



**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**

---

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D.  
Don EN LA REGIÓN DEL BÍO BÍO, CHILE**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**EMILIO ARTURO ROJAS RETAMAL**

Profesor Guía: Dr. Horacio Bown Intveen. Ingeniero Forestal

---

Santiago, Chile

2014

**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**

---

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D.**  
***Don* EN LA REGIÓN DEL BÍO BÍO, CHILE**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**EMILIO ARTURO ROJAS RETAMAL**

Calificaciones:	Nota	Firmas
Prof. Guía Sr. Horacio Bown Intveen	.....	.....
Prof. Consejero Sr. Juan Caldentey Pont	.....	.....
Prof. Consejero Sr. Manuel Toral Ibáñez	.....	.....

*“Sabed que la virtud de la paciencia es la que nos asegura la mayor perfección”*  
*San Francisco de Sales*

*A mis padres y hermana gracias por su amor y apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermana, gracias por el apoyo constante e irrestricto en cada etapa de mis estudios. Gracias por estar conmigo en los buenos momentos y en especial en los momentos más difíciles que sin ustedes no los habría podido superar.

A mi profesor guía Horacio Bown Intveen, gracias por el constante apoyo, confianza y dedicación entregada en este proceso de memoria. A mis profesores consejeros, Manuel Toral y Juan Caldentey, por sus aportes y buena disposición.

A Javiera gracias por su apoyo, comprensión y paciencia, tu compañía ha sido importante en este proceso.

A mis amigos Verito y Sebastián gracias por su desinteresada ayuda y valiosos aportes.

A Viviana por su leal y constante amistad.

A mis grandes amigos de la universidad Bruno, Nicolás y José; gracias por todos esos gratos momentos que viví junto a ustedes que nunca olvidaré.

A cada una de las personas que colaboraron en el desarrollo de esta memoria. Sin su ayuda esto no habría sido posible.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	MATERIAL Y MÉTODOS .....	4
2.1.	Descripción del área de estudio .....	4
2.2.	Instalación de parcelas .....	5
2.3.	Medición del índice de área foliar .....	6
2.4.	Medición del índice de área foliar mediante fórmulas .....	7
2.4.1.	Ángulo Cenital ( $\Psi$ ) .....	8
2.4.2.	Declinación Solar ( $D$ ) .....	8
2.4.3.	Coefficiente de Extinción de la Luz ( $K$ ).....	8
2.4.4.	Tau ( $T$ ).....	9
2.4.5.	LAI ( $L$ ) .....	9
2.5.	Análisis estadístico .....	9
2.6.	Relación del índice de área foliar con variables de estado .....	10
2.7.	Determinación de biomasa y índice de área foliar a partir de biomasa foliar ( $L_{BF}$ )	10
2.7.1.	Biomasa de fustes ( $w_s$ ) .....	10
2.7.2.	Biomasa de Follaje ( $w_f$ ).....	11
2.7.3.	Biomasa de Ramas ( $w_b$ ) .....	11
2.7.4.	Biomasa de raíces ( $w_r$ ) .....	11
2.7.5.	Biomasa Total ( $w_w$ ).....	11
2.7.6.	Índice de área foliar a partir de biomasa foliar ( $L_{BF}$ ) .....	12
3.	RESULTADOS.....	13
3.1.	Influencia del sitio y la edad sobre el área foliar .....	13
3.3.	Influencia del clima sobre los patrones temporales del índice de área foliar.....	18
3.4.	Relación entre variables de estado y el índice de área foliar .....	20
3.5.	Relación Ceptómetro / Biomasa .....	23
4.	DISCUSIÓN .....	24
4.1.	Relación del índice de área foliar con respecto a las clases de edad y los sitios	24
4.2.	Relación de las variables temporales sobre el índice de área foliar.....	24
4.3.	Influencia de las variables climatológicas sobre el índice de área foliar.....	25
4.4.	Relación del índice de área foliar con las variables de estado del rodal.....	25

4.5.	Relación entre Ceptómetro y $L_{BF}$ .....	26
5.	CONCLUSIONES .....	27
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	28
7.	APÉNDICE .....	31

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Rangos de Biomasa foliar e índice de área foliar ( <i>L</i> ) para distintos tipos de bosques.....	1
Cuadro 2. Información climática relevante para el año 2011 para las estaciones meteorológicas de Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) y Trilahue (Tapihue).....	5
Cuadro 3. Identificación de predios donde se midió el índice de área foliar ( <i>L</i> ), área basal ( <i>G</i> ), altura dominante ( <i>H</i> 100) y índice de sitio ( <i>S</i> ).....	5
Cuadro 4. Variables de estado del rodal con su error estándar, n=3.....	14
Cuadro 5. Días julianos promedios $\pm$ 1 desviación estándar para cada una de las clases de edad en que se alcanza máximos valores de <i>L</i> :.....	16
Cuadro 6. Promedio de las variables climáticas para 3 años (2010, 2011 y 2012).....	19
Cuadro 7. Matriz de Correlación de Pearson's, para las variables meteorológicas y el índice de área foliar máximo.....	19
Cuadro 8. Matriz de Correlación de Pearson's, para las variables de estado del rodal y el índice de área foliar.....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de los sitios estudiados donde se midió el índice de área foliar ( $L$ ) en la VIII Región. Se agrega las zonas de crecimiento para Pino radiata definidas por el Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento ( <a href="http://www.simulador.cl">www.simulador.cl</a> ).....	4
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). .....	6
Figura 3. Ceptómetro ACCUPAR LP-80, Decagon Devices INC.....	7
Figura 4. Distribución del índice de área foliar para cada uno de los sitios y clases de edad correspondientes.....	13
Figura 5. Índice de área foliar para cada clase de edad con su error estándar ( $n = 3$ ).....	15
Figura 6. Relación entre el valor máximo de índice de área foliar y el día juliano en cada uno de los predios estudiados y sus clases de edad.....	16
Figura 7. Relación del $L$ mínimo versus $L$ máximo .....	17
Figura 8. Diagrama ombrotérmicos de las estaciones meteorológicas cercana de cada uno de los sitios estudiados donde se midió el índice de área foliar ( $L$ ) en la Región del Bío Bío. ....	18
Figura 9. Gráfico de dispersión entre el $L$ máximo y la radiación solar acumulada.....	20
Figura 10. Gráficos de dispersión de las variables de estado de rodal más significativas sobre el $L$ .....	22
Figura 11. Comparación entre la dispersión del $L$ máximo y el $L_{BF}$ obtenido por biomasa. ....	23

# ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EN PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D. Don EN LA REGIÓN DEL BÍO BÍO, CHILE

## RESUMEN

Se midió mensualmente el índice de área foliar 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 Octubre de 2010 y Octubre de 2012. Los predios donde se ubicaron los ensayos fueron San Pedro de la Paz (predio Lomas Coloradas), Nacimiento (predio Nacimiento), Santa Bárbara (predio Santa Bárbara) y Cabrero (predio Tapihue). Para cada sitio se consideraron tres clases de edad ([0-7), [7-14) y [14+)). En cada uno de los 12 puntos de Zona-Edad, se procedió a instalar un conglomerado de 3 parcelas permanentes de 1.000 m<sup>2</sup>, totalizando 36 parcelas, entre los meses de Agosto y Septiembre de 2010. Estos predios y rodales se ubican a menos de 10 km de las estaciones meteorológicas de Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) y Trilahue (Tapihue) que mantiene Forestal Mininco S.A.

