el caso del  $DAP_g$  las parcelas 10 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,65$ ), 11 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,93$ ) y 12 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ) presentaron un coeficiente de eficiencia mayor al 60%. Con respecto a G, las parcelas 10 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,64$ ), 11 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,89$ ) y 12 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ), tuvieron valores de eficiencia similares al  $DAP_g$ . Con respecto a la altura, el modelo subestimó el valor en la parcela 10 ( $r^2=0,87$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-2,58$ ), mientras que en la parcela 11 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,69$ ) y 12 ( $r^2=0,90$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,69$ ) los valores de eficiencia superaron el 65%. En el caso del volumen, las parcelas 11 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,92$ ) y 12 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,93$ ) tuvieron una eficiencia superior al 90%, mientras que la parcela 10 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,32$ ) tuvo un valor bastante inferior en comparación a las otras dos parcelas.

Para la clase de edad 14+ años, en relación al  $DAP_g$ , la parcela 4 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,96$ ) fue la única que presentó un valor de NS positivo, mientras que las parcelas 5 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-41,56$ ) y 6 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-29,67$ ), presentaron valores de NS negativos. El área basal se comportó de manera similar el  $DAP_g$  entregando un valor del coeficiente de eficiencia superior al 90% y una relación significativa entre los valores observados y estimados para la parcela 4 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,96$ ), en cambio, la parcela 5 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-37,57$ ) y la parcela 6 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-32,70$ ) tuvieron valores de eficiencia negativos. La altura tuvo un valor positivo de NS en la parcela 4 ( $r^2=0,82$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,64$ ) y en la parcela 6 ( $r^2=0,80$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,19$ ) mientras que en la parcela 5 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-2,01$ ) el valor fue sobreestimado. El volumen presentó valores positivos en las parcelas 4 ( $r^2=0,92$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,86$ ) y 5 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,28$ ), la parcela 6 ( $r^2=0,94$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-17,97$ ) fue sobreestimada. Esta distorsión se produce por la notoria diferencia, entre las parcelas, en los valores iniciales y finales de las variables observadas (Figura 37).

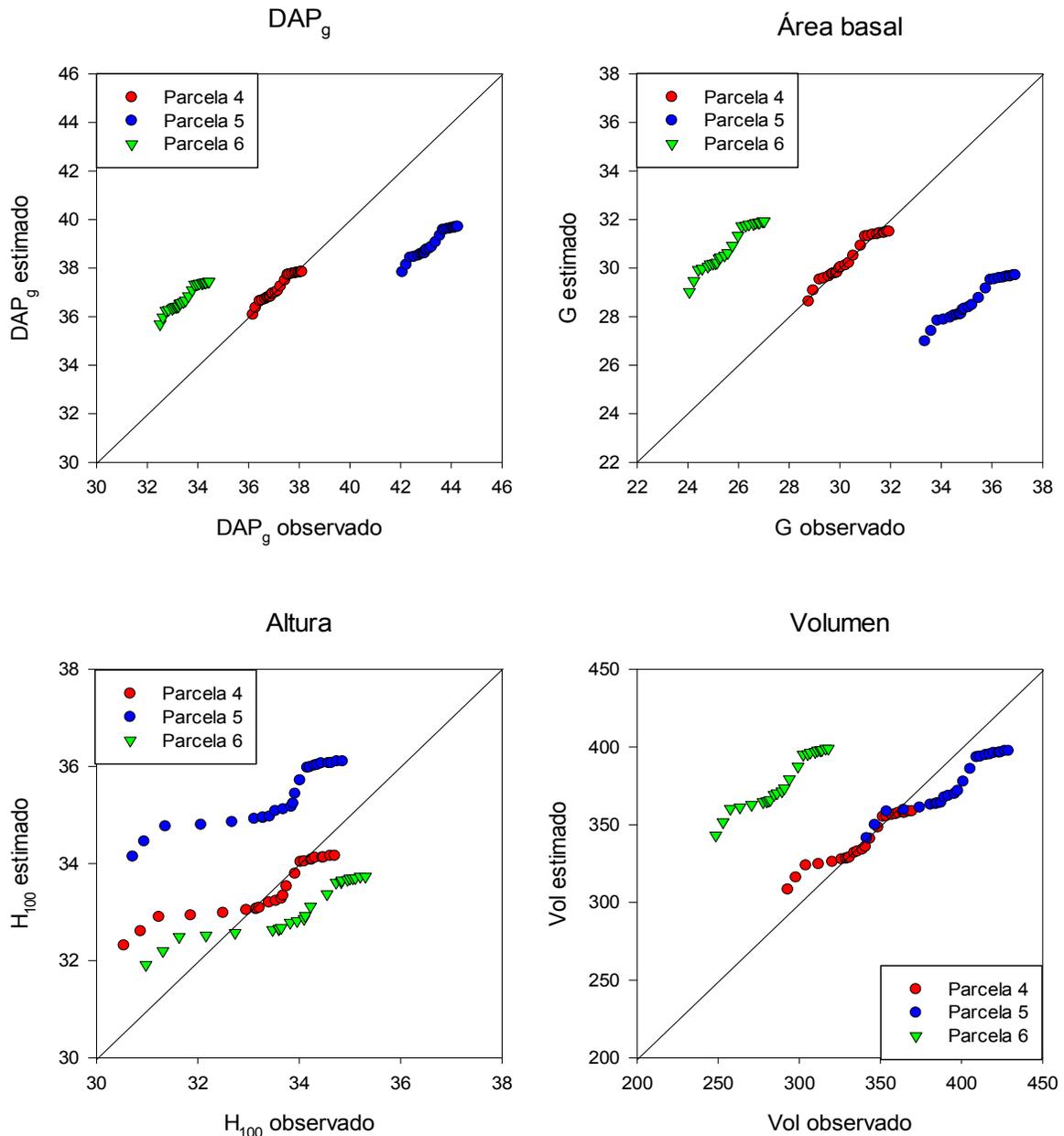


Figura 37. Comparación entre valores observados y valores estimados para DAP<sub>g</sub> (cm), H<sub>100</sub> (m), G (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y Volumen (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) en la clase de edad 14+ años en el sitio Nacimiento.

#### 4.4.2 Lomas Coloradas

En Lomas Coloradas se produjo una distorsión en la modelación en la clase de edad 0-7 años, de igual manera que en la clase de edad 14+ años del sitio Nacimiento, razón por la cual dos parcelas tuvieron valores de NS negativos en las cuatro variables modeladas.

En la clase de edad 0-7 años, la mayoría de los valores de eficiencia fueron negativos. Para el DAP<sub>g</sub> sólo se encontró un valor positivo en la parcela 44 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,14$ ), en las otras parcelas fue negativo. En el área basal ocurrió una situación similar, la parcela

44 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,25$ ) fue la única con un valor positivo. Los valores para la altura fueron negativos excepto en la parcela 44 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,74$ ). Para el volumen, solamente la parcela 44 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,47$ ) presentó un valor positivo de eficiencia, lo que se puede apreciar en la Figura 38.

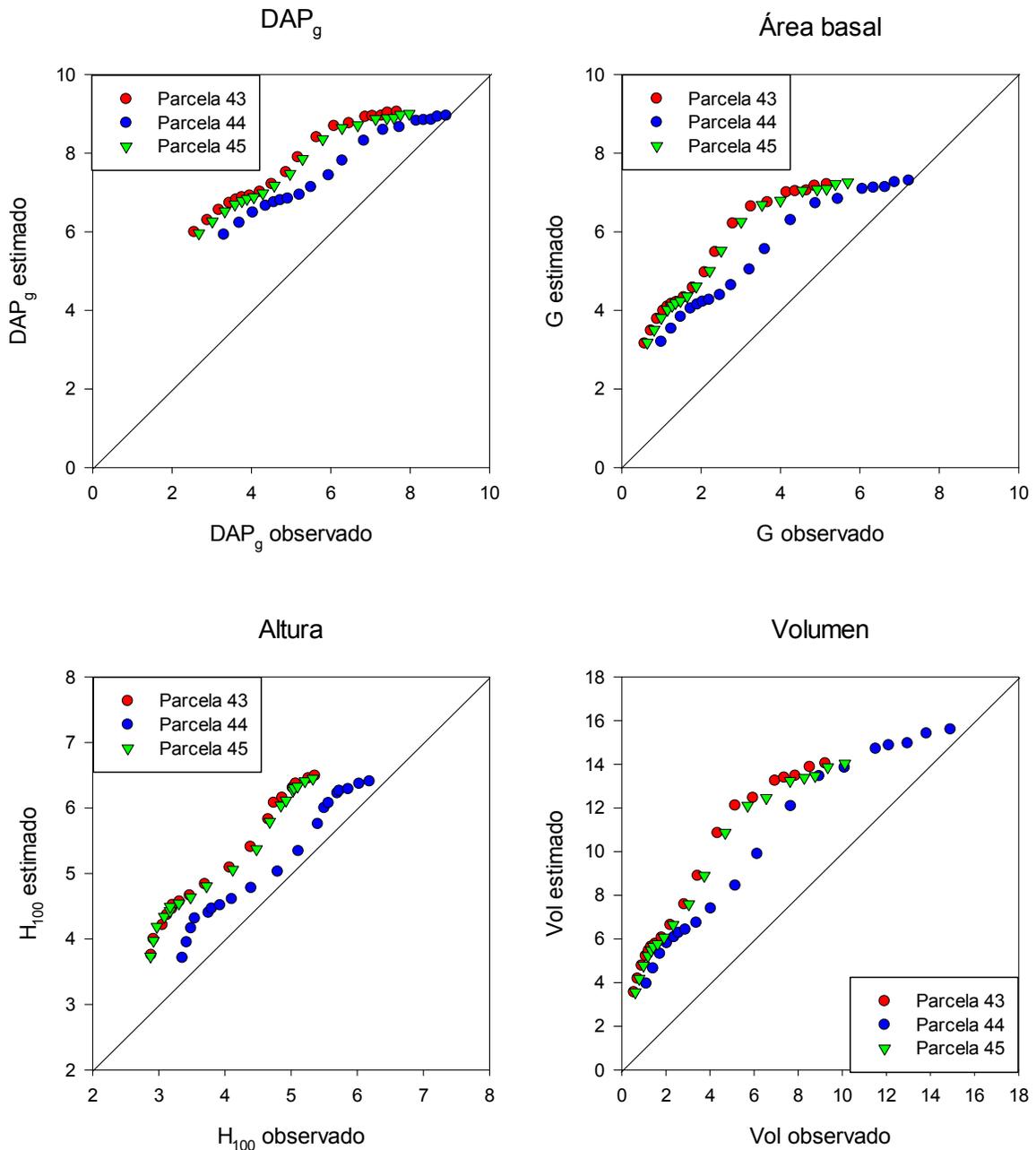


Figura 38. Comparación entre valores observados y valores estimados para DAP<sub>g</sub> (cm), H<sub>100</sub> (m), G (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y Volumen (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Lomas Coloradas.

Como se puede observar en la Figura 39, en la clase de edad 7-14 años, la parcela 40 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,74$ ), la parcela 41 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,33$ ) y la parcela 42 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,81$ ) presentaron valores positivos de NS con respecto al DAP<sub>g</sub>.

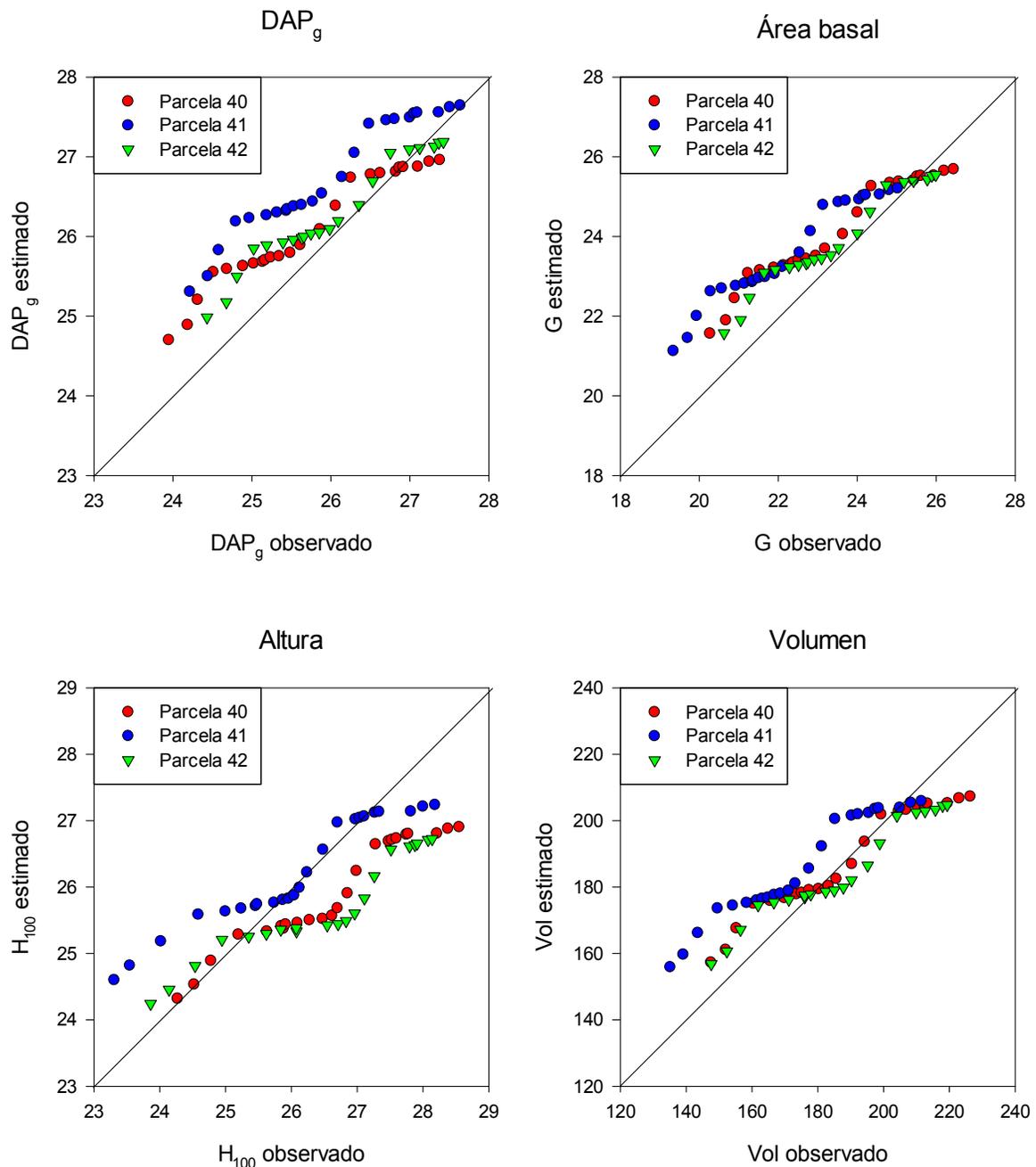


Figura 39. Comparación entre valores observados y valores estimados para DAP<sub>g</sub> (cm), H<sub>100</sub> (m), G (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y Volumen (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Lomas Coloradas.

Para G, la parcela 40 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,75$ ), la parcela 41 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,31$ ) y la parcela 42 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,81$ ), también obtuvieron valores positivos de NS. La altura mostró los valores más bajos de eficiencia en las parcelas 40 ( $r^2=0,94$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,50$ ), 41 ( $r^2=0,93$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,79$ ) y 42 ( $r^2=0,92$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,41$ ). Finalmente el volumen siguió la misma tendencia que las variables anteriores con las parcelas 40 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,86$ ) y 42 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,84$ ) con los valores más altos de NS, mientras que la parcela 41 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,64$ ) tuvo el valor más bajo.

En la clase de edad 14+ años el  $DAP_g$  en las parcelas 37 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,75$ ) y 39 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,76$ ), presentó valores de eficiencia sobre 75%, mientras que en la parcela 38 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,48$ ) fue inferior al 50%. En el área basal ocurrió algo similar, las parcelas 37 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,75$ ) y 39 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,76$ ), tuvieron valores de NS positivos y sobre el 75% y la parcela 38 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,49$ ) el menor valor. Las parcelas 37 ( $r^2=0,92$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,58$ ), 38 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,67$ ) y 39 ( $r^2=0,92$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,63$ ) tuvieron valores sobre el 50% de NS para la altura. En el caso del volumen, los valores de NS de las parcelas 37 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,69$ ), 38 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,70$ ) y 39 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,82$ ) fueron positivos y superiores al 65% de eficiencia (Figura 40).