La edad se correlacionó positivamente con el índice de área foliar ( $L$ ) como era de esperar. Además se aprecia que el  $L$  crece fuertemente desde la clase de edad [0-7) a la [7-14), comparado con el crecimiento entre la clase de edad [7-14) a [14+). Lo anterior implica que el mayor crecimiento en área foliar se genera antes de los 14 años. Además a lo largo de los 24 meses se observa que el  $L$  aumenta fuertemente en la clase de edad [0-7), en menor cuantía en la clase de edad [7-14), y muestra un crecimiento prácticamente imperceptible en la clase [14+) años.

Los mayores valores de  $L$  se encontraron en el predio Nacimiento particularmente en las clases de edad I y II ( $3,6 \pm 0,8$  y  $5,2 \pm 0,1$  m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>), comparado con los otros sitios. El mayor valor de  $L$  en la clase de edad III se encontró en el predio Tapihue ( $4,04 \pm 0,6$  m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>).

En cuanto a las variables meteorológicas, se puede apreciar que sólo la radiación solar ( $Pearson-r = 0,519$ ;  $p < 0,001$ ) produjo influencias sobre el  $L$ . En contraste, las variables de estado de los rodales en su mayoría influyeron significativamente sobre el  $L$ , destacando el área basal ( $Pearson-r = 0,850$ ;  $p < 0,001$ ).

Por consiguiente, el presente estudio sugiere que la edad de las plantaciones primero, y los sitios en segundo lugar son factores determinantes en el valor de  $L$ . Estacionalmente los máximos de  $L$  se obtuvieron a finales de verano y principios de otoño. El valor de  $L$  se correlacionó fuertemente con la radiación solar y con las variables de estado de los rodales.

**Palabras claves:** Índice de área foliar ( $L$ ), clases de edad, Zonas de crecimiento, variables meteorológicas, *Pinus radiata*.

## LEAF AREA INDEX IN *Pinus radiata* D. Don CULTIVATED FIELDS IN THE BÍO BÍO REGION, CHILE

### SUMMARY

A monthly measurement of the leaf area index was conducted on *Pinus radiata* D. Don plantations, in the Bio Bio region, for the four main growth zones of this species (IV, V, VI and VII) during 24 months between October 2010 and October 2012. The trial locations were San Pedro de la Paz (Lomas Coloradas land), Nacimiento (Nacimiento land), Santa Bárbara (Santa Bárbara land) and Cabrero (Tapihue land). Three age classes were considered in each site ([0-7], [7-14] and [14+]). In each of the 12 Zone-Age class, a conglomerated of 3 permanent sample plots of 1,000 m<sup>2</sup> each were laid down, for a total of 36 pieces of ground, between August and September 2010. These plots and stands are located less than 10 km away from the Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) and Trilahue (Tapihue) weather stations, maintained by Forestal Mininco S.A.

The age was positively correlated with the Leaf Area Index ( $L$ ) as was expected. Furthermore, it can be seen that  $L$  strongly increases from the age class [0-7] to [7-14], compared with the growth between the age class [7-14] to [14+]. This implies that the higher foliar area growth is produced before the 14 years of age. Also, during the 24 months it can be seen that  $L$  strongly increases in the age class [0-7], in lesser amount in the age class [7-14], and shows a negligible growth in the age class [14+] years.

The larger values of  $L$  were found in the Nacimiento site, especially in the age classes I and II ( $3,6 \pm 0,8$  y  $5,2 \pm 0,1$  m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>), compared with the other studied sites. The higher value of LAI in the age class II was found in the Tapihue site ( $4,04 \pm 0,6$  m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>).

Regarding the meteorological variables, it can be seen that only solar radiation ( $Pearson-r = 0,519$ ;  $p < 0,001$ ) influences  $L$ . Basal area was the stand variable that most influenced the  $L$  ( $Pearson-r = 0,850$ ;  $p < 0,001$ ).

Consequently, the present study suggests that the age of the plantations first, and secondly the sites are determinant factors in the value of  $L$ . Seasonally the maximum values of  $L$  were obtained at the end of summer and beginnings of autumn. The value of  $L$  was strongly correlated with solar radiation and the stands state variables.

**Keywords:** Leaf area index ( $L$ ), Age Range, Sites, Stands state variables, time variables, *Pinus radiata*.

## 1. INTRODUCCIÓN

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

Frecuentemente, se estudia la biomasa foliar porque permite describir el sistema fotosintético y relacionarlo con la productividad del bosque. Usualmente asociado a la biomasa foliar encontramos al área foliar, que generalmente se expresa a través del Índice de Área Foliar ( $L$ ), que se define como el área foliar (en una cara de la hoja) que sustenta una unidad de superficie del suelo (He *et al.*, 2007). Esta variable ayuda a explicar el microclima bajo dosel, la intercepción del agua por el dosel, la extinción de la radiación y el intercambio de agua y  $\text{CO}_2$ , de la vegetación con la atmósfera, llegando a ser un componente clave de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas (Bréda, 2003).

El  $L$  es un parámetro importante en el funcionamiento de los bosques, debido a que controla la productividad vegetal y el intercambio de energía entre la vegetación y la atmósfera (Moser *et al.* 2007). Proporciona información apta para la evaluación de la producción primaria de los ecosistemas forestales (Gholz y Cropper, 1991), puesto 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), el agua, el carbono y el intercambio de energía (Gower y Norman, 1991). Por otra parte, el  $L$  es un importante parámetro explicativo de la variabilidad en la productividad primaria aérea neta, debido a su mayor importancia en los mecanismos fisiológicos desde el nivel de la hoja al nivel del dosel del bosque (Running y Coughlan, 1988). Sin embargo,  $L$  es uno de los parámetros más difíciles de cuantificar correctamente, debido a la gran variabilidad espacial y temporal (Bréda, 2003). En el Cuadro 1 se presenta valores de biomasa y área foliar promedio para algunas comunidades boscosas.

**Cuadro 1.** Rangos de Biomasa foliar e índice de área foliar ( $L$ ) para distintos tipos de bosques.

Tipo de Bosque	Hojas		
	Peso Verde (t ha <sup>-1</sup> )	Peso Seco (t ha <sup>-1</sup> )	$L$ (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )
Bosques Caducos de Latifoliadas	6-8	2-3	4-6
Bosques Perennes de Latifoliadas	20-25	7-11	7-12
Bosques Coníferas Deciduos	6-8	2-3	5-7
Bosques <i>Pinus</i> sp.	12-15	5-6	7-12
Otras Coníferas Perennes	30-35	9-15	15-20

**Fuente:** Tadaki (1966); Citado por Pardé (1980).

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

Métodos directos: Son aquellos que buscan medir el  $L$  real, a través de técnicas destructivas donde generalmente el dosel es perturbado en algún grado (He *et al.*, 2007). Las ventajas de estos métodos radica en que se obtiene un valor real de área foliar y se utilizan para comparar y calibrar métodos indirectos (Jonckheere *et al.*, 2004). Las desventajas radican principalmente en el consumo de tiempo, los costos y los daños significativos provocados al dosel (He *et al.*, 2007).

Ejemplos de este tipo de métodos son: recorte estratificado, muestreo destructivo y recolección de hojarasca. El recorte estratificado es utilizado comúnmente en plantas de hojas muy pequeñas, tales como céspedes, pastos de praderas y alfalfa. Consiste principalmente en identificar un área rectangular o circular, luego cortar todo el follaje dentro y después estimar el área foliar (Norman y Campbell, 1989). El método de muestreo destructivo ha sido utilizado con éxito en los sistemas agrícolas, pero en los sistemas forestales el éxito ha dependido de la extrapolación utilizando métodos alométricos. Implicando el volteo de individuos, para posteriormente dividir la copa en tercios y obtener muestras de hojas, determinar su peso seco, y mediante regresiones determinar la biomasa foliar de los árboles en función de su diámetro a la altura del pecho (DAP). Para determinar el  $L$  por métodos directos, se debe obtener adicionalmente a la biomasa foliar, el valor del Área Foliar Específica (AFE), que corresponde a una medida del área foliar proyectada por unidad de materia seca de follaje (Reich *et al.*, 2003). La recolección de hojarasca es útil para los bosques caducifolios con programas adecuados de muestreo espacial y temporal. Para el caso de los bosques de hoja perenne este método no es recomendable, ya que la caída de las hojas no está relacionada directamente con brotes nuevos ni con el crecimiento de año anterior, sino con el promedio de vida de las hojas y con las condiciones climáticas acumuladas a lo largo de la vida (Chen *et al.*, 1997).

Métodos indirectos: Son aquellos basados en mediciones de la intercepción de radiación y en la reflectancia de la vegetación (Norman y Campbell, 1989). Las ventajas de estos métodos residen en que son no destructivos (Bréda, 2003), y requieren usualmente mediciones sencillas y rápidas en terreno (Norman y Campbell, 1989). Las desventajas son los complejos algoritmos para la reducción de datos (Norman y Campbell, 1989) y en rigor no entregarían mediciones de índice de área foliar, ya que incluirían 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).

Entre los métodos más relevantes se encuentran los espectrales y aquellos basados en la Ley de Lambert-Beer. Los espectrales, se fundamentan en una diferencia entre la reflectancia espectral del follaje y otros materiales como el suelo. Estos han sido ampliamente utilizados debido a una mayor disponibilidad de imágenes satelitales (Norman y Campbell, 1989).

La Ley Lambert-Beer constituye un medio matemático para calcular el perfil de absorción de la luz en el dosel (Lambert *et al.*, 2008). Esta ley explica la atenuación de la radiación al pasar a través de una solución acuosa. En el ámbito de la vegetación, se hace una analogía entre la concentración de la solución y la cubierta vegetal, la cual logra aminorar la radiación, siendo absorbida por las hojas para luego ser utilizada en el proceso de fotosíntesis (Jones, 1992).

Se representa a través de la siguiente fórmula (Nobel, 1991):

$$I = I_0 e^{-k L}$$

Donde:  $I$ : Radiación solar transmitida;  $I_0$ : Radiación solar incidente;  $k$ : Coeficiente de extinción de la luz;  $L$ : Índice de área foliar.

El método de evaluación del  $L$  por medio de la inversión de la ecuación de Lambert-Beer, requiere la medición de la radiación incidente ( $I_0$ ) y la radiación bajo el dosel ( $I$ ) (Bréda, 2003).

Las plantaciones comerciales de *Pinus radiata* son la base de la industria forestal en Chile. Esta especie fue introducida alrededor de 1881 cerca de Concepción y se utilizó inicialmente para estabilizar las dunas en la zona de Chanco (Contensse, 1986). En la actualidad estas plantaciones se distribuyen desde la Región de Coquimbo hasta la Región de los Lagos, alcanzando hasta el 2012, 1,5 millones de hectáreas, lo que arroja un total del 60,9% de la superficie de bosques plantados en Chile (Álvarez, 2013).