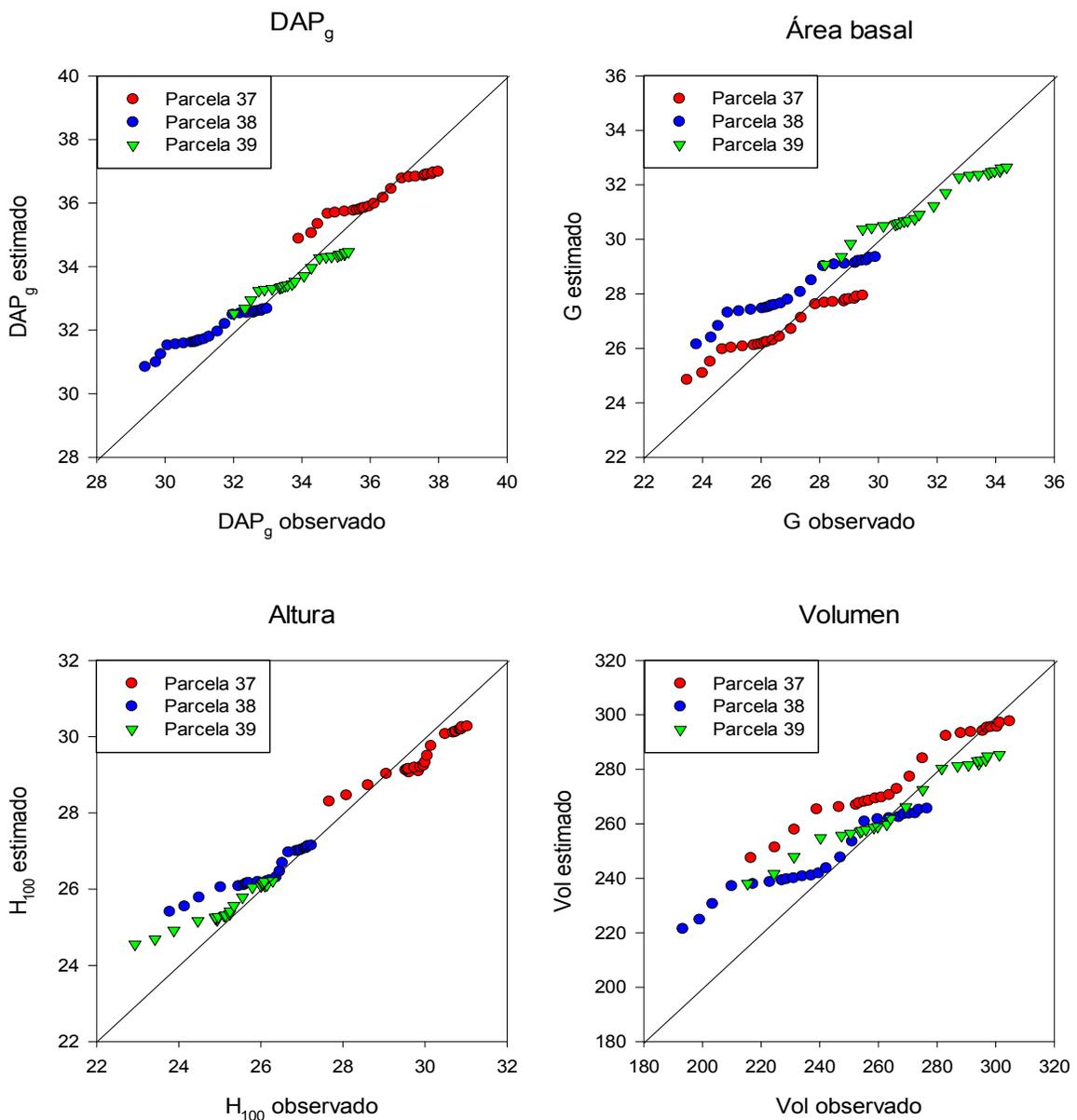


Figura 40. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 14+ años en el sitio Lomas Coloradas.

### 4.4.3 Santa Bárbara

La clase de edad 0-7 tuvo un buen ajuste del coeficiente de eficiencia para el  $DAP_g$  en las parcelas 16 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,91$ ), 17 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,89$ ) y 18 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,91$ ), todas con valores sobre el 85% de eficiencia (Figura 41).

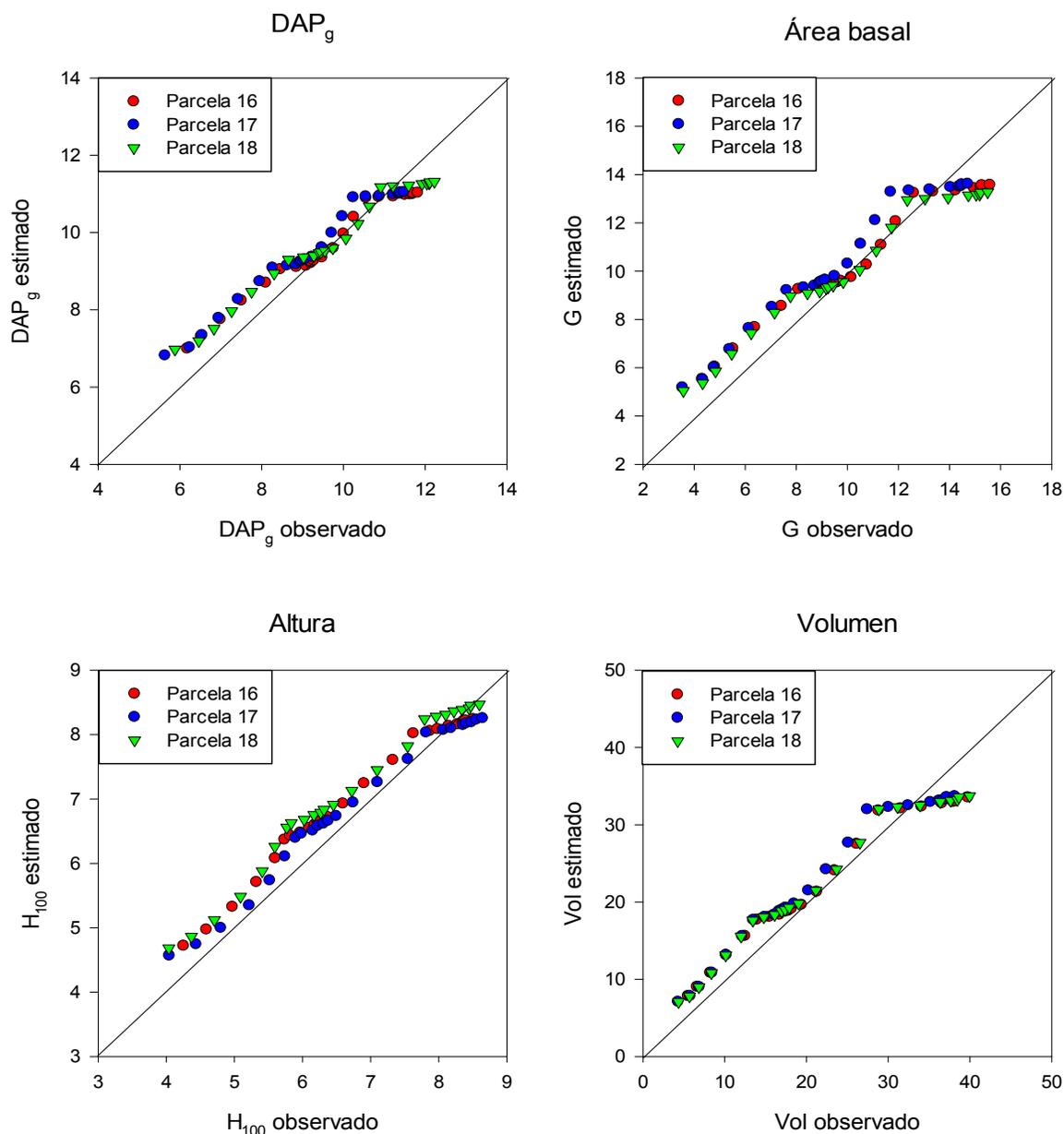


Figura 41. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Santa Bárbara.

En el caso del área basal las parcelas 16 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ), 17 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,91$ ) y 18 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ), presentaron un buen ajuste del coeficiente de eficiencia, con valores superiores al 90%. El mayor valor de eficiencia correspondió a la altura. El rango en el que se encontraron la parcela 16 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,91$ ), la parcela 17 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,95$ ) y la parcela 18 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,

NS=0,88), es de un 88 a un 95% de eficiencia. El volumen, al igual que la altura, presentó altos valores en las parcelas 16 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ , NS=0,92), 17 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ , NS=0,93) y 18 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ , NS=0,93), con una eficiencia del 92 al 93%.

En la clase de edad 7-14 años (Figura 42), los valores de NS para el  $DAP_g$  fueron positivos para la parcela 22 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ , NS=0,58), 23 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ , NS=0,96) y 24 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ , NS=0,89).

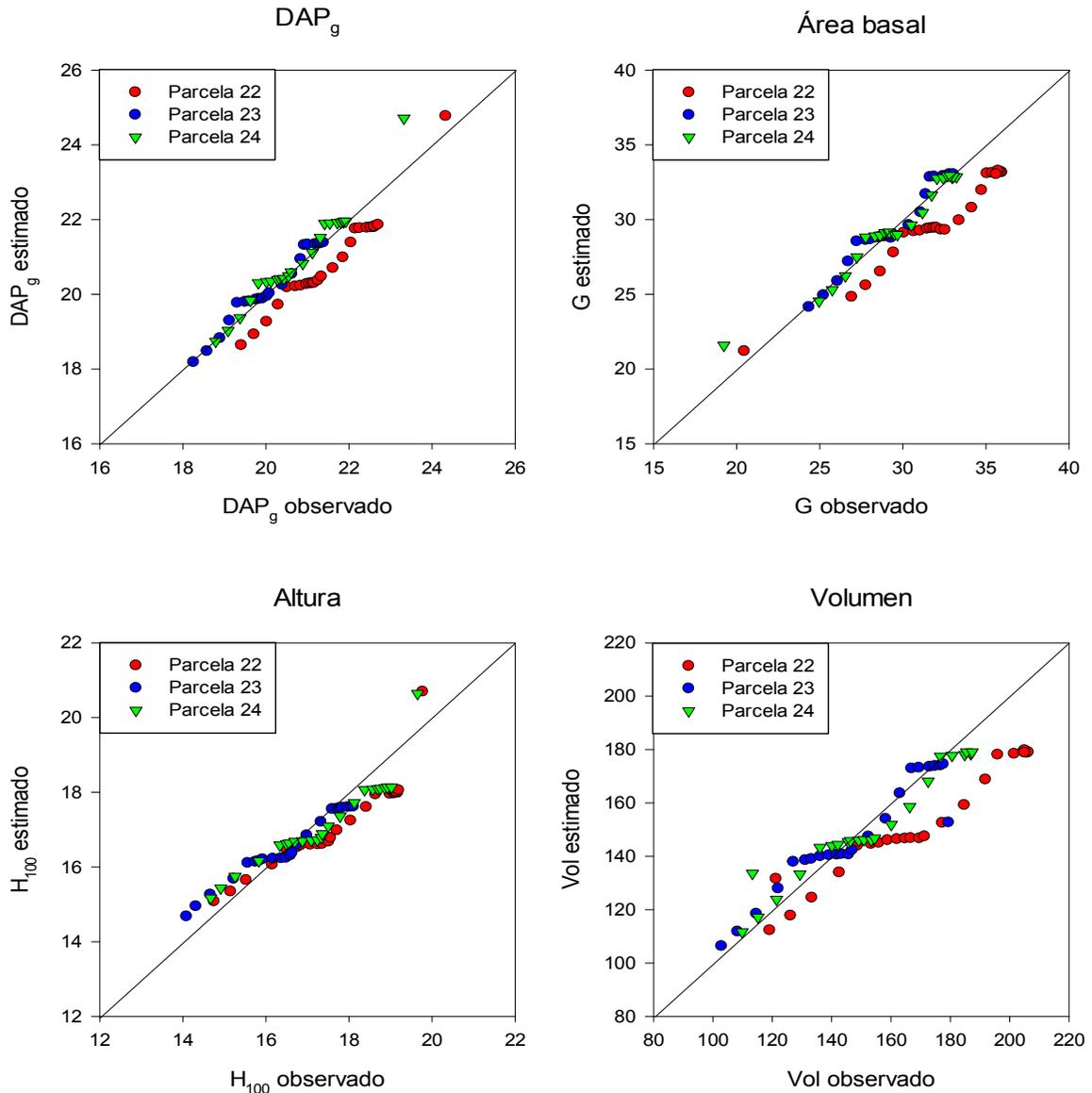


Figura 42. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Santa Bárbara.

Para  $G$ , la parcela 22 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ , NS=0,56), la parcela 23 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ , NS=0,95) y la parcela 24 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ , NS=0,96), también presentaron valores positivos de NS, pero con un amplio rango de eficiencia de 56 a 96%. Los valores de eficiencia en altura, en las parcelas 22 ( $r^2=0,85$ ,  $P<0,001$ , NS=0,70), 23 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,

NS=0,91) y 24 ( $r^2=0,88$ ,  $P<0,001$ , NS=0,85), fueron positivos y sobre el 70% de eficiencia. Finalmente, la eficiencia en el volumen fue positiva en la parcela 22 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ , NS=0,53), en la parcela 23 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ , NS=0,90) y en la parcela 24 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ , NS=0,92).

En la clase de edad 14+ años todos los valores de eficiencia fueron positivos como se ve en la Figura 43.

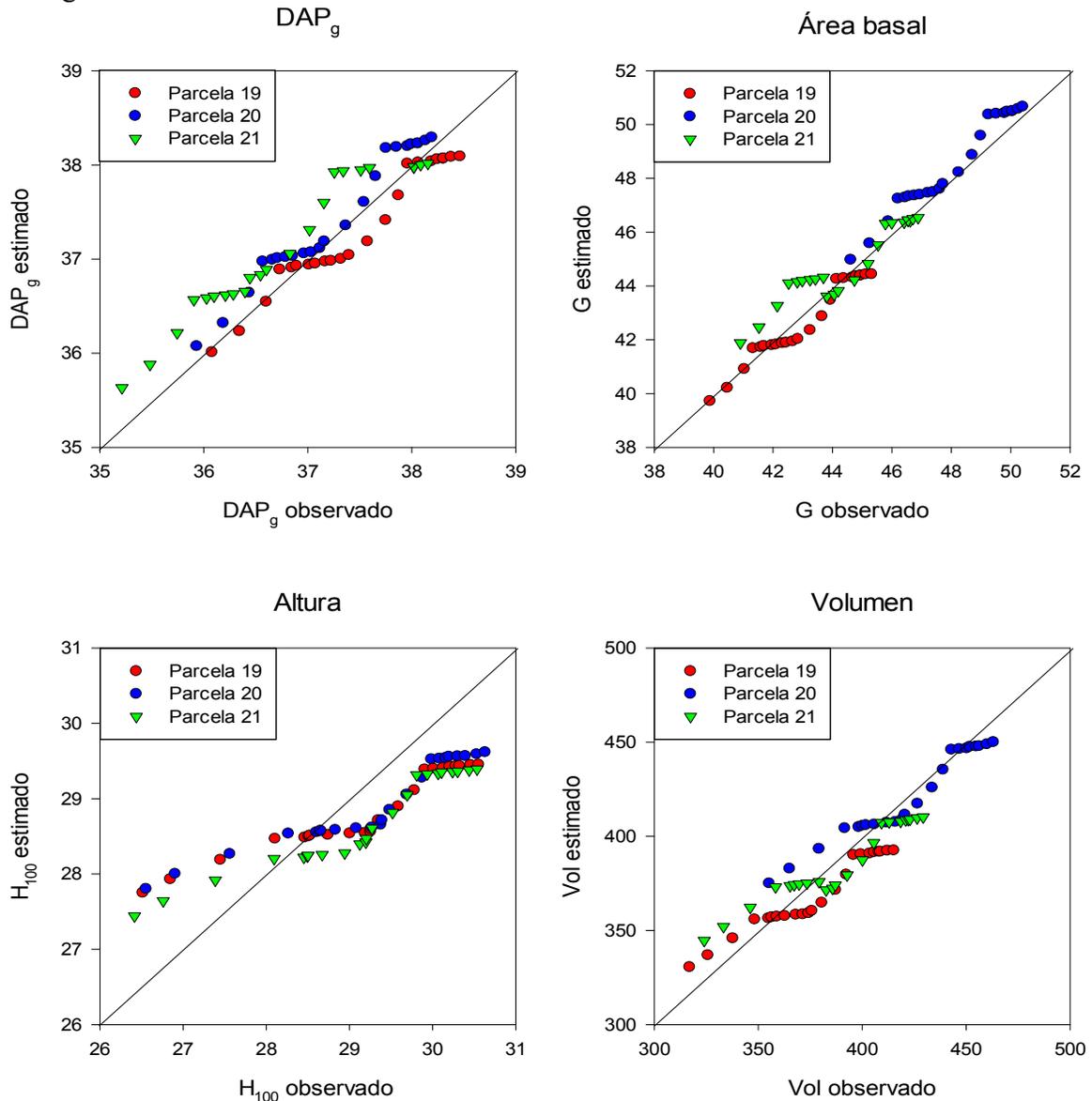


Figura 43. Comparación entre valores observados y valores estimados para DAP<sub>g</sub> (cm), H<sub>100</sub> (m), G (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y Volumen (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) en la clase de edad 14+ años en el sitio Santa Bárbara.

La altura es la variable con menor eficiencia en esta clase de edad con valores cercanos al 60%. Las parcelas 19 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ , NS=0,58) y 21 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ , NS=0,58), presentaron una eficiencia igual de 58%, mientras que la parcela 20 ( $r^2=0,90$ ,  $P<0,001$ , NS=0,61) presentó una eficiencia de 61%. En el caso del DAP<sub>g</sub> las parcelas 19 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ , NS=0,90), 20 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ , NS=0,89) y 21 ( $r^2=0,94$ ,  $P<0,001$ , NS=0,77),

obtuvieron un valor superior a 75% de eficiencia. El área basal tuvo similar comportamiento al  $DAP_g$ , obteniendo, las parcelas 19 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ), 20 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,89$ ) y 21 ( $r^2=0,90$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,83$ ), valores positivos, sobre el 80% de eficiencia. En el volumen, las parcelas 19 ( $r^2=0,94$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,78$ ), 20 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ) y 21 ( $r^2=0,92$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,82$ ) presentaron valores positivos.

#### 4.4.4 Tapihue

En el sitio Tapihue se presenta un nivel freático temporal, desde fines de otoño hasta mediados de primavera (Kühne *et al.*, 2005), el cual fue incluido en la modelación como un aporte en riego de 50 mm.