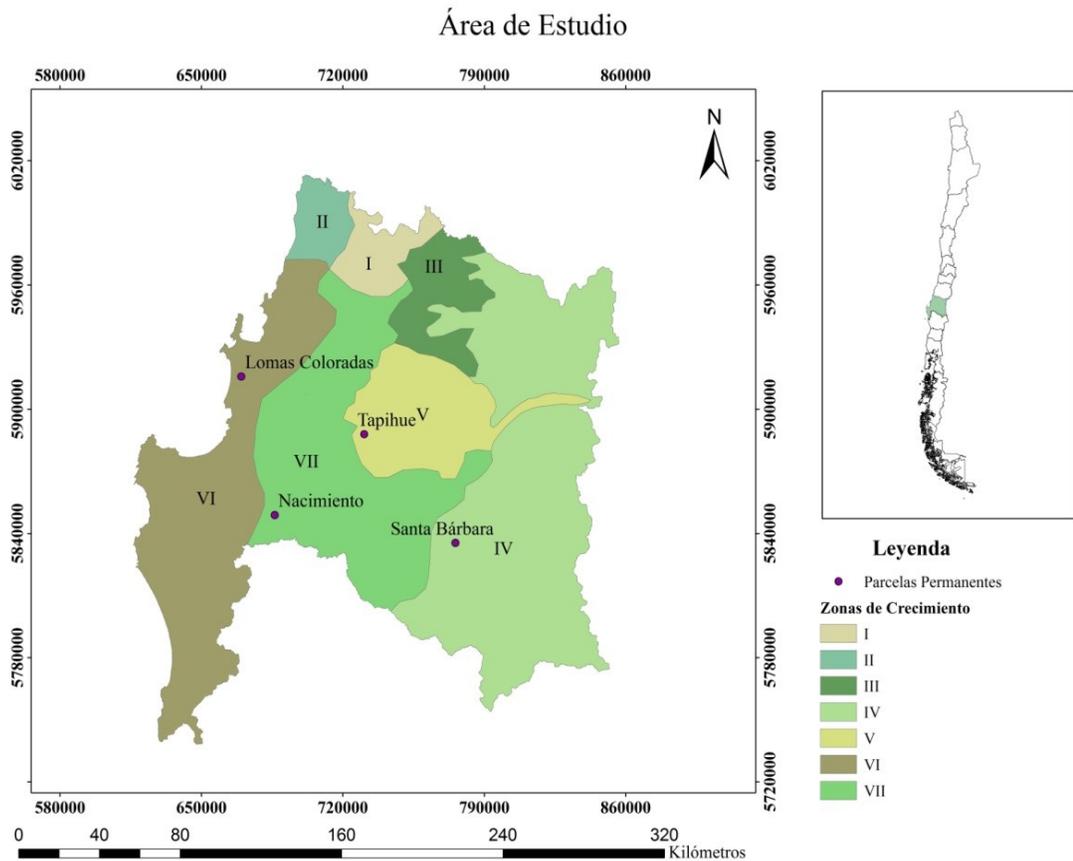
Pese a su gran cobertura a nivel nacional, las variaciones en el área foliar en *Pinus radiata* han sido escasamente documentadas en el país, lo que constituye el objeto principal de este estudio. El estudio que se presenta corresponde a mediciones mensuales de área foliar en plantaciones de pino radiata, considerando tres clases de edad, en las cuatro principales zonas de crecimiento para *Pinus radiata* en la Región del Bío-Bío (IV, V, VI y VII).

La idea consiste en determinar el  $L$  para las distintas zonas de crecimientos y clases de edad; conjuntamente analizando los patrones temporales que generan cambios en esta variable. Además se trata de relacionar los valores de  $L$  con variables de estados de los rodales y con variables meteorológicas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción del área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en la Región del Bío-Bío, en las cuatro principales zonas de crecimiento para *Pinus radiata* (IV, V, VI y VII) y considerando tres clases de edad (I [0-7), II [7-14) y III [14+) años). Las parcelas permanentes se ubican en las comunas de: San Pedro de la Paz (predio Lomas coloradas), Nacimiento (predio Nacimiento), Santa Bárbara (predio Santa Bárbara) y Cabrero (predio Tapihue).



**Figura 1.** Mapa de ubicación de los sitios estudiados donde se midió el índice de área foliar ( $L$ ) en la VIII Región. Se agrega las zonas de crecimiento para Pino radiata definidas por el Modelo Nacional de Simulación de Crecimiento ([www.simulador.cl](http://www.simulador.cl))

Estas parcelas permanentes se ubican a menos de 10 km de las estaciones meteorológicas de Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) y Trilahue (Tapihue) que mantiene Forestal Mininco S.A. Se verificó que existe información de muy buena calidad y confiable para cada una de las estaciones meteorológicas, esto lo muestran la Figura 2 y Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Información climática relevante para el año 2011 para las estaciones meteorológicas de Escuadrón (Lomas Coloradas), Pichún (Nacimiento), Santa Bárbara (Santa Bárbara) y Trilahue (Tapihue).

	Estaciones Meteorológicas			
	Escuadrón (Lomas Coloradas)	Pichún (Nacimiento)	Santa Bárbara (Santa Bárbara)	Trilahue (Tapihue)
Precipitaciones (mm)	723	817	979	582
Temperatura Mínima (°C)	-3,1	0,5	-1,1	-2,8
Temperatura Media (°C)	12	12,5	12,2	13,2
Temperatura Máxima (°C)	28,6	36,4	32,4	37,4
Humedad Relativa (%)	87,2	74,5	98,2	73,8
Radiación Solar (MJ/m <sup>2</sup> )	10.624	9.770	10.716	9.697

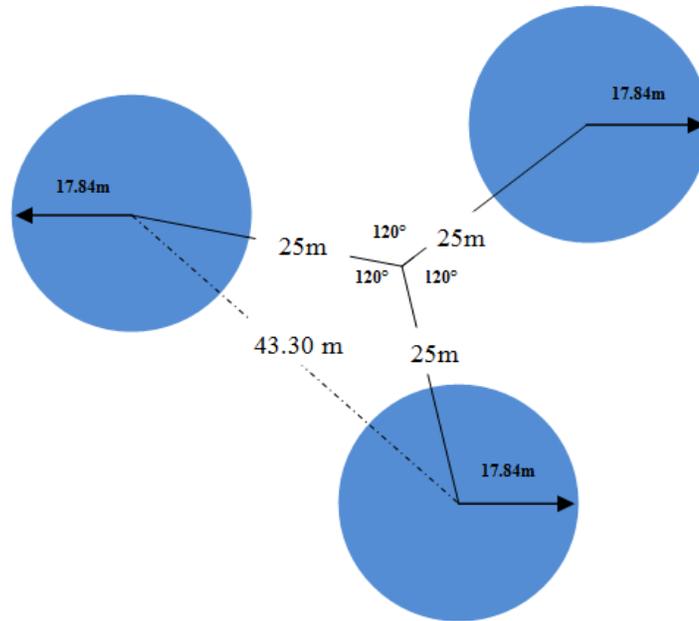
## 2.2. Instalación de parcelas

Para este estudio se seleccionaron 3 sectores en cada una de las zonas de crecimiento representando tres clases de edad. Para su selección, se buscó cumplir con los siguientes requisitos: (i) tener una estación meteorológica operativa, (ii) tener las tres clases de edad, (iii) representar de buena forma a cada zona de crecimiento, y (iv) presentar esquemas de manejo que representaran una condición normal dentro del patrimonio de Forestal Mininco S.A.

**Cuadro 3.** Identificación de predios donde se midió el índice de área foliar ( $L$ ), área basal ( $G$ ), altura dominante ( $H100$ ) y índice de sitio ( $S$ ).

Zona Crec.	Localidad	Clase Edad	Predio	Parcelas	Año Plant.	Agosto 2010				
						Edad (años)	Densidad (árbo/ha)	$G$ (m <sup>2</sup> /ha)	$H100$ (m)	$S$ (m)
VI	Lomas Coloradas	[0-7]	Lomas Coloradas	43, 44, 45	2008	2,2	1.120	1,9	3.2	28,5
		[7-14]	Lomas Coloradas	40, 41, 42	1998	12,2	450	22,5	25.7	35,0
		[14+]	Lomas Coloradas	37, 38, 39	1994	16,6	260	26,4	23.9	32,8
VII	Nacimiento	[0-7]	Siete Árboles	7, 8, 9	2003	7,1	1.060	25,5	15.8	35,8
		[7-14]	El Litral	10, 11, 12	1996	14,1	1.160	49,4	28	34,5
		[14+]	Santa Isabel	4, 5, 6	1991	19,1	280	30,6	32.6	32,7
IV	Santa Bárbara	[0-7]	Las Manchurías San Sebastián y	16, 17, 18	2007	3,2	1.440	11,3	7.8	35,0
		[7-14]	Santa Olga	22, 23, 24	2002	8,2	910	31,6	18.2	34,9
		[14+]	Las Mercedes	19, 20, 21	1995	15,3	417	45,4	28.9	33,6
V	Tapihue	[0-7]	Tapihue	31, 32, 33	2008	2,2	980	1,1	3	21,2
		[7-14]	Tapihue	25, 26, 27	2000	10,2	880	32,4	21	33,3
		[14+]	Tapihue	28, 29, 30	1993	17,2	1.040	36,9	27	29,2

En cada uno de los 12 puntos de Zona-Edad (Cuadro 3), se instaló un conglomerado de 3 parcelas permanentes de 1.000 m<sup>2</sup> (Figura 2), totalizando 36 parcelas, en Agosto y Septiembre del año 2010. Las parcelas fueron georeferenciadas en el centro del conglomerado (UTM-WGS84), y a través de coordenadas polares, el centro de cada parcela. Estos predios y rodales se ubican a menos de 10km de las estaciones meteorológicas de Escuadrón, Pichún, Santa Bárbara y Trilahue, A cargo de Forestal Mininco S.A. (Cuadro 1).



**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).

### 2.3. Medición del índice de área foliar

Un ceptómetro es un instrumento utilizado para medir la intercepción de la luz en el dosel por las plantas, y para el cálculo del Índice de Área foliar ( $L$ ). Para este estudio se utilizó un ceptómetro AccuPar LP-80 (Decagon Devices, 2010). Este se compone de un microprocesador integrado donde se registra los datos capturados y una sonda. La sonda contiene 80 sensores independientes, espaciados a un 1cm uno de otros. Los fotosensores permiten medir la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR), en un ancho de banda de 400-700 nm (espectro visible), y utilizan este valor en la estimación del  $L$  utilizando la Ley de Lambert-Beer (Decagon Devices, 2010).



### 2.4.1. Ángulo Cenital ( $\Psi$ )

El ángulo cenital se calcula a partir de la fórmula:

$$\Psi = \arccos (\sin Lat \sin D + \cos Lat \cos D \cos 0,2618 (t- t_0)) \quad (\text{Ec } 1)$$

Donde  $Lat$  es la latitud,  $D$  es la declinación solar,  $t$  es el tiempo y  $t_0$  es el tiempo del mediodía solar. La tierra gira a una velocidad de 0,2618 radianes por hora, por lo que el factor de 0,2618 convierte horas a radianes. Tiempo,  $t$ , es en horas (hora solar local), que va de 0 a 24.

### 2.4.2. Declinación Solar ( $D$ )

La declinación solar oscila entre 0,409 radianes ( $23,45^\circ$ ) en el solsticio de verano y  $-0,409$  radianes ( $-23,45^\circ$ ) en el solsticio de invierno. Esta se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$D = \arcsin [0,39785 \sin [4,869 + 0,0172*J + 0,03345 \sin (6,224 + 0,0172*J)]] \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde  $J$  es el día juliano que se define como el número de días y fracción transcurridos desde el 1º de enero de cualquier año.

### 2.4.3. Coeficiente de Extinción de la Luz ( $K$ )

El coeficiente de extinción para el dosel, depende de la distribución angular de las hojas, los elementos de dosel y el ángulo cenital de la sonda. La ecuación para  $K$  es:

$$K = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2 \theta}}{x + 1.744 (x + 1.182)^{-0.733}} \quad (\text{Ec } 3)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo cenital del sol y  $x$  es un parámetro de la distribución angular de las hojas.

#### 2.4.4. Tau ( $T$ )

Es la relación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) medido por debajo del dosel y la PAR medida fuera del dosel. Donde PAR se define como la radiación en la banda de onda 400 a 700 nm.

$$T = \frac{\text{PAR bajo dosel}}{\text{PAR sobre dosel}} \quad (\text{Ec 4})$$

#### 2.4.5. LAI ( $L$ )

El  $L$  se puede calcular a partir de los valores PAR obtenidos mediante el ceptómetro, para la cual se aplican la siguiente fórmula:

$$L = \frac{\left[ \left( 1 - \frac{1}{2k} \right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{(0.283 + 0.785a - 0.159a^2)(1 - 0.47f_b)} \quad (\text{Ec 5})$$

La Fracción del haz ( $f_b$ ) es la relación entre la radiación de haz directo procedente directamente del sol con la radiación procedente de todas las fuentes ambientales y  $a$  es la capacidad de absorción de la hoja en la banda de PAR (400-700 nm)

### 2.5. Análisis estadístico

Considerado los valores de  $L$  colectados en los cuatro sitios, en las tres clases de edad y en los 24 meses, se realizaron gráficos de dispersión utilizando el paquete estadístico R (Ihaka y Gentleman, 1996). Las curvas de estos gráficos, fueron suavizadas mediante una regresión lineal ponderada, la cual consistió en encontrar un punto de interés a suavizar usando sus  $k$  vecinos más cercanos ( $k$  generalmente se expresa como un porcentaje del total de datos y se llama parámetro "Smoother span"). Se aplicó la regresión lineal ponderada en dicha vecindad generando un valor suavizado (Cleveland, 1979). A partir de los gráficos de dispersión, se calcularon los valores máximos y mínimos de área foliar por parcela y se evaluaron los efectos principales e interactivos de la edad y del sitio sobre el  $L$ , mediante un análisis de varianza de dos vías. De existir diferencias significativas, se realizó una prueba de comparaciones múltiples (Tukey) para determinar específicamente donde se encuentran las diferencias. Los supuestos de homogeneidad de varianza y normalidad de residuos se probaron mediante la prueba de Bartlett y Shapiro-Wilk, respectivamente (Arriaza *et al.*, 2008).

Los patrones temporales de cambio del  $L$  fueron contrastados con la información climática, correlacionando los valores del ajuste suavizado de cada parcela con valores acumulativos de radiación, precipitaciones y temperatura.