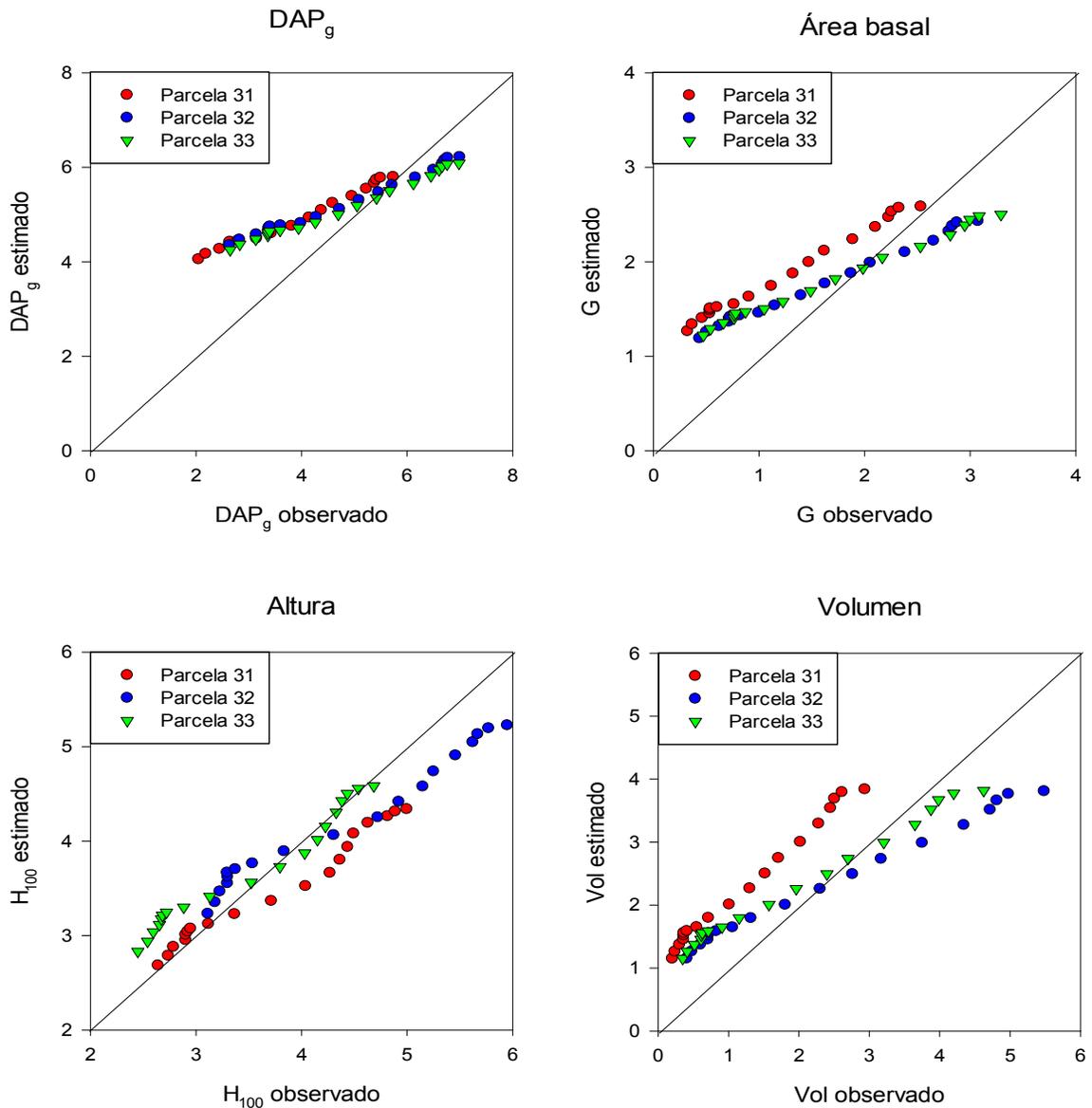


Figura 44. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 0-7 años en el sitio Tapihue.

En la clase de edad 0-7 años, la eficiencia para el  $DAP_g$  fue negativa en la parcela 31 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=-0,01$ ) y positiva para las parcelas 32 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,57$ ) y 33 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,60$ ). Para el área basal, todos los valores de eficiencia fueron positivos, pero la parcela 31 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,15$ ), tuvo un valor bastante más bajo que las parcelas 32 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,68$ ) y 33 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,68$ ). La altura, en la parcelas 32 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,83$ ) y 33 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,85$ ) tuvo un valor de eficiencia positivo y sobre el 80%, en cambio la parcela 31 ( $r^2=0,8$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,30$ ) sólo alcanzó el 30% de eficiencia. En el volumen, las parcelas 31 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,62$ ), 32 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,76$ ) y 33 ( $r^2=0,99$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,81$ ) presentaron valores positivos sobre el 60% de eficiencia (Figura 44).

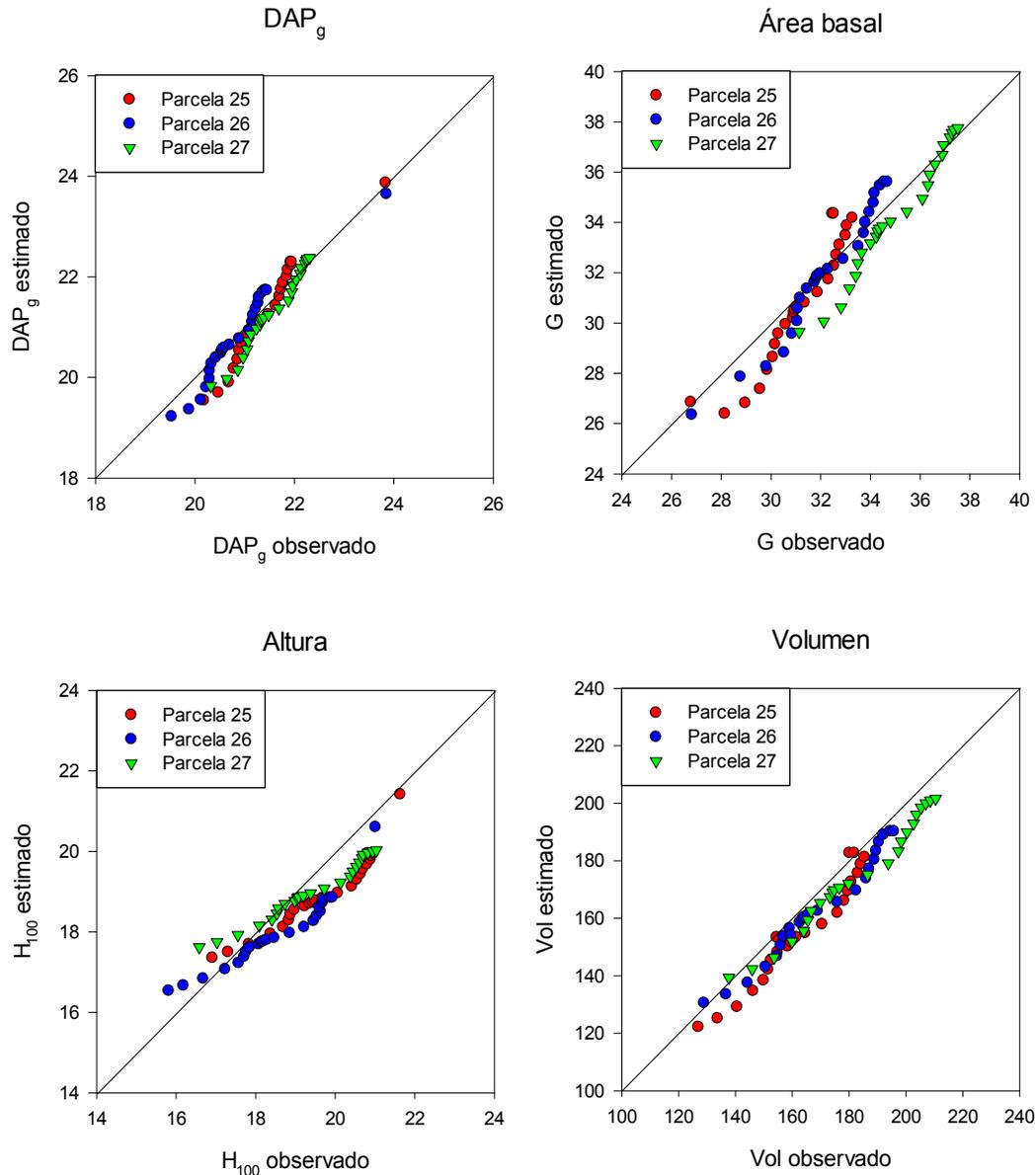


Figura 45. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 7-14 años en el sitio Tapihue.

Todos los valores de eficiencia fueron positivos en la clase de edad 7-14 años (Figura 45). El  $DAP_g$  tuvo un valor de eficiencia máximo en la parcela 26 ( $r^2=0,94$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,90$ ), mínimo en la parcela 27 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,65$ ) e intermedio en la parcela 25 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,74$ ). La eficiencia de G fue inferior al 70% en las parcelas 25 ( $r^2=0,89$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,53$ ) y 27 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,67$ ) y superior al 80% en la parcela 26 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,84$ ). La altura tuvo los valores más bajos de eficiencia en comparación a las otras variables de estado. Las parcelas 25 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,55$ ) y 26 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,66$ ) tuvieron una eficiencia inferior al 70% y la parcela 27 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,71$ ) una eficiencia de 71%. Para el volumen, las parcelas 25 ( $r^2=0,95$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,73$ ), 26 ( $r^2=0,97$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,88$ ) y 27 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,84$ ) fueron superiores al 70% de eficiencia.

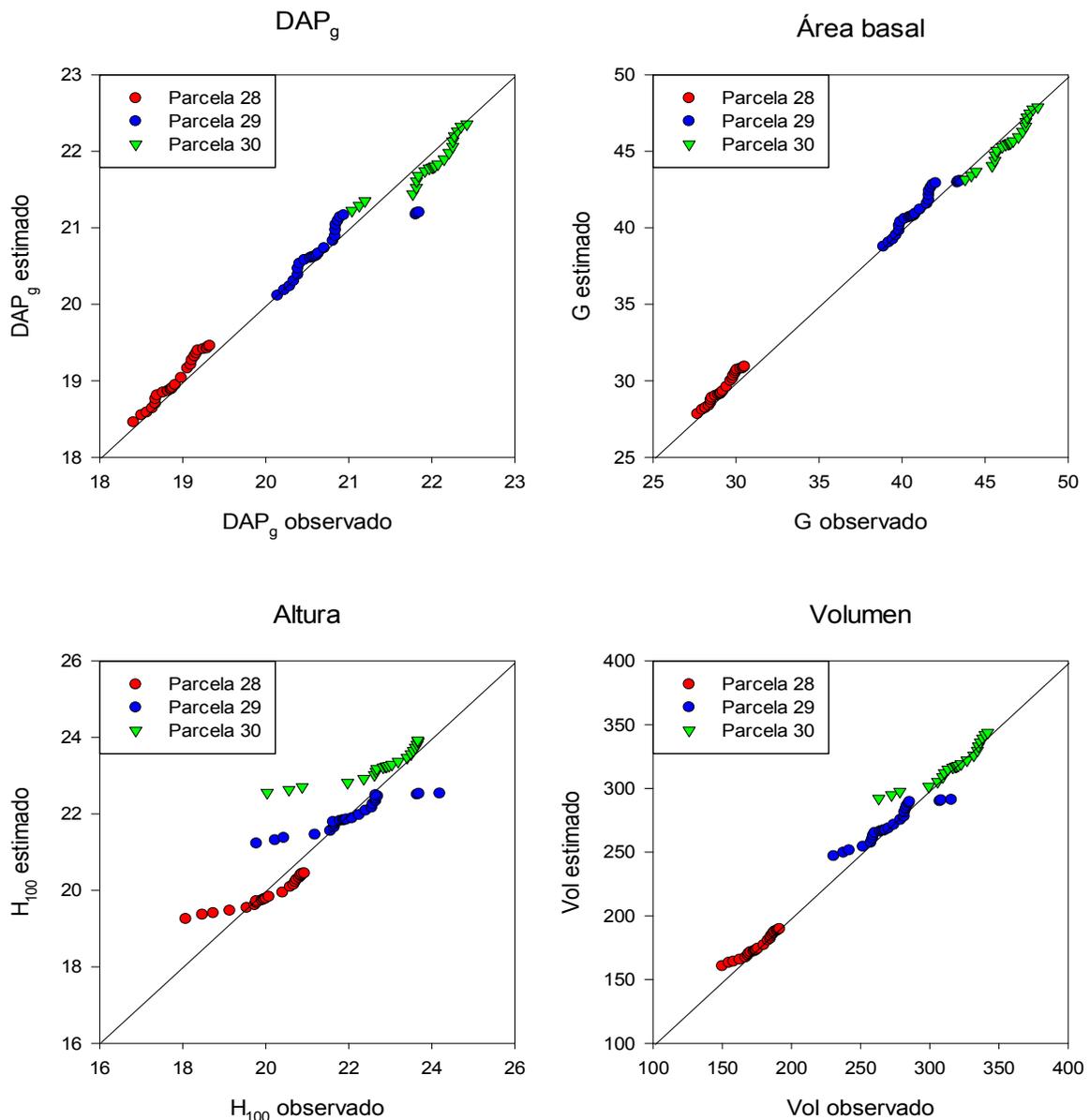


Figura 46. Comparación entre valores observados y valores estimados para  $DAP_g$  (cm),  $H_{100}$  (m),  $G$  ( $m^2 ha^{-1}$ ) y Volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) en la clase de edad 14+ años en el sitio Tapihue.

En la clase de edad 14+ años, el  $DAP_g$  en la parcela 28 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,83$ ) mostró una eficiencia sobre el 80%, mientras que las parcelas 29 ( $r^2=0,74$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,72$ ) y 30 ( $r^2=0,87$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,74$ ) tuvieron una eficiencia bajo el 75% (Figura 46). En el área basal, las parcelas 28 ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,83$ ) y 29 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,88$ ) tuvieron una eficiencia superior a 80%, mientras que la parcela 30 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,53$ ) tuvo una eficiencia de 53%. Los valores de NS para la altura fueron positivos e inferiores al 65% en las parcelas 28 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,64$ ), 29 ( $r^2=0,89$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,58$ ) y 30 ( $r^2=0,83$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,24$ ). El volumen presentó valores positivos con una eficiencia sobre el 80% en las parcelas 29 ( $r^2=0,91$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,82$ ) y 30 ( $r^2=0,90$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,81$ ), mientras que en la parcela 28 ( $r^2=0,96$ ,  $P<0,001$ ,  $NS=0,92$ ) fue superior a 90%.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Biomasa y volumen

El incremento anual se calculó tanto para la biomasa, como para el contenido de carbono en la biomasa. Como el contenido de carbono es el 50% de la biomasa (Bown, 2007), los resultados se consideraron proporcionales. El componente que presentó el mayor incremento fue el fuste, según Schlatter y Gerding (1999), a mayor edad se favorece la proporción de biomasa en los fustes y a menor edad existe una mayor proporción de biomasa en la copa. Esto coincide con lo encontrado en este estudio, donde la biomasa fustal aumentó con la clase de edad. En la primera clase de edad, durante los 24 meses de estudio, el incremento fue menor a las otras clases alcanzando en promedio a  $13,31 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En las clases de edad 7-14 y 14+ años, el incremento anual fue similar entre ambas con  $31,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $31,03 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , respectivamente. Al comparar el incremento anual en biomasa entre sitios, se pudo dividir en dos grupos los sitios: Nacimiento con Santa Bárbara con un incremento anual promedio de  $30,28 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y Lomas Coloradas con Tapihue con un incremento anual promedio de  $20,29 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , cabe destacar que en estos sitios la edad de la plantación en la clase de edad 0-7 años era inferior a los otros sitios motivo por el cual el incremento en el segundo grupo es inferior. Esto se confirma por lo expuesto por Álvarez *et al.* (1999), que concluyen que existe un 30% más de incremento en biomasa en la precordillera andina, además Schlatter y Gerding (1999), ordenan el incremento anual por el tipo de suelo, lo que concuerda con los resultados de este estudio, donde los suelos Rojos Arcillosos tuvieron el mayor incremento anual, correspondientes al sitio Nacimiento y los suelos de Arenales tuvieron el menor incremento, correspondiente al sitio Tapihue.

El índice de área foliar obtuvo valores máximos en la clase de edad 7-14 años. La clase de edad 0-7 años tuvo los menores valores de  $L$  con  $3,88 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  debido a la baja biomasa presente en esta clase de edad. La clase de edad 7-14 años presentó un valor de  $L$  de  $9,89 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  mientras que la clase de edad 14+ años presentó un valor de  $L$  de  $8,17 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , por lo que se puede concluir que entre las edades 7 y 14 años, las plantaciones de Pino Radiata tienen los mayores valores de índice de área foliar, lo que concuerda con el estudio de Jagodzinski y Kalucka (1998), donde concluye que la edad es un factor que tiene una mayor influencia sobre el índice de área foliar y que  $L$  llega a un tope en una edad intermedia para luego decaer en edades más adultas. Además se observó que el índice de área foliar presentaba mayores valores en los sitios con mayores valores de biomasa, lo que también fue encontrado por Jagodzinski y Kalucka (1998).

La productividad en biomasa de los sitios se ordenó de la siguiente manera: Santa Bárbara > Nacimiento > Lomas Coloradas > Tapihue, con valores de  $G_E$  de 3,98, 3,48, 3,22 y 2,76  $\text{t m}^{-2}$ , cabe destacar que Santa Bárbara presentó el valor más alto de  $G_E$  en la clase de edad 0-7 años, sin embargo, en las clases de edad 7-14 y 14+ años, Nacimiento presentó mayor productividad. Esto concuerda con lo expuesto por Gerding y Schlatter (1995) y Schlatter y Gerding (1999) que dicen que el suelo y el clima explican en gran parte la variación de la productividad de plantaciones de *P. radiata*, siendo las condiciones físicas del suelo y las

precipitaciones los factores más importantes. Además exponen que el suelo Rojo Arcilloso es el de mayor productividad y el suelo Arenal el de menor productividad.

El volumen tuvo un comportamiento similar al ocurrido con la biomasa. Los sitios Santa Bárbara y Nacimiento obtuvieron los mayores incrementos con 38,25 y 44,64 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, mientras que Lomas Coloradas y Tapihue tuvieron menores valores de incremento en volumen con 27,56 y 28,64 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. Las clase de edad 0-7 años tuvo el menor incremento en volumen con 13,52 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y las clases de edad 7-14 y 14+ años tuvieron un incremento en volumen similar con 45,24 y 45,56 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Además la eficiencia de crecimiento también presentó un valor máximo de 5,09 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> en el sitio Nacimiento y un valor mínimo de 3,13 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> en el sitio Tapihue. Estos valores concuerdan con lo expuesto por Schlatter y Gerding (1999), en cuanto a que en los suelos del tipo Rojo Arcilloso y de Cenizas Volcánicas se presenta un mayor crecimiento para *P. radiata* y en los suelos del tipo Arenal un menor crecimiento medio anual.