## **2.6. Relación del índice de área foliar con variables de estado**

Simultáneamente con las mediciones de  $L$ , se realizaron inventarios mensuales en cada una de las 36 parcelas permanentes definidas con anterioridad, desde Agosto de 2010 a Agosto de 2012. Las variables registradas fueron: DAP (diámetro a la altura del pecho), DAC (diámetro a la altura del cuello), Altura Total, Altura de Poda, Estado Fitosanitario y Forma del Fuste, entre otras. Así, las variables dasométricas agregadas monitoreadas en la red completa de parcelas permanentes fueron: Densidad, área basal, diámetro cuadrático medio, altura total, altura dominante, altura de poda, altura inicio copa viva y volumen. Con los valores calculados de  $L$  máximos, se procedió a determinar el mes en que ocurren estos y cuáles fueron los valores dasométricos que correspondieron a dicho mes. A partir de estos datos, se ajustó un modelo de regresión múltiple para determinar qué variables de estado de rodal (área basal, sitio, edad y altura, se correlacionan con el  $L$  máximo medido con el ceptómetro.

## **2.7. Determinación de biomasa y índice de área foliar a partir de biomasa foliar ( $L_{BF}$ )**

A partir de las variables registradas por los inventarios realizados mensualmente, desde Agosto de 2010 a Agosto de 2012 en cada una de las parcelas permanentes definidas con anterioridad se procedió a obtener la biomasa total. Para lo cual se utilizaron las ecuaciones de biomasa desarrolladas para Nueva Zelanda por Madgwick (1994), quien contabilizó la biomasa forestal total y por componente (fuste, corteza, ramas, follaje y raíces). A continuación se detallan las ecuaciones por componente de biomasa utilizada.

### **2.7.1. Biomasa de fustes ( $w_s$ )**

La biomasa fustal ( $w_s$ ) puede ser estimada conociendo la altura media del rodal ( $H$ ), área basal ( $AB$ ), edad ( $a$ ) y densidad ( $n$ ), mediante la ecuación:

$$\ln w_s = -3.56 + 1.10 \ln h + 0.62 \ln (AB+1) + 0.36 \ln a + 0.28 \ln n \quad (\text{Ec } 6)$$

### 2.7.2. Biomasa de Follaje ( $w_f$ )

La biomasa de follaje ( $w_f$ ) se puede determinar con el área basal ( $G$ ) y la edad ( $a$ ) a partir de la siguiente ecuación:

$$\ln (w_f) = -1.337 + 0.742 \ln (G+1) + 1.478 \ln (a) - 0.404 (\ln (a))^2 \quad (\text{Ec } 7)$$

### 2.7.3. Biomasa de Ramas ( $w_b$ )

La biomasa de ramas vivas ( $w_b$ ) aumenta con la altura del rodal ( $H$ ) y la biomasa de follaje y disminuye en la medida que aumenta la densidad del rodal ( $NHA$ )

$$w_b = -1.13 + 0.45 H - 0.0011 n + 1.33 w_f \quad (\text{Ec } 8)$$

### 2.7.4. Biomasa de raíces ( $w_r$ )

La biomasa de raíces ( $w_r$ ) mayores a 5 mm de diámetro en árboles individuales se relacionaba con el diámetro a la altura del pecho ( $DAP$ ) mediante la ecuación:

$$\ln w_r = 2.73 \ln DAP - 5.009 \quad (\text{Ec } 9)$$

### 2.7.5. Biomasa Total ( $w_w$ )

La biomasa total ( $w_w$ ) se calcula a partir de la suma de la biomasa por componentes (fuste ( $w_s$ ), ramas ( $w_f$ ), follaje ( $w_b$ ) y raíces ( $w_r$ )) como lo muestra la siguiente formula

$$w_w = w_s + w_f + w_b + w_r \quad (\text{Ec } 10)$$

### 2.7.6. Índice de área foliar a partir de biomasa foliar ( $L_{BF}$ )

El  $L_{BF}$ , se puede determinar a partir la biomasa foliar ( $w_f$ ) y área foliar específica ( $SLA$ ) con la siguiente formula

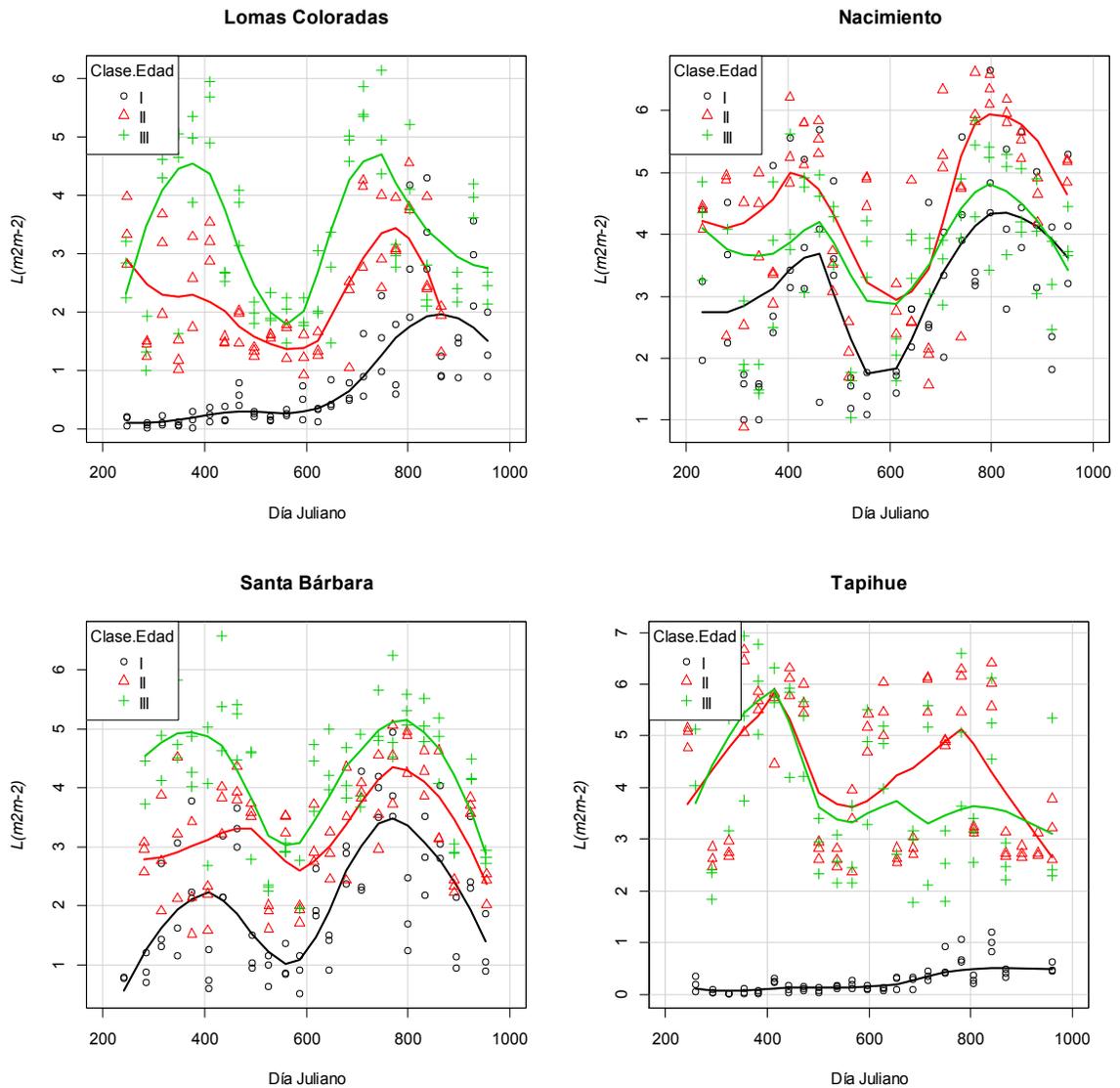
$$L_{BF} = (w_f * 10^{-1}) * SLA \quad (\text{Ec 11})$$