## 5.2 Productividad primaria

Este estudio comparó los resultados obtenidos mediante el balance de carbono de todos los componentes de GPP, entre los sitios y las clases de edad, con esto se evaluó que sitio presentó las mejores condiciones para el desarrollo de *P. radiata*.

Los componentes de ANPP son  $F_A$  que corresponde al flujo de carbono asociado a la caída de hojarasca,  $\Delta C_C$  corresponde al incremento en el contenido de carbono en el follaje y  $\Delta C_W$  al incremento en el contenido de carbono de ramas, corteza y fuste.

Como era de esperar el componente de mayor importancia en ANPP correspondió a  $\Delta C_W$ , debido a que el fuste es la parte del árbol que mayor biomasa tiene, por el contrario se tiene al componente  $\Delta C_C$ , que tiene la menor proporción de ANPP, esto se corrobora con lo expuesto por Riveros *et al.* (2005), que encontraron que la madera aporta en promedio el 89% de la biomasa total sobre el suelo, seguido por la corteza con 8,2%, ramas con 1,5%, acículas con 0,8% y ramillas con 0,7% en Pino Radiata. Además coincide con lo encontrado por Helmisaari *et al.* (2002), que concluyeron que la madera fue el principal componente de la biomasa para un bosque adulto (35 años) y para un bosque maduro (100 años) de *Pinus sylvestris* L.

Se buscó si existían diferencias significativas entre los sitios y las clases de edad para ANPP. En los sitios no se encontraron diferencias significativas, como se podría haber esperado por los valores obtenidos de la biomasa. Entre las clases de edad se encontraron diferencias significativas, la clase de edad 0-7 años tuvo un valor menor de ANPP que las clases de edad 7-14 y 14+ años. Entre las clases de edad 7-14 y 14+ años no se encontraron diferencias significativas. Este resultado está directamente ligado a los valores que se encontraron para la biomasa aérea, que mostraron que en clases de edad superiores los valores de ANPP fueron mayores. Gower *et al.* (1996) encontraron que en *Pinus elliottii*, el ANPP aumenta con la edad y con la biomasa fustal hasta llegar a una edad donde comienza a decrecer. Kashian *et al.* (2013) encontraron que ANPP alcanza un valor máximo en edades entre los 26 y 46 años en *Pinus contorta*.

Los componentes de APR son  $L_{RC}$  que corresponde a la respiración de construcción del follaje,  $L_{RM}$  que corresponde a la respiración de mantención del follaje y  $W_R$  a la respiración de construcción y mantención de la madera.

Se calculó la parte que representa cada componente del total de APR, dando como resultado que  $L_{RM}$  fue el componente de mayor importancia de APR, seguido por  $W_R$  y  $L_{RC}$ . Ryan *et al.* (1996) midieron la respiración de *P. radiata*, dando como resultado una proporción similar de los componentes al obtenido en este estudio, de igual manera Bown *et al.* (2011), encuentran una proporción similar de los componentes de APR en *P. radiata* en Nueva Zelanda.

La respiración aérea de la planta presentó diferencias significativas entre sitios y entre las clases de edad, lo que probablemente está ligado con el índice de área foliar (Pierce y Running, 1988), ya que se observa que Nacimiento presentó el mayor valor de APR, lo que concuerda con el mayor valor obtenido en  $L$ , por el contrario el sitio Tapihue mostró los menores valores de APR y  $L$ , esta misma relación, de un mayor valor de  $L_{RM}$  a mayores valores de  $L$ , se puede encontrar en el estudio realizado por Bown (2007).

La relación directamente proporcional encontrada por Bown (2007) entre  $L_{RM}$  y el índice de área foliar, confirma los datos encontrados en el presente estudio, dónde se observó que mayores valores de APR se encontraron en los sitios y en las clases de edad que presentaron mayores valores de  $L$ , en este caso el sitio Nacimiento con un valor promedio de APR de  $9,23 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y un valor de  $L$  de  $9,14 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , seguido por el sitio Santa Bárbara con valores de APR y  $L$  de  $7,94 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $8,19 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , Tapihue con valores de  $6,71 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $6,69 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  y finalmente Lomas Coloradas con valores de  $4,96 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $5,24 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , respectivamente. Respecto a la clase de edad se pudo observar el mismo comportamiento, un mayor valor de APR a mayores valores de  $L$  y un menor valor de APR cuando el  $L$  fue inferior. En la clase de edad 7-14 años, se obtuvo el mayor valor de APR que es reafirmado por el mayor valor de  $L$  en esa clase de edad.

Los valores de los componentes  $F_E$ ,  $\Delta C_S$  y  $\Delta C_L$  de TBCF fueron asumidos cero, por lo que la Ec 12 quedó simplificada a:  $TBCF = F_S + \Delta CR$ . El estudio de Bown (2007) también simplifica la ecuación de TBCF quedando con los mismos componentes.

$F_S$  fue el componente más importante, alcanzando a ser un 90% de TBCF. Valores altos de  $F_S$  como componente de TBCF fueron encontrados por Giardina y Ryan (2002) y Giardina *et al.* (2003).

La tasa de respiración de suelos es el componente principal de TBCF, está relacionada mayoritariamente con el contenido de agua en el suelo y la temperatura (Vega, 2012). Curiel *et al.* (2003), encontraron que en *Pinus sylvestris*, la temperatura del suelo era la variable más importante en el comportamiento de la respiración de suelos, mientras que cuando el contenido volumétrico de agua en el suelo disminuía bajo  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , se convertía en el factor limitante de la respiración de suelos. La importancia del contenido de agua en el suelo y la temperatura han sido frecuentemente demostrados, por lo que tradicionalmente se han considerado los factores más influyentes en la actividad respiratoria del suelo (Knhol *et al.*, 2008; Ryu *et al.*, 2009).

Al buscar diferencias significativas para TBCF entre los sitios se encontró que Nacimiento, Lomas Coloradas y Santa Bárbara no presentaron diferencias significativas entre sí, pero si presentaron diferencias con el sitio Tapihue. Como se mencionó anteriormente, el sitio Tapihue fue el que tuvo un menor promedio en el contenido volumétrico de agua en el suelo, por lo que se puede afirmar que presentó la menor tasa de respiración de suelos, mientras que Nacimiento, Lomas Coloradas y Santa Bárbara tuvieron los mayores valores de contenido volumétrico de agua en el suelo, por consiguiente las mayores tasas de respiración. Estos resultados de las diferencias entre sitios en TBCF y tasa de respiración indican que el sitio con mejores condiciones es Nacimiento y el con las condiciones menos favorables es Tapihue. Entre clases de edad, no se encontraron diferencias significativas.

Con estos tres componentes calculados, se obtuvieron los valores de la producción primaria bruta (GPP). Se observó que los tres componentes presentaron relaciones significativas con el GPP. Se encontró que GPP en Nacimiento fue significativamente mayor al de Tapihue, al igual que sus componentes APR y TBCF. Esto se debe a las condiciones climáticas y de suelo presentes en cada sitio, como lo explica Gerding y Schlatter (1995) y Schlatter y Gerding (1999), que dicen que la mayor productividad se encuentra en sitios con suelos Rojos Arcillosos y la peor productividad en sitios con suelos de Arenales.

Como se ha visto a lo largo de los resultados y las discusiones, la biomasa y el contenido de carbono fueron mayores en la clase de edad adulta (Gamarra, 2011; Jixin *et al.* 2014; Pacheco *et al.*, 2007). La edad también influyó sobre GPP. La clase de edad 0-7 años presentó la menor productividad, comparado con las clases 7-14 y 14+ años que no presentaron diferencias significativas entre ellas. Esto concuerda con lo encontrado por Litton *et al.* (2004), donde en edades juveniles la productividad primaria bruta es menor que en edades más avanzadas.

La productividad primaria neta (NPP) tuvo un comportamiento similar a la productividad primaria bruta. Las mayores diferencias entre sitios se encontraron entre el sitio Nacimiento y el sitio Tapihue, confirmando que el sitio Nacimiento posee mejores condiciones para el desarrollo de *P. radiata* que el sitio Tapihue. Respecto a las clases de edad, se encontró que hubo una tendencia de NPP y GPP de aumentar con la clase de edad.

Se estimó el CUE (NPP:GPP) que corresponde a la eficiencia en el uso de carbono. Waring *et al.* (1998) en una comparación entre seis bosques siempre verdes y uno caducifolio en Nueva Zelanda, Australia y Estados Unidos, encontraron que la relación NPP:GPP era de  $0,47 \pm 0,04$  DS, siendo similar al valor de  $0,45 \pm 0,05$  DS reportado por Landsberg y Waring (1997). Bown (2007) también encontró un valor similar de  $0,54 \pm 0,05$  DS, lo que concuerda con este estudio donde el valor de CUE fue de  $0,53 \pm 0,08$  DS.

Waring *et al.* (1998) encontraron una relación significativa, creciente y estable entre NPP y GPP, lo mismo se puede apreciar en este estudio. Al ser estable NPP:GPP se esperaría que en todas las clases de edades se presentara una relación similar, sin embargo, se presentaron diferencias significativas entre la clase de edad 0-7 años y las clases de edad 7-14 y 14+ años, pero entre 7-14 y 14+ años no, esto puede estar relacionado a que las clases de edad son independientes y no forman parte de una secuencia cronológica. El valor de NPP:GPP para la clase de edad 0-7 años fue de  $0,47 \pm 0,09$  DS, mientras que para las clases de edad

7-14 y 14+ años fue de  $0,56 \pm 0,03$  DS y  $0,58 \pm 0,03$  DS, respectivamente. Estos valores están dentro de los rangos encontrados por Bown (2007), Landsberg y Waring (1997) y Waring *et al.* (1998). Por otro lado Mäkelä y Valentine (2000), sugieren que la relación NPP:GPP declina en el curso del desarrollo del bosque respecto a la edad, pero que la significancia de esta declinación depende de la importancia relativa de otros factores de crecimiento.

### 5.3 Partición de GPP

En la partición de GPP en sus componentes, se encontraron valores similares para ANPP:GPP y TBCF:GPP con valores aproximados de 40% cada uno y el 20% restante corresponde a APR. Bown *et al.* (2011) encontró una partición de 26%, 36% y 38% respectivamente para *P. radiata*. Giardina *et al.* (2003), encontró una proporción de 28%, 47% y 25% para *Eucalyptus saligna*. En *P. radiata*, Ryan *et al.* (1996), encontró que ANPP era un 38% de GPP en plantaciones fertilizadas.

La relación ANPP:GPP tendió a aumentar con la edad similarmente a lo encontrado por Copenhaver y Tinker (2014) en *Pinus contorta* var. *latifolia* en el Parque Nacional Yellowstone y por Gholz y Fisher (1982) en *Pinus elliottii*.

La relación APR:GPP también aumentó con la clase de edad, presentando diferencias significativas entre la clase de edad 0-7 años y las otras clases de edad. Se observa un valor máximo en la clase de edad 7-14 años, esto se debe a la relación que tiene APR con el índice de área foliar, que también obtuvo un valor máximo en esta clase de edad (Bown, 2007; Pierce y Running, 1988). Ryan *et al.* 2004, encontraron que la partición APR:GPP aumenta con la edad en *Eucalyptus saligna*.

La relación TBCF:GPP disminuyó con la clase de edad, presentando el mayor valor en la clase de edad 0-7 años, el que presentó diferencias significativas con las otras dos clases de edad. Las clases de edad 7-14 y 14+ años no presentaron diferencias significativas. Al aumentar la proporción ANPP:GPP y APR:GPP con la edad, se espera que la partición TBCF:GPP disminuya. La edad ejerce una fuerte influencia en TBCF, que disminuye hasta en un 30% como máximo en el cierre del dosel (Smith y Resh, 1999; Giardina y Ryan, 2002).

### 5.4 Modelación de Productividad

3-PG es un modelo que sintetiza procesos biológicos fundamentales, requiriendo información climática común a muchas estaciones meteorológicas, e información global de los sitios, como el índice de área foliar, profundidad efectiva, textura, y relación C/N de los suelos. Además es un modelo utilizado ampliamente, con buenos resultados, como lo han probado Bown (2007), Bryars *et al.* (2013), Feikema *et al.* (2010), Landberg y Waring (1997) y Rodriguez *et al.* (2003).

3-PG fue calibrado como menciona Landsberg *et al.* (2003). En el proceso de calibración, el modelo se corre y se comparan los resultados con los valores observados, luego los parámetros son cambiados para mejorar el ajuste y es vuelto a correr. Sucesivas

modelaciones llevan a tener un buen ajuste, en la mayoría de los casos, entre los datos observados y simulados. En este estudio se ajustaron distintos parámetros relacionados con la alometría.

El  $DAP_g$ , el área basal, la altura dominante y el volumen fueron las variables modeladas con 3-PG. El  $DAP_g$  tuvo sobre el 75% de eficiencia de modelación en siete de las doce combinaciones Zona-Edad. El área basal tuvo sobre el 75% de eficiencia de modelación en seis combinaciones Zona-Edad. La altura fue la variable que presentó menor eficiencia en la modelación con solo tres combinaciones Zona-Edad sobre el 75% de eficiencia, pero nueve combinaciones sobre el 50%, esto probablemente esté relacionado con la calibración del modelo. El volumen obtuvo siete combinaciones Zona-Edad con una eficiencia sobre el 75%. Leiva *et al.* (2003), utilizaron el modelo 3-PG para analizar la productividad en plantaciones de Pino Radiata y obtuvieron buenos ajustes para el volumen y DAP. Aseveran que 3-PG es un “buen predictor del volumen con estimaciones confiables, bajo error y libres de sesgo”, por lo que fue de importancia para el análisis de *P. radiata*, ya que proporcionó antecedentes que no aportan los modelos estadísticos tradicionales. Landsberg y Waring, (1997), aseguran que la excelente correspondencia entre los datos medidos y estimados de biomasa fustal en Tumul en Nueva Zelanda y en Haupapa en Australia, logrados simplemente usando el clima apropiado, la humedad del suelo y la fertilización, les da confianza que el modelo está listo para ser usado como una herramienta práctica. Se podría especular lo mismo para Chile.

## 6. CONCLUSIONES

El incremento en biomasa, contenido de carbono y volumen mostró mayores valores para Nacimiento y Santa Bárbara, mientras que Tapihue obtuvo los valores más bajos. Estas diferencias fueron provocadas por el tipo de suelo y clima presente en cada sitio. El índice de área foliar está relacionado con la biomasa del follaje, por lo tanto se obtuvieron mayores valores de  $L$  en los sitios Nacimiento y Santa Bárbara, por el contrario Tapihue presentó el menor valor de  $L$ . La biomasa del follaje también aumentó con la edad, alcanzando un valor máximo en la clase de edad 7-14 años, lo mismo que ocurrió con el  $L$ . Además los sitios Santa Bárbara y Nacimiento presentaron los mayores valores en eficiencia de crecimiento en biomasa, en contenido de carbono de la biomasa y en volumen, por lo que se puede concluir que tienen mejores condiciones para el desarrollo de *P. radiata*.

Los componentes de la productividad primaria bruta (GPP) fueron medidos por separado, encontrándose resultados para ANPP, APR y TBCF. Para ANPP no se encontraron diferencias entre sitios, mientras que APR y TBCF si presentaron diferencias. La respiración del follaje y la respiración del suelo son los componentes principales de APR y TBCF, respectivamente. Se encontró que los sitios Nacimiento y Santa Bárbara presentaban mayores tasas de respiración del follaje y de suelos.

La productividad primaria bruta (GPP) y la productividad primaria neta (NPP) variaron significativamente entre los sitios, siendo Nacimiento el sitio con mayor valor y Tapihue el con menor valor. El CUE presentó un valor de  $0,53 \pm 0,08$  DS, lo que concuerda con valores encontrados en otros estudios (Waring *et al.*, 1998; Bown, 2007). No existieron diferencias entre los sitios para el CUE. Esto reafirma que los mejores sitios para el desarrollo de *P. radiata* son Nacimiento y Santa Bárbara, mientras que Tapihue es el sitio que tiene las condiciones menos favorables.

La partición de GPP no presentó diferencias entre los sitios para ANPP:GPP y TBCF:GPP, sólo hubo diferencias para la partición APR:GPP. En cambio en la clase de edad si se presentaron diferencias. La partición ANPP:GPP fue mayor en la clase de edad 14+ años, mientras que la partición TBCF:GPP fue menor en la clase de edad 14+ años. Esto lleva a concluir que en edades juveniles el carbono se asigna en una mayor proporción en la parte subterránea de la planta y a medida que aumenta la edad, esta se va traspasando a la parte aérea. La partición APR:GPP tuvo un máximo en la clase de edad 7-14 años, por lo que se concluye que la respiración, que está ligada al índice de área foliar y a la biomasa del follaje, obtiene un máximo en clases de edades intermedias.