Donde  $SLA$  es la razón entre de el área foliar y el peso de una muestra de hojas expresada en  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ . Se utilizaron los valores de Bown (2007) con un promedio de  $8.7 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ .

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Influencia del sitio y la edad sobre el área foliar

Se observa en la Figura 4 que a mayor clase de edad el  $L$  aumenta: clase I ([0-7)) < clase II ([7-14)) < clase III ([14+)). En los predios de Tapihue y Nacimiento se aprecia que el  $L$  en la clase de edad II > III. Esto puede deberse a que en estos predios se realizaron raleos. Considerando la estacionalidad se observa una tendencia con máximos de área foliar que ocurren consistentemente en verano y mínimos en invierno.



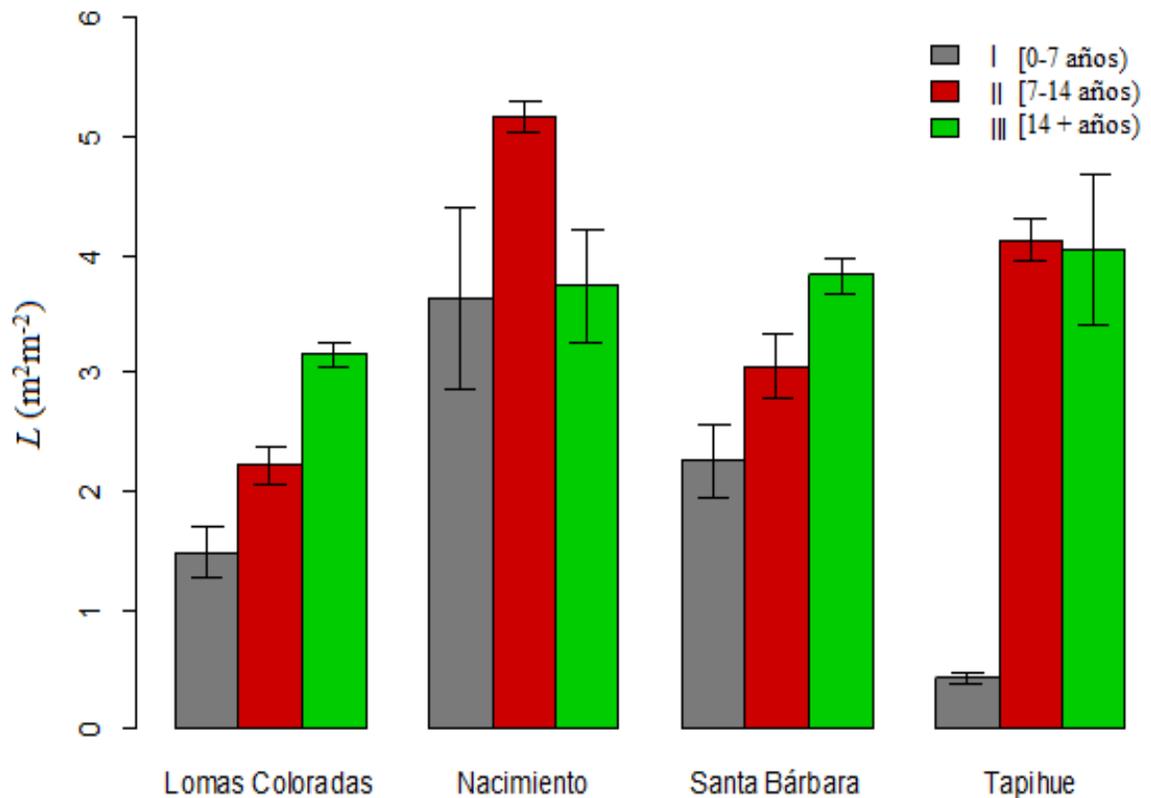
**Figura 4.** Distribución del índice de área foliar para cada uno de los sitios y clases de edad correspondientes