3-PG es una herramienta que entrega estimaciones confiables y con bajo error de muchas variables que pueden ser simuladas. En este caso se simuló solamente el  $DAP_g$ ,  $G$ ,  $H_{100}$  y Vol. Un porcentaje importante de las parcelas tuvieron sobre el 75% de eficiencia en la modelación, por lo que se puede concluir que es una herramienta útil para la modelación de crecimiento de bosques. Las mejores estimaciones se lograron para área basal y diámetro, seguidas por el volumen y por último la altura dominante.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, J.; ALLEN, H.; ALBAUGH, T.; STAPE, J.; BULLOCK, B. y SONG, C. 2013. Factors influencing the growth of radiate pine plantations in Chile. *Forestry* 86: 13-26.
- ÁLVAREZ, J.; RODRIGUEZ, J. Y SUAREZ, D. 1999. Mejoramiento de la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. a través de un método racional de fertilización. *Bosque* 20(1): 23-36.
- BONELLI, C. y SCHLATTER, J. 1995. Caracterización de suelos rojo arcillosos de la zona Centro-Sur de Chile. *Bosque* 16(2): 21-37.
- BOWN, H. 2007. Representing nutrition of *Pinus radiata* in physiological hybrid productivity models. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 265 p.
- BOWN, H.; WATT, M.; CLINTON, P. y MASON, E. 2011. Soil C/N influences the carbon flux and partitioning in control and fertilized mini-plots of *Pinus radiata* in New Zealand. *Ciencia e Investigación Agraria* 38(2): 277-289.
- BRÉDA, N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index. A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54(392): 2403-2417.
- BRYARS, C.; MAIER, C.; ZHAO, D.; KANE, M.; BORDERS, B.; WILL, R. y TESKEY, R. Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. *Forest Ecology and Management* 289: 501-514.
- BURKHART, H.E., AND TOMÉ, M. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer, Dordrecht, New York pp. 457.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). 1999. Estudio Agrológico VIII Región. Publicación 121. 550 p.
- COPENHAVER, P. y TINKER, D. 2014. Stand density and age affect tree-level structural and functional characteristics of young, postfire lodgepole pine in Yellowstone National Park. *Forest Ecology and Management* 320: 138-148.
- CURIEL, J.; JANSSENS, I.; CARRARA, A.; MEIRESINNE, L. y CEULEMANS, R. 2003. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology* 23: 1263-1270.
- CURTIS, P.; VOGEL, C.; GOUGH, C.; SCHMID, H.; SU, H. y BOVARD, B. 2005. Respiratory carbon losses and the carbon-use efficiency of a northern hardwood forest, 1999-2003. *New Phytologist* 167: 437-456.

- FEIKEMA, P.; MORRIS, J.; BEVERLY, C.; COLLOPY, J.; BAKER, T. y LANE, P. 2010. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+ forest growth model. *Forest Ecology and Management* 260: 663-678.
- FLORES, F. y LEE, H. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de Pino Radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque* 25(3): 11-24.
- FRÊNE, C. Y NÚÑEZ, M. 2010. Hacia un nuevo modelo forestal en Chile. *Bosque Nativo* 47:25-35.
- FUNDACIÓN CHILE. 1990. Zonas de crecimiento de Pino Radiata. En: Proyecto modelo nacional de simulación de Pino Radiata. Tomo I, Vol. 2:1-27.
- GAMARRA, J. 2001. Estimación de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* LABILL, en Junin, Perú. En: Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". 18-20 de Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 21 p.
- GERDING, V. y SCHLATTER, J. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 16(2): 39-56.
- GHOLZ, H. L. y CROPPER, W. P. 1991. Carbohydrate dynamics immature *Pinus elliottii* var. *elliottii* trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21:1742-1747.
- GHOLZ, H. y FISHER, R. 1982. Organic matter production and distribution in slash pine (*Pinus elliottii*) plantations. *Ecology* 63: 1827-1839.
- GIARDINA, C. y RYAN, M. 2002. Total belowground carbon allocation in a fast-growing *Eucalyptus* plantation estimated using a carbon balance approach. *Ecosystems* 5: 487-499.
- GIARDINA, C.; RYAN, M.; BINKLEY, D. y FOWNES, J. 2003. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. *Global Change Biology* 9: 1438-1450.
- GOWER, S.; McMURTRIE, R. y MURTY, D. 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *TREE* 11(9):378-382.
- GUTIERREZ, M. 1977. Estudio del desarrollo vegetativo de árboles jóvenes de *Pinus radiata* D. Don. Tesis de Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 85 p.
- HE, T.; GUO, X. y WILMSHURST, J.F. 2007. Comparison of different methods for measuring leaf area index in a mixed grassland. *Canadian Journal of Plant Science* 87: 803-813.
- HELMISAARI, H.; MAKKONEN, K.; KELLOMÄKI, E.; VALTONENC, E. y MÄLKÖNEN, E. 2002. Below- and above- ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in Eastern Finland. *Forest Ecology and Management* 165: 317-326.

HUBER, A. e IROUMÉ, A. 2006. Efecto de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don sobre el recurso agua en Chile. En: Climate Variability and Change - Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006). IAHS Publ. 308. IAHS Press, Wallingford, UK.

INSTITUTO FORESTAL (INFOR). 2005. Disponibilidad de madera de plantaciones de Pino Radiata en Chile: 2003-2032. Informe técnico N° 170. Concepción. Chile. 103 p.

JACKSON, D.; GIFFORD, H. y CHITTENDEN, J. 1976. Environmental variables influencing the increment of *Pinus radiata*: (2) Effects of seasonal drought on height and diameter increment. New Zealand Journal of Forestry Science 5(3):265-286.

JAGODZINSKI, A. y KALUCKA, I. 2008. Age-related changes in leaf area index of young Scots pine stands. Dendrobiology 59: 57-65.

JARVIS, P. 1995. Scaling processes and problems. Plant Cell and Environment 18: 1079-1089.

JIXIN, C.; YUN, T.; TIANSHAN, Z.; XIAOHUI, Y. y XIAOPING, W. 2014. Carbon allocation dynamics across three different-aged *Platyclusus orientalis* (L.) Franco plantations. The Forestry Chronicle 90(2): 161-168.

JOHNSEN, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; McNULTY, S. y FOX, T. 2001. Process models as tools in forestry research and management. Forest Science 47: 2-8.

JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYSA, B., COPPIN, P., WEISS, M., y BARET, F. 2004. Review of methods for *in situ* leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology 121: 19-35.

KASHIAN, D.; ROMME, W.; TINKER, D.; TURNER, M. y RYAN, M. 2013. Postfire changes in forest carbon storage over a 300-year chronosequence of *Pinus contorta*-dominated forests. Ecological Monographs 83: 49-66.

KNHOL, A.; SOE, A.; KUTSCH, W.; GÖCKEDE, M. y BUCHMANN, N. 2008. Representative estimates of soil and ecosystem respiration in an old beech forest. Plant Soil 302: 189-202.

KÜHNE, A., VILLARREL, A. y PEÑA, I. 2005. Estudio Agrológico del Área de Yungay y Ninhue, VIII Región, en el marco del proyecto "Modelo de Zonificación de Distritos de Conservación en Territorios Degradados para Planes y Programas de Conservación de Recursos Naturales". SAG. Chile. DEPROREN N°19. 120 p.

LANDSBERG, J. J. 1986. Physiological ecology of forest production. Academic Press, London. 198 p.

LANDSBERG, J. 2003. Modelling forest ecosystems: State of the art, challenges and future directions. Canadian Journal of Forest Research 33: 385-397.

- LANDSBERG, J. y GOWER, S. 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press, San Diego. 354 p.
- LANDSBERG, J. y WARING, R. 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95: 209-228.
- LITTON, M.; RYAN, M. y KNIGHT, D. 2004. Effects of tree density and stand age on carbon allocation patterns in postfire Lodgepole Pine. *Ecological Applications* 14: 460-475.
- MADWICK, H. A. I. 1994. *Pinus radiata* – biomass, form and growth. Ed. Madwick, Rotorua, New Zealand. 428 pp.
- MÄKELÄ, A. y VALENTINE, H. 2000. The ratio of NPP:GPP: evidence of change over the course of stand development. *Tree Physiology* 21: 1015-1030.
- McMURTRIE, R.; ROOK, D. y KELLIHER, F. 1990. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen, *Forest Ecology and Management* 30: 381-413.
- McMURTRIE, R. y LANDSBERG, J. 1992. Using a simulation model to evaluate the effects of water and nutrients on the growth and carbon partitioning of *Pinus radiata*, *Forest Ecology and Management* 52: 243-260.
- MORAN, G. y BELL, J. 1987. The origin and genetic diversity of *Pinus radiata* in Australia. *Theoretical and Applied Genetics* 73(4): 616-622.
- NASH, J. y SUTCLIFFE, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
- NORMAN, J. M. y CAMPBELL, G. S. 1989. Canopy Structure. En: Pearcy, R. W., Ehrlinger, J., Mooney, H. A., Rundel P.W. (eds) *Plant Physiological ecology: Field methods and instrumentation*. London: Chapman and Hall. 301-325.
- PACHECO, F.; ALDRETE, A.; GÓMEZ, A.; FIERROS, A.; CETINA-ALCALÁ, V. y VAQUERA, H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3): 251-254.
- PARDÉ, J. 1980. Forest Biomass. *Forestry Products Abstracts*. Review Article. *Commonwealth Forestry Bureau* 41(8): 343-361.
- PERRY, D. 1985. The competition process in forest stand. En M.G.R. CANNEL and J. E. JACKSON (editors). *Attributes of trees as Crop Plants*. Institute of Terrestrial Ecology, Penicuik, UK. 481-506.
- PIERCE, L. y RUNNING, S. 1988. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology* 69: 1762-1767.

- PROE, M.; RAUSCHER, H. y YARIE, J. 1994. Computer simulation models and expert systems for predicting productivity decline. In Impacts of forest harvesting on long-term site productivity Eds. W. J. Dyck, D. W. Cole and N. B. Comeford. Chapman & Hall, London. vii, 371 p.
- RIVEROS, C.; CANCINO, J. y ESPINOSA, M. 2005. Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*. Bosque 26(3): 33-44.
- RUNNING, S. W. y COUGHLAN, J. C. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hidrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. Ecological Modelling 42:125-154.
- RYAN, M. G. 1991a. Effects of climate change on plant respiration. Ecological Applications 1:157-167.
- RYAN, M. G. 1991b. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. Tree Physiology 9:255-266.
- RYAN, M.; HUBBARD, R.; PONGRACIC, S.; RAISON, R. y McMURTRIE, R. 1995. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status. Tree Physiology 16: 333-343.
- RYU, S.; CONCILIO, A.; CHEN, J.; NORTH, M. y MA, S. 2009. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in mixed-conifer forest, California. Forest Ecology and Management 257: 1324-1332.
- RODRIGUEZ, R.; ESPINOSA, M. y REAL, P. 2003. Utilización del modelo 3-PG, un modelo basado en procesos, en el análisis de la productividad de plantaciones de Pino Radiata manejado con diferentes regímenes silviculturales. Bosque 24(1): 35-45.
- SCHLATTER, J. 1977. La relación entre el suelo y plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile central. Análisis de la situación actual y planteamientos para su futuro manejo. Bosque 2(1): 12-31.
- SCHLATTER, J. y GERDING, V. 1999. Productividad en el ejemplo de seis sitios característicos de la VIII Región con *Pinus radiata* D. Don. Bosque 20(1): 65-77.
- TORAL, M.; FRATTI, A. y GONZALEZ, L. 2005. Crecimiento estacional y rentabilidad de plantaciones forestales comerciales de Pino Radiata en suelos de trumao según método de establecimiento. Bosque 26(1): 43-54.
- TORO, J. 2004. Alternativas silvícolas para aumentar la rentabilidad de las plantaciones forestales. Bosque 25(2): 101-113.
- VEGA, J. 2012. Respiración de suelos en ecosistemas esclerófilos con distintos grados de perturbación en la Reserva Nacional Roblería de los Cobres de Loncha, Región Metropolitana. Tesis de Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 35 p.

WANG, Y. y JARVIS, P. 1990. Influence of crown properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in sitka spruce: Application of a model (MAESTRO), *Tree Physiology* 7: 297-316.

WARING, R.; LANDSBERG, J. y WILLIAMS, M. 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production?. *Tree Physiology* 18: 129-134.

WARING, R. y RUNNING, S. 1998. *Forest ecosystem. Analysis at multiple scales.* Academic Press, San Diego, USA, 370 p.

## APÉNDICE 1

### Biomasa

Se calculó el incremento anual en biomasa para cada componente del árbol (fuste, ramas, follaje y raíces) y el incremento total (Cuadro 1.1). Se puede observar que existió una diferencia notoria en el incremento entre cada período, promediando 25,28 t ha<sup>-1</sup> para el período 2010-2011 y 11,00 t ha<sup>-1</sup> para el período 2011-2012.

Cuadro 1.1. Incremento anual en biomasa de cada componente en las distintas clases de edad y sitio comprendidas en el estudio, para los períodos 2010-2011 y 2011-2012.

Componente	Sitio	Clase de Edad						Sub-Total	
		0-7 años		7-14 años		14+ años		2010-2011	2011-2012
		2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012		
Biomasa total (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	28,98	23,80	36,69	24,03	27,31	16,77	<b>30,98</b>	<b>21,54</b>
	Lomas Coloradas	2,91	12,37	25,31	17,03	28,84	20,78	<b>19,02</b>	<b>16,72</b>
	Santa Bárbara	19,64	20,96	33,02	-37,94	36,08	24,32	<b>29,57</b>	<b>2,45</b>
	Tapihue	1,72	6,90	31,00	0,20	31,90	2,80	<b>21,55</b>	<b>3,29</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>13,31</b>	<b>16,01</b>	<b>31,50</b>	<b>0,83</b>	<b>31,03</b>	<b>16,17</b>	<b>25,28</b>	<b>11,00</b>
Biomasa raíces (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	3,91	3,35	2,99	2,77	2,72	2,64	<b>3,21</b>	<b>2,91</b>
	Lomas Coloradas	0,04	1,90	3,48	2,96	4,69	4,53	<b>2,73</b>	<b>3,13</b>
	Santa Bárbara	3,24	3,56	5,30	-7,70	4,99	4,47	<b>4,51</b>	<b>0,11</b>
	Tapihue	-0,07	0,79	3,66	-0,26	2,36	-0,34	<b>2,00</b>	<b>0,06</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>1,78</b>	<b>2,40</b>	<b>3,86</b>	<b>-0,56</b>	<b>3,69</b>	<b>2,83</b>	<b>3,11</b>	<b>1,55</b>
Biomasa fustes (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	21,07	17,91	32,83	21,03	23,39	13,75	<b>25,76</b>	<b>17,57</b>
	Lomas Coloradas	1,14	4,58	19,76	12,80	22,31	15,27	<b>14,41</b>	<b>10,88</b>
	Santa Bárbara	8,41	10,97	23,76	-22,72	29,60	19,36	<b>20,59</b>	<b>2,54</b>
	Tapihue	0,68	2,44	25,10	1,92	28,61	4,03	<b>18,13</b>	<b>2,80</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>7,82</b>	<b>8,98</b>	<b>25,36</b>	<b>3,26</b>	<b>25,98</b>	<b>13,10</b>	<b>19,72</b>	<b>8,45</b>
Biomasa ramas (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	2,83	1,81	1,00	0,36	1,27	0,45	<b>1,69</b>	<b>0,87</b>
	Lomas Coloradas	1,24	3,74	1,67	0,93	1,55	0,77	<b>1,49</b>	<b>1,81</b>
	Santa Bárbara	5,02	4,08	2,78	-3,66	1,39	0,53	<b>3,06</b>	<b>0,32</b>
	Tapihue	0,87	2,41	1,82	-0,32	1,01	-0,31	<b>1,24</b>	<b>0,60</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>2,49</b>	<b>3,01</b>	<b>1,82</b>	<b>-0,67</b>	<b>1,30</b>	<b>0,36</b>	<b>1,87</b>	<b>0,90</b>
Biomasa follaje (t ha <sup>-1</sup> )	Nacimiento	1,16	0,72	-0,12	-0,14	-0,07	-0,05	<b>0,32</b>	<b>0,18</b>
	Lomas Coloradas	0,49	2,15	0,40	0,32	0,29	0,23	<b>0,39</b>	<b>0,90</b>
	Santa Bárbara	2,98	2,34	1,18	-3,88	0,10	-0,04	<b>1,42</b>	<b>-0,53</b>
	Tapihue	0,23	1,25	0,44	-1,12	-0,08	-0,58	<b>0,20</b>	<b>-0,15</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>1,21</b>	<b>1,62</b>	<b>0,47</b>	<b>-1,20</b>	<b>0,06</b>	<b>-0,11</b>	<b>0,58</b>	<b>0,10</b>

Esta diferencia se debió principalmente a la ocurrencia de raleos comerciales en Santa Bárbara, en la clase de edad 7-14 años y en el sitio Tapihue en la clase de edad 7-14 y 14+ años. Lo que se ve a través del menor incremento en la biomasa fustal en Tapihue, en la

clase de edad 7-14 años, pasando desde 25,10 t ha<sup>-1</sup> en el período 2010-2011 a 1,92 t ha<sup>-1</sup> en el período 2011-2012 y de 28,61 t ha<sup>-1</sup> a 4,03 t ha<sup>-1</sup> en la clase de edad 14+ años. En el sitio Santa Bárbara es aún más notoria esta situación, pasando desde 23,76 t ha<sup>-1</sup> en el período 2010-2011 a un valor negativo en el incremento de -22,72 t ha<sup>-1</sup> en el período 2011-2012, en la clase de edad 7-14 años. Lo que se repite en la biomasa de raíces, ramas y follaje, traduciéndose en un menor incremento en la biomasa total.

Se puede observar, en la Cuadro 1.2, que en la clase de edad 0-7 años se produjo un decrecimiento en la eficiencia de crecimiento total ( $G_E$ ) en los sitios Nacimiento y Santa Bárbara, mientras que en los sitios Lomas Coloradas y Tapihue se apreció un incremento en el rendimiento al comparar ambos períodos del estudio. En las clases de edad 7-14 y 14+ años existió una disminución en la eficiencia de crecimiento total en todos los sitios, entre el período 2010-2011 y 2011-2012.

Cuadro 1.2. Eficiencia de crecimiento en biomasa de cada componente en las distintas clases de edad y sitios comprendidas en el estudio, para los períodos 2010-2011 y 2011-2012.

$G_E$ (t m <sup>-2</sup> )	Sitio	Clase de Edad							
		0-7 años		7-14 años		14+ años		Sub-Total	
		2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012
$G_E$ total (t m <sup>-2</sup> )	Nacimiento	3,10	2,34	3,19	2,12	4,15	2,57	<b>3,48</b>	<b>2,34</b>
	Lomas Coloradas	2,11	4,76	3,48	2,24	4,09	2,85	<b>3,22</b>	<b>3,29</b>
	Santa Bárbara	5,31	3,47	3,17	-	3,45	2,32	<b>3,98</b>	<b>2,90</b>
	Tapihue	1,58	3,84	2,98	0,02	3,71	0,33	<b>2,76</b>	<b>1,40</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>3,03</b>	<b>3,60</b>	<b>3,21</b>	<b>1,46</b>	<b>3,85</b>	<b>2,02</b>	<b>3,36</b>	<b>2,48</b>
$G_E$ raíces (t m <sup>-2</sup> )	Nacimiento	0,42	0,33	0,26	0,24	0,41	0,40	<b>0,36</b>	<b>0,33</b>
	Lomas Coloradas	0,03	0,73	0,48	0,39	0,66	0,62	<b>0,39</b>	<b>0,58</b>
	Santa Bárbara	0,88	0,59	0,51	-	0,48	0,43	<b>0,62</b>	<b>0,51</b>
	Tapihue	-	0,44	0,35	-	0,28	-	<b>0,32</b>	<b>0,44</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,44</b>	<b>0,52</b>	<b>0,40</b>	<b>0,32</b>	<b>0,46</b>	<b>0,48</b>	<b>0,42</b>	<b>0,46</b>
$G_E$ fustes (t m <sup>-2</sup> )	Nacimiento	2,26	1,76	2,86	1,85	3,55	2,10	<b>2,89</b>	<b>1,91</b>
	Lomas Coloradas	0,83	1,76	2,72	1,68	3,16	2,10	<b>2,24</b>	<b>1,85</b>
	Santa Bárbara	2,27	1,82	2,28	-	2,83	1,85	<b>2,46</b>	<b>1,84</b>
	Tapihue	0,62	1,36	2,42	0,18	3,33	0,48	<b>2,12</b>	<b>0,67</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>1,49</b>	<b>1,67</b>	<b>2,57</b>	<b>1,24</b>	<b>3,22</b>	<b>1,63</b>	<b>2,43</b>	<b>1,56</b>
$G_E$ ramas (t m <sup>-2</sup> )	Nacimiento	0,30	0,18	0,09	0,03	0,19	0,07	<b>0,19</b>	<b>0,09</b>
	Lomas Coloradas	0,90	1,44	0,23	0,12	0,22	0,11	<b>0,45</b>	<b>0,56</b>
	Santa Bárbara	1,36	0,68	0,27	-	0,13	0,05	<b>0,59</b>	<b>0,37</b>
	Tapihue	0,79	1,34	0,18	-	0,12	-	<b>0,36</b>	<b>1,34</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,84</b>	<b>0,91</b>	<b>0,19</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,40</b>	<b>0,59</b>
$G_E$ follaje (t m <sup>-2</sup> )	Nacimiento	0,12	0,07	-	-	-	-	<b>0,12</b>	<b>0,07</b>
	Lomas Coloradas	0,35	0,83	0,05	0,04	0,04	0,03	<b>0,15</b>	<b>0,30</b>
	Santa Bárbara	0,81	0,39	0,11	-	0,01	0,00	<b>0,31</b>	<b>0,20</b>
	Tapihue	0,21	0,70	0,04	-	-	-	<b>0,13</b>	<b>0,70</b>
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,37</b>	<b>0,50</b>	<b>0,07</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,18</b>	<b>0,32</b>

## Volumen

Existe una disminución en el incremento en volumen al comparar los períodos 2010-2011 y 2011-2012, en las clases de edad 7-14 y 14+ años en todos los sitios. Además se puede observar que en la clase de edad 7-14 años se produjo el valor máximo de incremento en volumen en Nacimiento y Tapihue (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Incremento en volumen en las distintas clases de edad y sitios comprendidos en el estudio, para los períodos 2010-2011 y 2011-2012.

V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Clase de Edad							
	0-7 años		7-14 años		14+ años		Sub-Total	
	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012
Nacimiento	38,29	32,40	53,16	34,32	42,48	25,98	<b>44,64</b>	<b>30,90</b>
Lomas Coloradas	0,85	7,23	36,81	35,03	45,02	33,35	<b>27,56</b>	<b>25,20</b>
Santa Bárbara	14,66	20,31	46,98	-47,65	53,10	41,40	<b>38,25</b>	<b>4,69</b>
Tapihue	0,27	3,13	44,03	4,42	41,65	2,59	<b>28,65</b>	<b>3,38</b>
<b>Sub-Total</b>	<b>13,52</b>	<b>15,77</b>	<b>45,24</b>	<b>6,53</b>	<b>45,56</b>	<b>25,83</b>	<b>34,77</b>	<b>16,04</b>

En el Cuadro 1.4, se puede observar que los valores de eficiencia en el período 2010-2011, en la clase de edad 0-7 años, fueron similares entre los sitios Nacimiento y Santa Bárbara, mientras que los sitios Lomas Coloradas y Tapihue presentaron valores inferiores a uno. En el período 2011-2012, si bien la eficiencia disminuyó en Nacimiento y Santa Bárbara, aumentó considerablemente en Lomas Coloradas y en menor medida en Tapihue.

La clase de edad 7-14 años tuvo una eficiencia de crecimiento similar en todos los sitios durante el período 2010-2011, mientras que en el período 2011-2012, se ven los efectos de los raleos en la eficiencia de crecimiento en los sitios Santa Bárbara y Tapihue, que presentaron una eficiencia negativa por la disminución del volumen debido a los raleos.

Cuadro 1.4. Eficiencia de crecimiento en volumen en las distintas clases de edad y sitios comprendidas en el estudio, para los períodos 2010-2011 y 2011-2012.

$G_E$ (m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> )	Clase de Edad							
	0-7 años		7-14 años		14+ años		Sub-Total	
	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012
Nacimiento	4,16	3,23	4,65	3,03	6,47	3,99	<b>5,09</b>	<b>3,42</b>
Lomas Coloradas	0,60	2,82	5,09	4,64	6,43	4,62	<b>4,04</b>	<b>4,02</b>
Santa Bárbara	4,12	3,46	4,59	-	5,11	3,97	<b>4,60</b>	<b>3,72</b>
Tapihue	0,24	1,79	4,29	-	4,87	-	<b>3,13</b>	<b>1,79</b>
<b>Sub-Total</b>	<b>2,28</b>	<b>2,83</b>	<b>4,65</b>	<b>3,83</b>	<b>5,72</b>	<b>4,19</b>	<b>4,22</b>	<b>3,24</b>

En la clase de edad 14+ años, durante el período 2010-2011, se observa que Nacimiento y Lomas Coloradas obtuvieron un valor de eficiencia muy similar entre sí. Santa Bárbara y Tapihue obtuvieron valores inferiores a los otros dos sitios. En el período 2011-2012, los valores de Nacimiento, Lomas Coloradas y Santa Bárbara fueron similares y fluctuaron en un rango entre 3,95 y 4,65 m<sup>3</sup>m<sup>-2</sup>.

## APÉNDICE 2

### Productividad primaria neta aérea

El cálculo de ANPP se realizó usando la Ec 10. Durante el período 2010-2011, hubo un incremento negativo en el follaje ( $\Delta C_c$ ) en las clases de edad 7-14 y 14+ años en Nacimiento y en la clase de edad 14+ años en Tapihue, situación que se repitió en el período 2011-2012, al que se le agrega la clase de edad 7-14 años de Tapihue y las clases de edad 7-14 y 14+ años en Santa Bárbara. Además se apreció un decrecimiento en el valor de la biomasa de la madera ( $\Delta C_w$ ), debido a raleos acaecidos en la clase de edad 7-14 años en el sitio Santa Bárbara durante el mes de Agosto del año 2012 (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Componentes de la productividad primaria neta aérea por sitio y por clase de edad. Dónde  $F_a$  corresponde al flujo de carbono asociado a la caída de hojarasca,  $\Delta C_c$  al incremento en el contenido de carbono del follaje,  $\Delta C_w$  al incremento en el contenido de carbono de la madera y ANPP a la productividad primaria neta aérea.

Sitio	Clase de edad (años)	2010-2011				2011-2012			
		$F_a$	$\Delta C_c$	$\Delta C_w$	ANPP	$F_a$	$\Delta C_c$	$\Delta C_w$	ANPP
		(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )				(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )			
Nacimiento	0-7	3,91	0,54	11,31	15,77	3,69	0,40	10,50	14,59
	7-14	5,35	-0,05	16,16	21,46	4,34	-0,08	11,45	15,72
	14+	7,54	-0,03	11,86	19,37	6,84	-0,03	7,57	14,38
	<b>Sub-Total</b>	<b>5,60</b>	<b>0,15</b>	<b>13,11</b>	<b>18,87</b>	<b>4,96</b>	<b>0,10</b>	<b>9,84</b>	<b>14,89</b>
Lomas Coloradas	0-7	5,86	0,18	0,97	7,00	5,55	1,14	4,38	11,08
	7-14	8,35	0,19	10,19	18,73	9,90	0,24	9,70	19,83
	14+	9,09	0,14	11,36	20,59	8,71	0,12	8,59	17,42
	<b>Sub-Total</b>	<b>7,77</b>	<b>0,17</b>	<b>7,51</b>	<b>15,44</b>	<b>8,05</b>	<b>0,50</b>	<b>7,56</b>	<b>16,11</b>
Santa Bárbara	0-7	4,56	1,38	6,31	12,26	2,94	1,26	8,00	12,20
	7-14	4,99	0,58	12,85	18,42	3,68	-1,93	-12,77	-11,02
	14+	6,39	0,31	15,96	22,66	6,29	-0,03	10,29	16,56
	<b>Sub-Total</b>	<b>5,31</b>	<b>0,76</b>	<b>11,71</b>	<b>17,78</b>	<b>4,30</b>	<b>-0,23</b>	<b>1,84</b>	<b>5,91</b>
Tapihue	0-7	0,75	0,39	0,74	1,87	0,62	0,68	2,61	3,90
	7-14	6,11	0,20	12,38	18,69	4,85	-0,54	1,87	6,17
	14+	6,28	-0,04	13,78	20,03	5,79	-0,30	2,56	8,05
	<b>Sub-Total</b>	<b>4,38</b>	<b>0,18</b>	<b>8,97</b>	<b>13,53</b>	<b>3,75</b>	<b>-0,05</b>	<b>2,35</b>	<b>6,04</b>

En la Figura 2.1, se puede observar como  $\Delta C_w$  fue el componente más importante de ANPP, como era de esperar se obtuvo una relación significativa entre  $\Delta C_w$  y ANPP para el período 2010-2011 ( $r^2=0,91$ ;  $P<0,001$ ) y para el período 2011-2012 ( $r^2=0,93$ ;  $P<0,001$ ), debido a que el fuste fue el componente del árbol que vió mayor incremento en su biomasa durante el año.

Durante el período 2010-2011 existió una relación inversa entre  $\Delta C_c$  y ANPP, lo que resultó contradictorio, puesto que en el período 2011-2012 la relación fue positiva, además poseyó una baja correlación y no fue significativa ( $r^2=0,11$ ;  $P=0,285$ ).

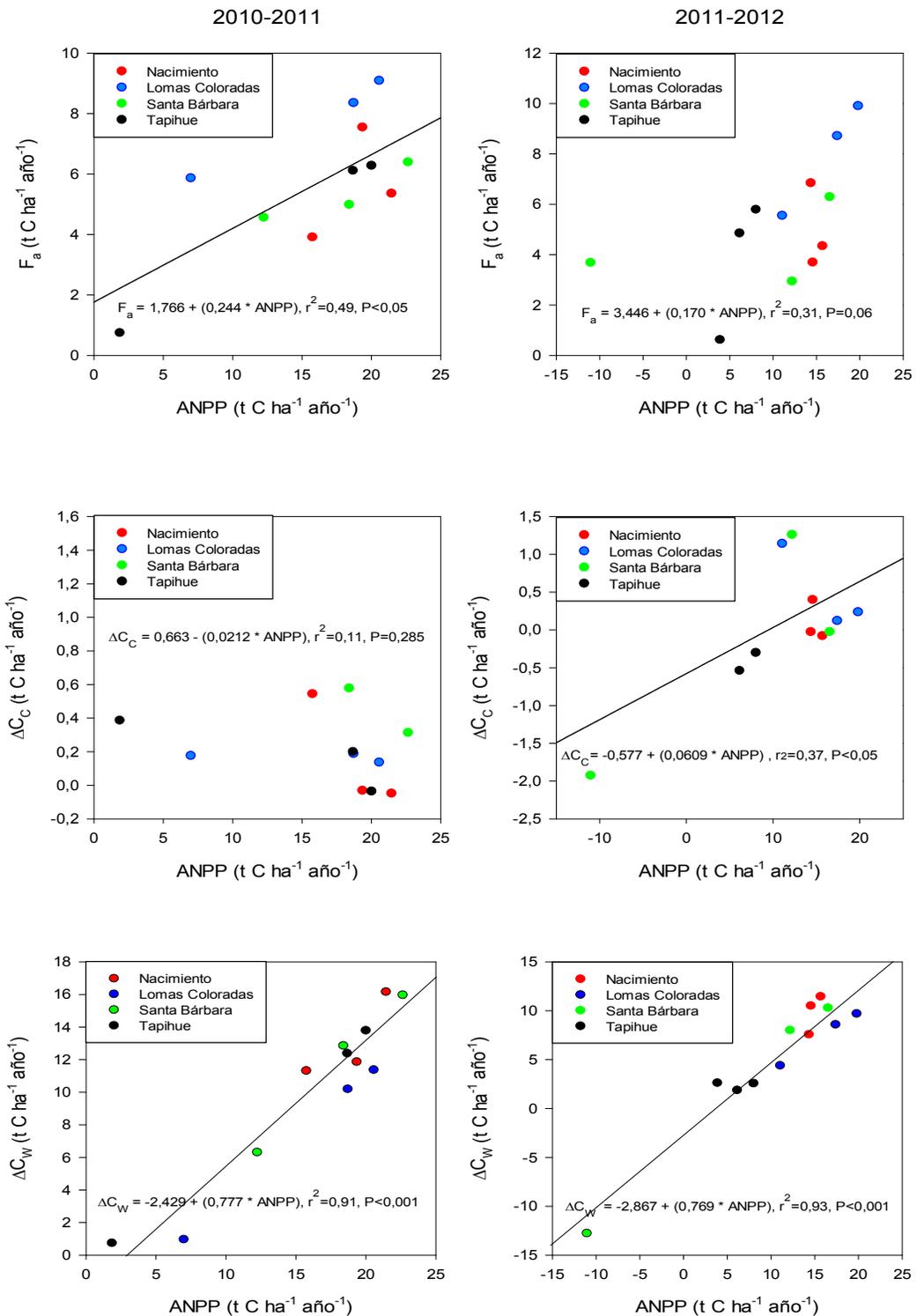


Figura 2.1. Relación entre cada componente y la productividad primaria neta aérea para el período 2010-2011 y el período 2011-2012.

En el caso de ANPP, no se encontraron diferencias significativas entre sitios para el período 2010-2011 ( $F_{3,32}=1,21$ ,  $P=0,32$ ). Para el período 2011-2012, si se encontraron diferencias significativas ( $F_{3,32}=3,84$ ,  $P=0,02$ ), por lo que se aplicó el test de Tukey, quedando en un grupo los sitios Nacimiento y Lomas Coloradas y en otro grupo los sitios Santa Bárbara y Tapihue, este resultado se ve afectado por la ocurrencia de raleos en el período 2011-2012 (Figura 2.2).

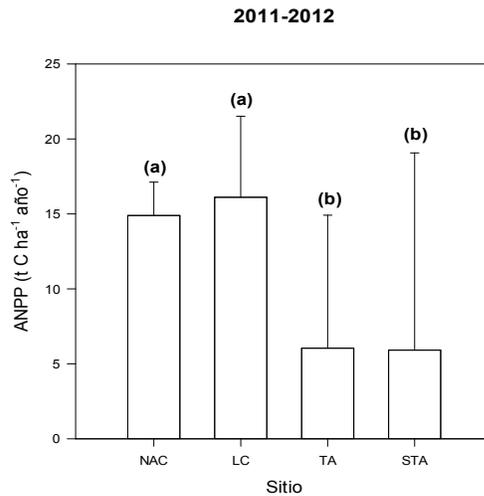


Figura 2.2. ANPP para los sitios. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

La comparación entre clases de edad mostró diferencias significativas para el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=26,29$ ,  $P<0,001$ ), mientras que para el período 2011-2012 ( $F_{2,33}=1,95$ ,  $P<0,5$ ) no existieron diferencias significativas. Las diferencias existentes son entre las clases de edad 0-7 y 7-14 años y las clases de edad 0-7 y 14+ años, pero no entre las clases de edad 7-14 y 14+ años. Este resultado muestra una tendencia general en el comportamiento de ANPP respecto a la edad (Figura 2.3).

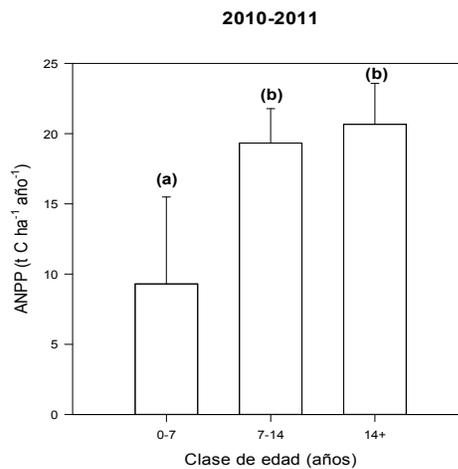


Figura 2.3. ANPP para las tres clases de edad estudiadas. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

## Respiración aérea de la planta

Para calcular APR se utilizó la Ec 11. La respiración de mantención del follaje ( $L_{RM}$ ) es el principal componente de APR, seguido por la respiración de construcción y mantención de la madera ( $W_R$ ), mientras que la respiración de construcción del follaje ( $L_{RC}$ ) aporta con una pequeña parte del total de APR.

En el Cuadro 2.2, se observa que el componente  $L_{RC}$  tuvo una baja influencia en el valor de APR, explicando un 2% del valor total. Mientras que  $W_R$  explicó un 34% y  $L_{RM}$  un 64% del valor total de APR para el período 2010-2011. En el período 2011-2012,  $L_{RM}$  siguió siendo el componente que más aportó al valor total de APR con un 82%, seguido por  $W_R$  con un 17% y  $L_{RC}$  con un 1%.

APR fue superior en Nacimiento presentando los valores más altos de producción aérea durante ambos períodos del ensayo. Los valores negativos de  $L_{RC}$  se explican por un decrecimiento en la biomasa de follaje durante ambos períodos, debido a la edad y raleos en los sitios Santa Bárbara y Tapihue, además el valor negativo de  $W_R$  en Santa Bárbara, en la clase de edad 7-14 años específicamente, se explica por los raleos mencionados anteriormente.

Cuadro 2.2. Componentes de la respiración aérea de la planta por sitio y por clase de edad. Dónde  $L_{RC}$  corresponde a la respiración de construcción del follaje,  $L_{RM}$  a la respiración de mantención del follaje,  $W_R$  a la respiración de construcción y mantención de la madera y APR a la respiración aérea de la planta.

Sitio	Clase de edad (años)	2010-2011				2011-2012			
		$L_{RC}$	$L_{RM}$	$W_R$	APR	$L_{RC}$	$L_{RM}$	$W_R$	APR
		(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )				(t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )			
Nacimiento	0-7	0,14	6,03	2,83	9,00	0,10	6,76	2,63	9,48
	7-14	-0,01	7,44	4,04	11,47	-0,02	7,56	2,86	10,40
	14+	-0,01	4,26	2,96	7,22	-0,01	4,35	1,89	6,23
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,04</b>	<b>5,91</b>	<b>3,28</b>	<b>9,23</b>	<b>0,02</b>	<b>6,22</b>	<b>2,46</b>	<b>8,71</b>
Lomas Coloradas	0-7	0,04	0,81	0,24	1,09	0,29	1,55	1,10	2,93
	7-14	0,05	4,23	2,55	6,82	0,06	3,77	2,42	6,25
	14+	0,03	4,10	2,84	6,98	0,03	4,44	2,15	6,61
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,04</b>	<b>3,05</b>	<b>1,88</b>	<b>4,96</b>	<b>0,12</b>	<b>3,25</b>	<b>1,89</b>	<b>5,26</b>
Santa Bárbara	0-7	0,35	2,14	1,58	4,07	0,31	3,83	2,00	6,15
	7-14	0,14	6,15	3,21	9,51	-0,48	7,04	-3,19	3,37
	14+	0,08	6,18	3,99	10,25	-0,01	6,74	2,57	9,30
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,19</b>	<b>4,83</b>	<b>2,93</b>	<b>7,94</b>	<b>-0,06</b>	<b>5,87</b>	<b>0,46</b>	<b>6,27</b>
Tapihue	0-7	0,10	0,73	0,19	1,02	0,17	1,21	0,65	2,03
	7-14	0,05	6,86	3,09	10,01	-0,13	7,35	0,47	7,68
	14+	-0,01	5,67	3,45	9,11	-0,08	5,87	0,64	6,43
	<b>Sub-Total</b>	<b>0,05</b>	<b>4,42</b>	<b>2,24</b>	<b>6,71</b>	<b>-0,01</b>	<b>4,81</b>	<b>0,59</b>	<b>5,38</b>

La relación entre  $L_{RM}$  y APR, para el período 2010-2011, fue altamente significativa ( $r^2=0,98$ ,  $P<0,001$ ), así como entre  $W_R$  y APR para el mismo período ( $r^2=0,84$ ,  $P<0,001$ ). Para el período 2011-2012, el ajuste entre  $L_{RM}$  y APR fue menor que en el período anterior ( $r^2=0,54$ ,  $P<0,01$ ), situación similar ocurrió entre  $W_R$  y APR ( $r^2=0,39$ ,  $P<0,05$ ). La relación entre  $L_{RC}$  y APR, para ambos períodos, no fue significativa y presentó un bajo ajuste (Figura 2.4).

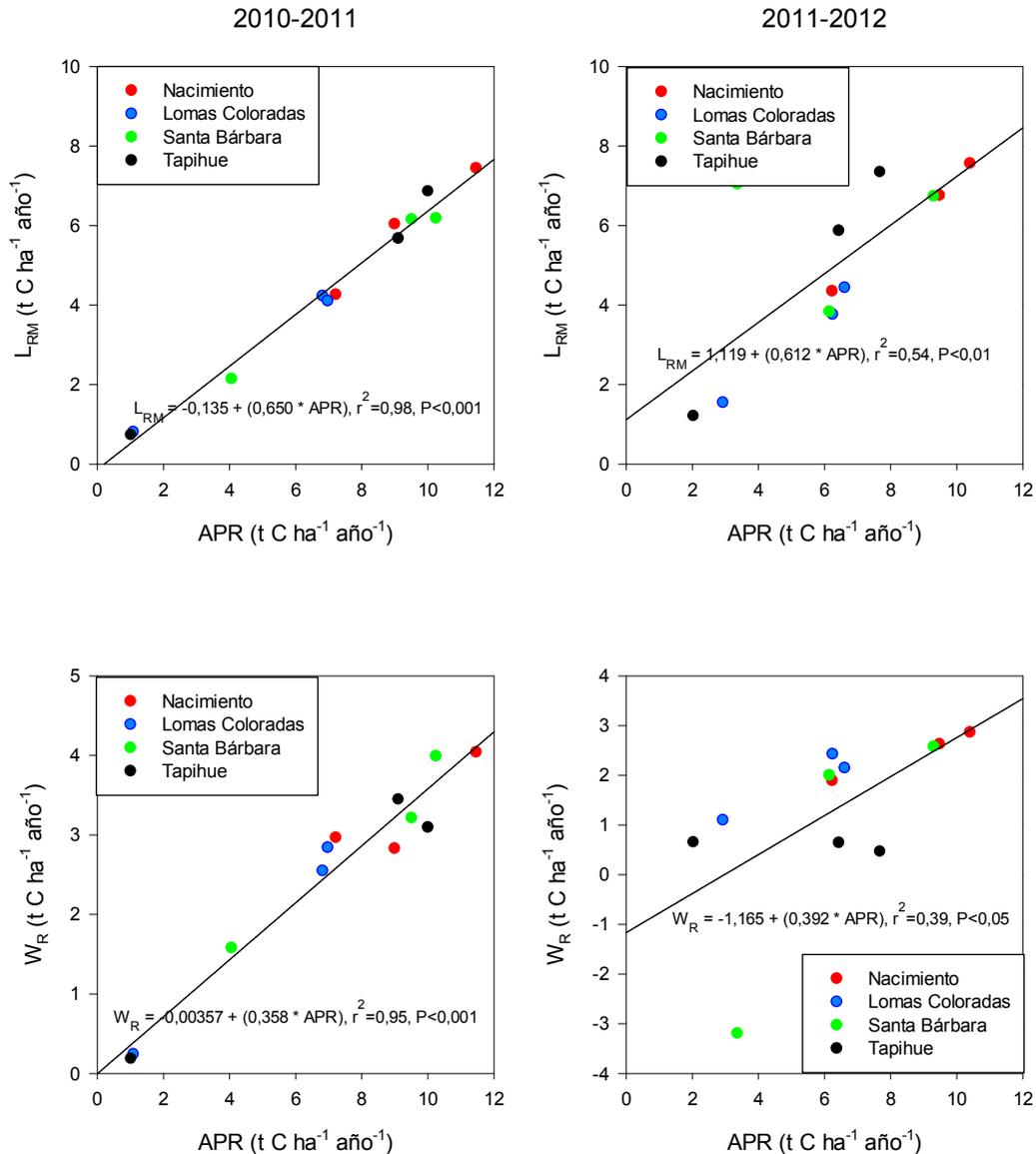


Figura 2.4. Relación entre los dos componentes principales ( $L_{RC}$  y  $W_R$ ) y la respiración aérea de la planta (APR).

El análisis de varianza realizado a APR entre sitios, presentó diferencias significativas para ambos períodos. En el período 2010-2011 ( $F_{3,32}=2,91$ ,  $P<0,05$ ), la diferencia se encontró entre los sitios Nacimiento (NAC) y Lomas Coloradas (LC). En el período 2011-2012 ( $F_{3,32}=3,65$ ,  $P<0,05$ ) se encontraron diferencias significativas entre los sitios Nacimiento y Tapihue (TA) y Nacimiento y Lomas Coloradas (Figura 2.5).

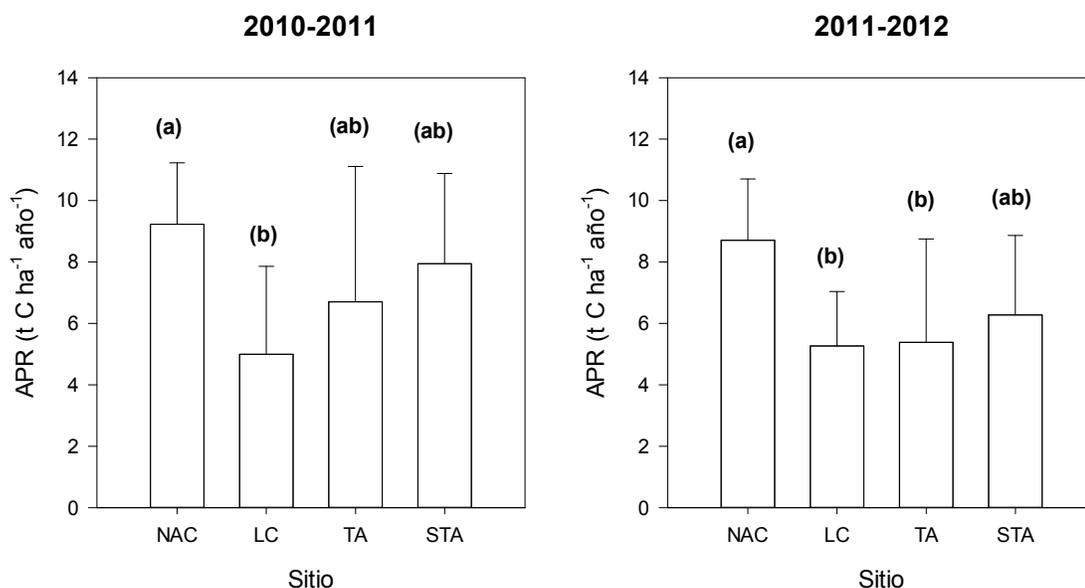


Figura 2.5. APR para los cuatro sitios en estudio en ambos periodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

El análisis de varianza de las clases de edad mostró diferencias significativas para el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=18,24$ ,  $P<0,001$ ) entre las clases de edad 0-7 y 7-14 años y las clases de edad 7-14 y 14+ años, mientras que para el período 2011-2012 ( $F_{2,33}=1,96$ ,  $P=0,156$ ) no hubieron diferencias significativas. Este resultado muestra una tendencia general de APR respecto a la edad (Figura 2.6).

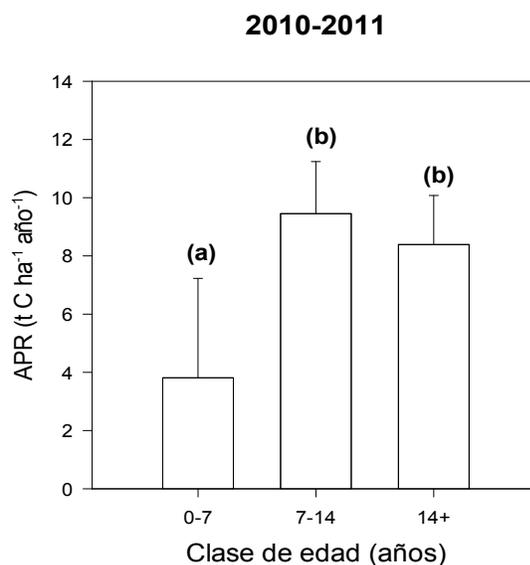


Figura 2.6. APR para las tres clases de edad en estudio. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey.

## Carbono total asimilado bajo el suelo

Como se mencionó anteriormente, para el cálculo de TBCF se utilizó la Ec 12. Los valores de las variables pérdida de carbono por lixiviación (FE), cambio de carbono en el suelo mineral ( $\Delta C_S$ ) y cambio en la capa de litera ( $\Delta C_L$ ) fueron asumidos como cero, la ecuación de TBCF quedó simplificada a la suma de la respiración de suelos ( $F_S$ ) y el incremento en el contenido de carbono de raíces ( $\Delta C_R$ ). Estos valores se pueden observar en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Componentes del carbono total asimilado bajo el suelo por sitio y por clase de edad. Dónde,  $F_S$  corresponde a la respiración de suelos,  $\Delta C_R$  al incremento en el contenido de carbono de raíces y TBCF al carbono total asimilado bajo el suelo.

Sitio	Clase de edad (años)	2010-2011			2011-2012		
		$F_S$	$\Delta C_R$ (t C ha <sup>-1</sup> )	TBCF	$F_S$	$\Delta C_R$ (t C ha <sup>-1</sup> )	TBCF
Nacimiento	0-7	17,10	1,83	18,93	14,53	1,81	16,33
	7-14	17,04	1,43	18,48	14,83	1,44	16,27
	14+	17,12	1,25	18,37	14,87	1,42	16,29
	<b>Sub-total</b>	<b>17,09</b>	<b>1,51</b>	<b>18,59</b>	<b>14,74</b>	<b>1,56</b>	<b>16,30</b>
Lomas Coloradas	0-7	11,51	0,21	11,72	14,42	0,99	15,41
	7-14	17,01	1,61	18,62	16,79	2,20	19,00
	14+	14,43	2,19	16,61	13,99	2,42	16,41
	<b>Sub-total</b>	<b>14,32</b>	<b>1,34</b>	<b>15,65</b>	<b>15,07</b>	<b>1,87</b>	<b>16,94</b>
Santa Bárbara	0-7	17,32	1,54	18,86	14,14	1,90	16,04
	7-14	11,34	2,55	13,89	13,89	-3,75	10,15
	14+	16,27	3,07	19,34	14,82	2,35	17,16
	<b>Sub-total</b>	<b>14,98</b>	<b>2,38</b>	<b>17,36</b>	<b>14,28</b>	<b>0,17</b>	<b>14,45</b>
Tapihue	0-7	10,29	0,08	10,37	13,65	0,42	14,08
	7-14	10,54	1,66	12,20	11,07	0,04	11,10
	14+	9,78	1,13	10,90	9,76	-0,12	9,64
	<b>Sub-total</b>	<b>10,20</b>	<b>0,95</b>	<b>11,16</b>	<b>11,49</b>	<b>0,11</b>	<b>11,61</b>

La respiración de suelo representó entre un 82 a un 99% del carbono asimilado bajo el suelo, con un promedio de 90% para el período 2010-2011 y un 94% para el período 2011-2012. Se observaron valores de  $\Delta C_R$  negativos en la clase de edad 7-14 años del sitio Santa Bárbara y en la clase de edad 14+ años del sitio Tapihue, esto se explica debido a la realización de raleos en dichos sitios, lo que disminuyó la biomasa de raíces.

La relación entre el  $F_S$  y el TBCF (Figura 2.7) fue significativa en el período 2010-2011 ( $r^2=0,95$ ;  $P<0,001$ ), también lo fue para el período 2011-2012 ( $r^2=0,72$ ;  $P<0,001$ ). La relación entre  $\Delta C_R$  y TBCF, no fue significativa para el período 2010-2011 ( $r^2=0,32$ ;  $P=0,055$ ) y si lo fue para el período 2011-2012 ( $r^2=0,68$ ;  $P<0,001$ ).

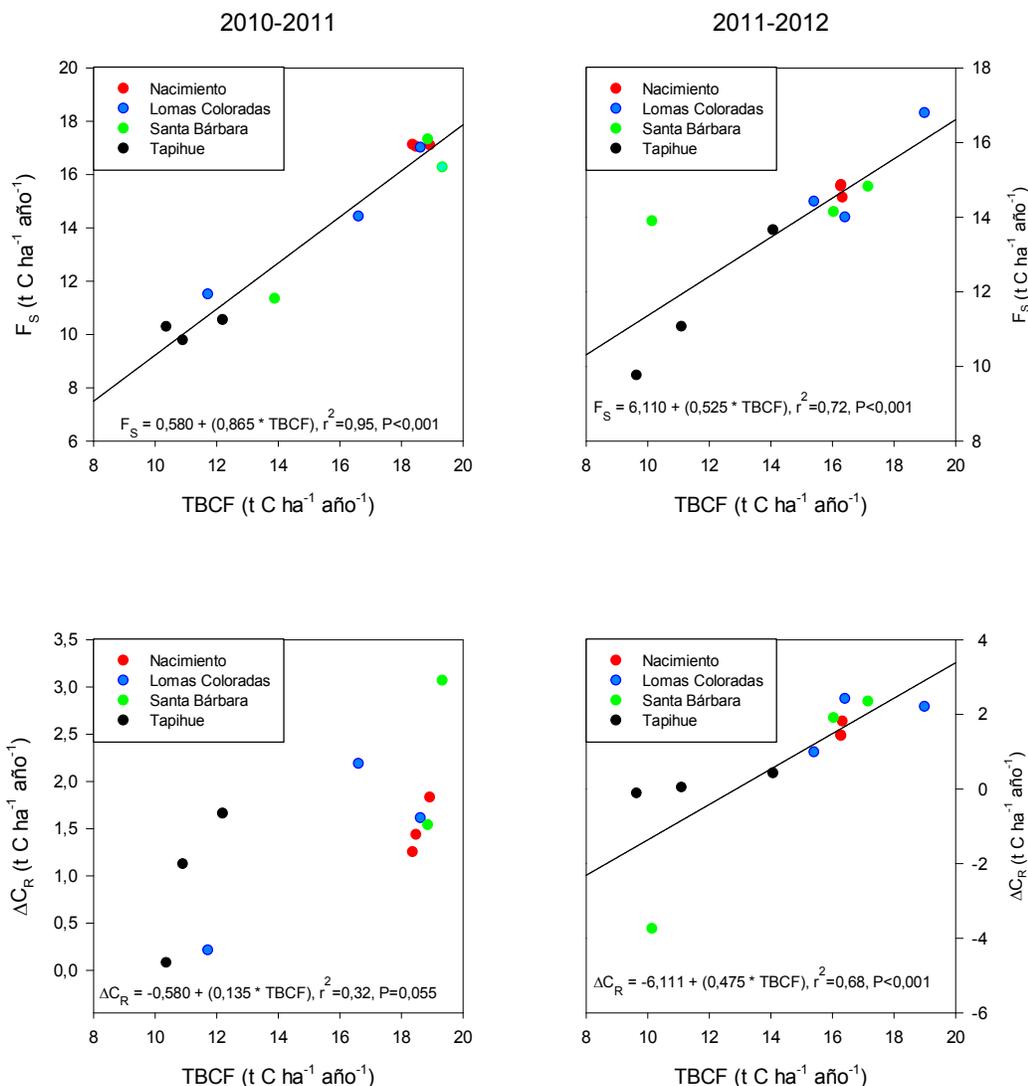


Figura 2.7. Relación entre la respiración de suelos ( $F_S$ ) y el carbono total asimilado bajo el suelo (TBCF) para el periodo 2010-2011 y el periodo 2011-2012.

En el análisis de varianza se identificaron diferencias significativas para los sitios en el periodo 2010-2011 ( $F_{3,32}=10,95, P<0,001$ ) entre Nacimiento y Tapihue, Santa Bárbara y Tapihue y Lomas Coloradas y Tapihue. Para el periodo 2011-2012 ( $F_{3,32}=6,92, P<0,005$ ) entre Lomas Coloradas y Tapihue y Nacimiento y Tapihue (Figura 2.8). Entre clases de edad no se encontraron diferencias significativas para el periodo 2010-2011 ( $F_{2,33}=0,33, P=0,73$ ), ni tampoco para el periodo 2011-2012 ( $F_{2,33}=0,46, P=0,63$ ).

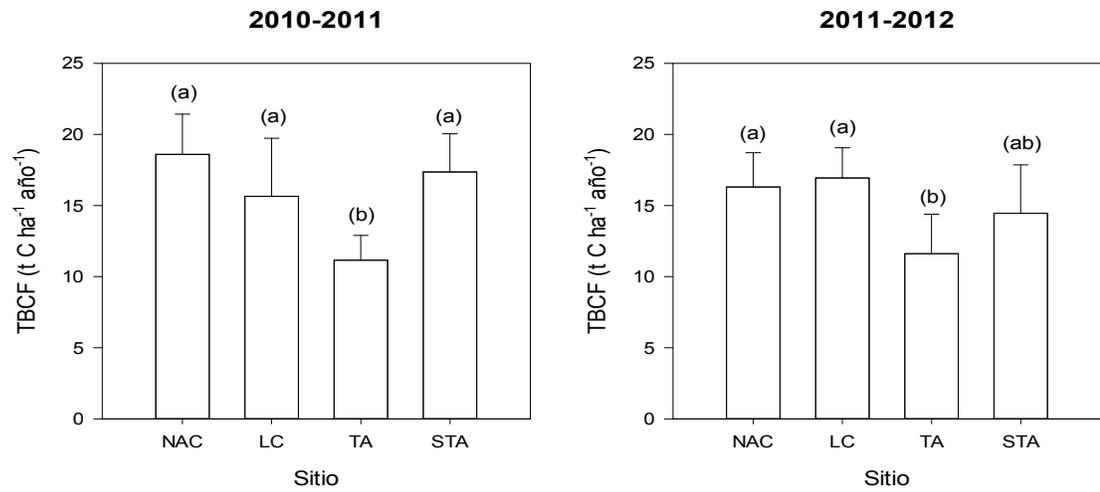


Figura 2.8. TBCF para los cuatro sitios en estudio en ambos períodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

### APÉNDICE 3

#### Respiración heterotrófica y autotrófica

La respiración autotrófica es la respiración de las plantas; de sus hojas, ramas, troncos y raíces; corresponde a la respiración mitocondrial que permite transformar carbohidratos fijados en fotosíntesis en energía para la mantención de tejidos, crecimiento de nuevos tejidos y procesos activos de absorción de nutrientes desde el suelo. La respiración heterotrófica es la respiración de los organismos del suelo como bacterias, hongos, protozoos, lombrices, insectos, entre otros; que ayudan a descomponer y mineralizar la materia orgánica del suelo proveyendo nutrientes a las plantas. La mayor componente de respiración a nivel ecosistémico es la respiración de los suelos que contempla una componente autotrófica (raíces y micorrizas) y una componente heterotrófica (organismos del suelo).

En el período 2010-2011, el sitio Nacimiento presentó la mayor tasa de respiración de suelo, mientras Tapihue poseyó la menor. En el período 2011-2012, Tapihue nuevamente tuvo la menor tasa de respiración, mientras que Lomas Coloradas la mayor, a diferencia del período anterior en que Nacimiento mostraba la mayor tasa de respiración (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Respiración de suelos en cada clase de edad y sitio, para ambos períodos del ensayo, 2011 (Agosto de 2010 a Agosto de 2011) y 2012 (Agosto de 2011 a Agosto de 2012).

R <sub>s</sub> (g CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> )	Clase de edad							
	0-7 años		7-14 años		14+ años		Sub-total	
	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012
Nacimiento	0,72	0,61	0,71	0,62	0,72	0,62	<b>0,72</b>	<b>0,62</b>
Lomas Coloradas	0,48	0,60	0,71	0,70	0,60	0,59	<b>0,60</b>	<b>0,63</b>
Tapihue	0,43	0,57	0,44	0,46	0,41	0,41	<b>0,43</b>	<b>0,48</b>
Santa Bárbara	0,73	0,59	0,47	0,58	0,68	0,62	<b>0,63</b>	<b>0,60</b>
<b>Sub-total</b>	<b>0,59</b>	<b>0,59</b>	<b>0,59</b>	<b>0,59</b>	<b>0,60</b>	<b>0,56</b>	<b>0,59</b>	<b>0,58</b>

R <sub>s</sub> (t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Clase de edad							
	0-7 años		7-14 años		14+ años		Sub-total	
	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012	2010-2011	2011-2012
Nacimiento	17,10	14,53	17,04	14,83	17,12	14,87	<b>17,09</b>	<b>14,74</b>
Lomas Coloradas	11,51	14,42	17,01	16,79	14,43	13,99	<b>14,32</b>	<b>15,07</b>
Tapihue	10,29	13,65	10,54	11,07	9,78	9,76	<b>10,20</b>	<b>11,49</b>
Santa Bárbara	17,32	14,14	11,34	13,89	16,27	14,82	<b>14,98</b>	<b>14,28</b>
<b>Sub-total</b>	<b>14,05</b>	<b>14,19</b>	<b>13,98</b>	<b>14,15</b>	<b>14,40</b>	<b>13,36</b>	<b>14,15</b>	<b>13,90</b>

También se puede observar que en la clase de edad 0-7 años, hubo un incremento en la respiración de suelos de un año al siguiente en los sitios Lomas Coloradas y Tapihue, mientras que Nacimiento y Santa Bárbara, presentaron una disminución en la respiración de suelos. En las otras dos clases de edad hubo una disminución de la respiración de suelos, excepto en Tapihue y Santa Bárbara, en la clase de edad 7-14 años que se produjo un aumento en  $R_s$ .

En el sitio Nacimiento hubo valores similares en las tres clases de edad, en ambos períodos, Lomas Coloradas presentó un máximo en la respiración de suelos en la clase de edad 7-14 años, Tapihue un valor máximo en el período 2010-2011 en la clase de edad 0-7 años y Santa Bárbara valores mínimos en la clase de edad 7-14 años.

Se realizó un análisis de varianza para ver si existían diferencias entre los sitios y las clases de edad (Figura 3.1), encontrándose diferencias significativas con respecto al sitio en el período 2010-2011 ( $F_{3,32}=9,54$ ,  $P<0,001$ ) y en el período 2011-2012 ( $F_{3,32}=6,84$ ,  $P<0,01$ ), en ambos casos el sitio Tapihue es el que presentó las diferencias con los otros tres sitios. En el caso de las clases de edad no se encontraron diferencias significativas en el período 2010-2011 ( $F_{2,33}=0,04$ ,  $P=0,96$ ) ni en el período 2011-2012 ( $F_{2,33}=0,64$ ,  $P=0,53$ ).

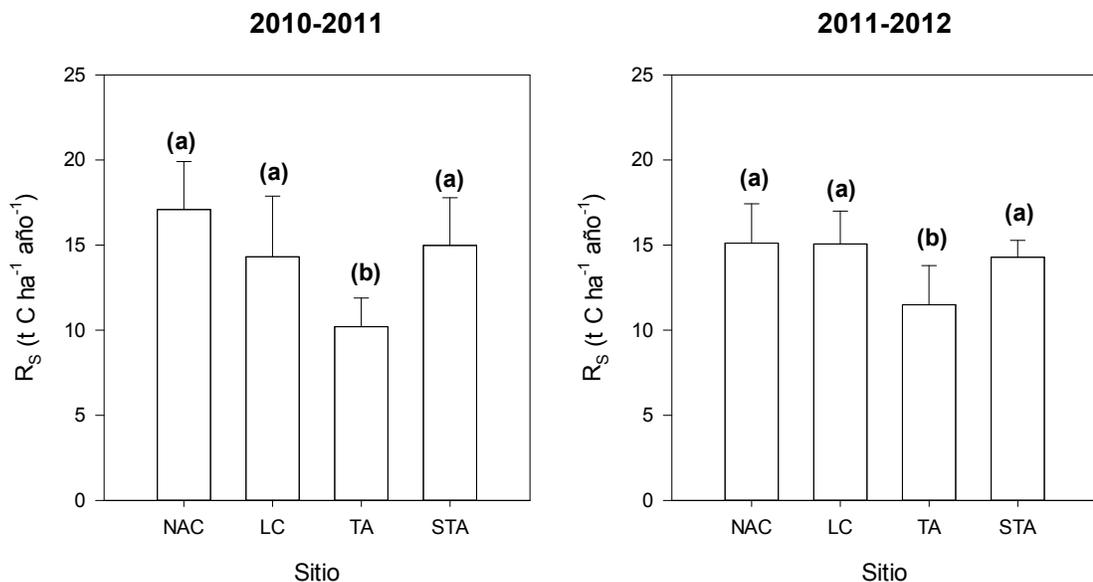


Figura 3.1. Respiración de suelos para los cuatro sitios en estudio en ambos períodos. Las letras indican diferencias significativas, al 95% de confianza entre los tratamientos, determinadas con el test de Tukey. NAC: Nacimiento; LC: Lomas Coloradas; TA: Tapihue; STA: Santa Bárbara.

## APÉNDICE 4

Para la modelación de las variables dasométricas de las parcelas estudiadas, se utilizó el modelo de crecimiento 3-PG a base de la información climática, fisiológica y de suelos, recolectada durante los dos años de duración del ensayo, en las cuatro zonas de crecimiento más importantes de la Región del Bío Bío, representadas por los sitios Nacimiento, Lomas Coloradas, Santa Bárbara y Tapihue.

Los parámetros del modelo fueron los mismos a excepción de las relaciones alométricas y el modificador de agua disponible en el suelo corregido de acuerdo a la clase textural.

Landsberg y Waring (1997) propusieron un modificador de agua disponible en el suelo que reduce la eficiencia en el uso de una unidad de radiación, al regular la conductancia estomática: mientras mayor es la humedad del suelo hasta capacidad de campo, el modificador aumenta, mientras que en la medida que disminuye la humedad del suelo hasta el punto de marchitez permanente, este valor se aproxima a cero. Además se reconoce que el mismo contenido de humedad genera distintas cantidades de agua disponible para las distintas clases texturales de los suelos y proponen lo graficado en la Figura 4.1

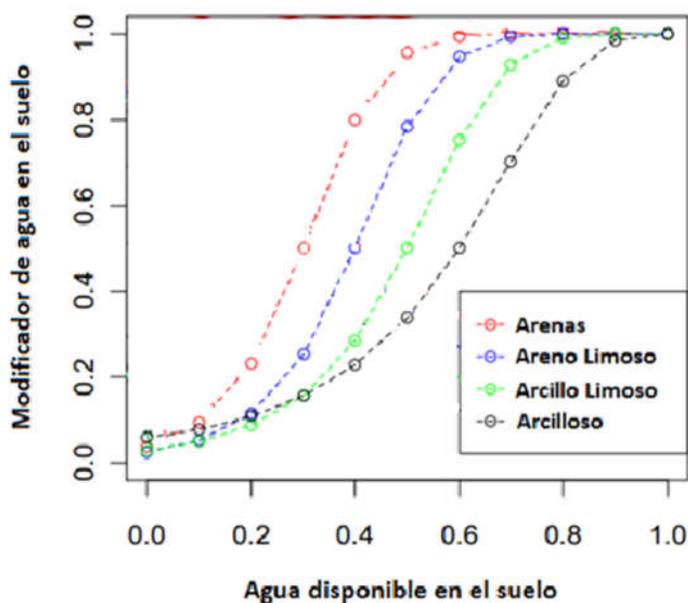


Figura 4.1. El modificador de humedad del suelo reduce la efectividad de una unidad de radiación en la medida que la falta de agua en el suelo disminuye la conductancia estomática. Los valores para arenas son 0,7 y 9, para arena limoso 0,6 y 7, para arcillo limoso 0,5 y 5 y para arcilloso 0,4 y 3.

El Cuadro 4.1 muestra los valores de los parámetros utilizados para la modelación de los sitios Nacimiento, Lomas Coloradas, Santa Bárbara y Tapihue respectivamente.

Cuadro 4.1. Valores de los parámetros utilizados para la modelación de los sitios.

Parámetro	Unidades	Nacimiento	Lomas Coloradas	Santa Bárbara	Tapihue
<b>Allometric relationships &amp; partitioning</b>					
Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm	-	0,8	0,8	0,8	0,8
Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm	-	0,4	0,4	0,4	0,4
Constant in the stem mass v. diam. relationship	-	0,0062	0,0062	0,00625	0,007
Power in the stem mass v. diam. relationship	-	3,16	3,143	3,09	3,135
Maximum fraction of NPP to roots	-	0,8	0,8	0,8	0,8
Minimum fraction of NPP to roots	-	0,15	0,15	0,15	0,15
<b>Temperature modifier (fT)</b>					
Minimum temperature for growth	deg. C	6	6	6	6
Optimum temperature for growth	deg. C	18	18	18	18
Maximum temperature for growth	deg. C	35	35	35	35
<b>Frost modifier (fFRost)</b>					
Days production lost per frost day	days	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Soil water modifier (fSW)</b>					
Moisture ratio deficit for $f_q = 0.5$	-	0,5	0,5	0,5	0,5
Power of moisture ratio deficit	-	5	5	5	5
<b>Fertility effects</b>					
Value of 'm' when FR = 0	-	0	0	0	0
Value of 'fNutr' when FR = 0	-	0,6	0,6	0,6	0,6
<b>Age modifier (fAge)</b>					
Maximum stand age used in age modifier	years	100	100	100	100
Power of relative age in function for fAge	-	4	4	4	4
Relative age to give fAge = 0.5	-	0,95	0,95	0,95	0,95
<b>Litterfall &amp; root turnover</b>					
Maximum litterfall rate	l/month	0,03	0,03	0,03	0,03
Litterfall rate at t = 0	l/month	0,001	0,001	0,001	0,001
Age at which litterfall rate has median value	month	9	9	9	9
Average monthly root turnover rate	l/month	0,015	0,015	0,015	0,015
<b>Conductance</b>					
Maximum canopy conductance	m/s	0,02	0,02	0,02	0,02
LAI for maximum canopy conductance	-	3,33	3,33	3,33	3,33
Defines stomatal response to VPD	l/mBar	0,05	0,05	0,05	0,05
Canopy boundary layer conductance	m/s	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Stem numbers</b>					
Max. stem mass per tree @ 1000 trees/hectare	kg/tree	300	300	300	300
Power in self-thinning rule	-	1,5	1,5	1,5	1,5
Fraction mean single-tree foliage biomass lost per dead tree	-	1	1	1	1
Fraction mean single-tree root biomass lost per dead tree	-	0,2	0,2	0,2	0,2
Fraction mean single-tree stem biomass lost per dead tree	-	1	1	1	1
<b>Canopy structure and processes</b>					
Specific leaf area at age 0	m <sup>2</sup> /kg	10	10	10	10
Specific leaf area for mature leaves	m <sup>2</sup> /kg	8	8	8	8
Age at which specific leaf area = (SLA0+SLA1)/2	years	1	1	1	1
Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	-	0,5	0,5	0,5	0,5
Age at canopy cover	years	8	8	8	8
Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	-	0,15	0,15	0,15	0,15
LAI for maximum rainfall interception	-	4	4	4	4
Canopy quantum efficiency	molC/molPAR	0,06	0,06	0,06	0,06
<b>Branch and bark fraction (fracBB)</b>					
Branch and bark fraction at age 0	-	0,5	0,5	0,5	0,5
Branch and bark fraction for mature stands	-	0,1	0,1	0,1	0,1
Age at which fracBB = (fracBB0+fracBB1)/2	years	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>Various</b>					
Ratio NPP/GPP	-	0,47	0,47	0,47	0,47
Basic density	t/m <sup>3</sup>	0,38	0,38	0,38	0,38
<b>Conversion factors</b>					
Intercept of net v. solar radiation relationship	W/m <sup>2</sup>	-90	-90	-90	-90
Slope of net v. solar radiation relationship	-	0,8	0,8	0,8	0,8
Molecular weight of dry matter	gDM/mol	24	24	24	24
Conversion of solar radiation to PAR	mol/MJ	2,3	2,3	2,3	2,3