**Cuadro 4. Variables de estado del rodal con su error estándar, n=3.**

VARIABLES												
	NHA	H	DAP	Área Basal	Volumen	Índice de Sitio	Follaje	Biomasa Total	L máx	L <sub>BF</sub>	L min	
Tratamiento	Unidad	árboles ha <sup>-1</sup>	m	cm	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	m, 20 años	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	
Lomas Coloradas	I	1.147	3,8 ± 0,7	5,9 ± 1,4	3,6 ± 1,4	5,1 ± 2,4	29,8 ± 0,8	2,7 ± 0,8	10,6 ± 4,1	1,5 ± 0,2	2,2 ± 0,6	0,12 ± 0,02
	II	440	25,4 ± 0,5	26,4 ± 0,6	24,6 ± 1,1	206,4 ± 13,6	35,4 ± 0,2	8,9 ± 0,1	157,0 ± 8,1	2,2 ± 0,2	7,1 ± 0,1	1,33 ± 0,08
	III	260	29,3 ± 0,5	36,6 ± 0,7	27,9 ± 1,1	269,7 ± 14,3	33,1 ± 0,1	8,1 ± 0,1	187,2 ± 7,9	3,2 ± 0,1	6,4 ± 0,1	2,16 ± 0,18
Nacimiento	I	1.027	15,5 ± 0,5	17,6 ± 0,4	25,5 ± 1,7	130,4 ± 6,6	34,5 ± 0,2	11,1 ± 0,6	114,2 ± 4,1	3,6 ± 0,8	8,9 ± 0,5	1,89 ± 0,13
	II	1.053	24,8 ± 0,2	24,4 ± 0,4	52,9 ± 2,5	434,7 ± 28,9	33,4 ± 0,2	14,0 ± 0,3	302,3 ± 17,1	5,2 ± 0,1	11,2 ± 0,2	2,99 ± 0,19
	III	273	32,9 ± 0,6	36,9 ± 2,9	29,9 ± 2,7	324,3 ± 25,5	33,8 ± 0,2	7,3 ± 0,6	223,4 ± 9,8	3,7 ± 0,5	5,9 ± 0,5	2,64 ± 0,16
Santa Bárbara	I	1.393	7,0 ± 0,8	9,9 ± 0,9	11,6 ± 2,1	27,9 ± 8,2	34,9 ± 0,6	6,3 ± 0,9	35,7 ± 7,8	2,3 ± 0,3	5,0 ± 0,7	1,07 ± 0,10
	II	913	17,5 ± 0,4	21,2 ± 0,2	32,5 ± 0,6	187,7 ± 7,7	34,6 ± 0,5	12,9 ± 0,1	148,9 ± 5,3	3,1 ± 0,3	10,3 ± 0,1	2,09 ± 0,11
	III	417	29,5 ± 0,6	37,3 ± 0,6	46,9 ± 2,4	457,8 ± 31,8	34,1 ± 0,2	12,3 ± 0,3	287,3 ± 16,8	3,8 ± 0,2	9,8 ± 0,2	2,90 ± 0,10
Tapihue	I	860	3,6 ± 0,6	4,9 ± 1,1	2,0 ± 0,8	2,7 ± 1,3	27,7 ± 1,0	1,9 ± 0,5	7,3 ± 2,5	0,4 ± 0,04	1,6 ± 0,4	0,05 ± 0,01
	II	960	19,1 ± 0,4	21,1 ± 0,2	35,1 ± 0,6	221,4 ± 8,3	32,8 ± 0,2	12,6 ± 0,1	172,7 ± 5,4	4,1 ± 0,2	10,1 ± 0,1	3,61 ± 0,23
	III	1.140	22,1 ± 1,5	20,9 ± 1,1	46,9 ± 5,5	346,8 ± 60,1	29,9 ± 0,8	11,1 ± 0,8	260,0 ± 38,4	4,04 ± 0,6	8,9 ± 0,7	2,92 ± 0,46
Clase de Edad	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
ANOVA	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
C. Edad x Sitio	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

\*:  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p < 0.01$ ; \*\*\*:  $p < 0.001$ ; ns:  $p > 0.05$

Al observar el valor de  $L$  en el cuadro 4 para cada sitio se ve que la clase de edad II y III no tienen diferencias significativas en sus valores de media (3,643 y 3,695 respectivamente) no así con la clase de edad de I con un valor de media (1,947), lo que indica que la mayor acumulación de área foliar ocurre en los primeros 10 años. Se puede apreciar que el área foliar aumenta fuertemente de un año al siguiente en la clase de edad I. Este aumento es también significativo para la clase de edad II. En la clase de edad III el área foliar no parece aumentar de un año al siguiente.



**Figura 5.** Índice de área foliar para cada clase de edad con su error estándar ( $n = 3$ ).

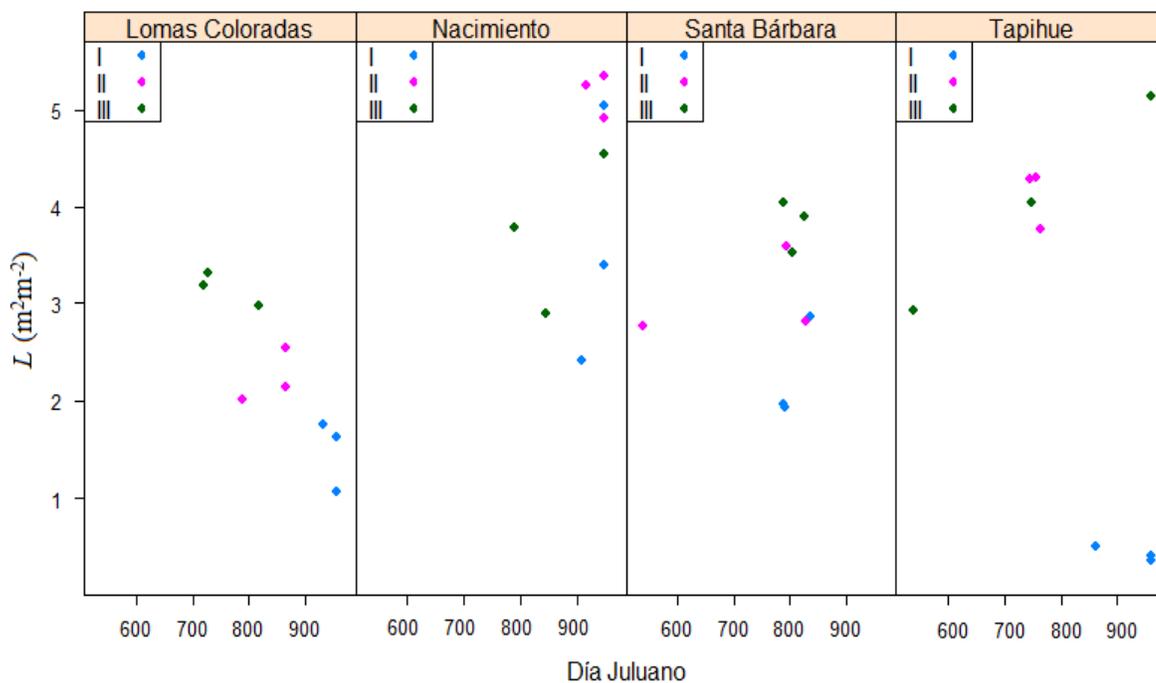
Las mediciones realizadas mensualmente de  $L$  utilizando un ceptómetro permitieron establecer tendencias anuales muy consistentes entre los efectos principales e interactivos de las clases de edad y del sitio sobre el  $L$ . En la figura 5, se observa que los efectos producidos por las clases de edad son altamente significativos ( $F_{2, 24} = 31,02; p < 0,001$ ); mayores a los efectos producidos por el sitio ( $F_{3, 24} = 14,67; p < 0,001$ ). Los efectos interactivos de la clase de edad y los sitios ( $F_{6, 24} = 6,68; p < 0,001$ ), también fueron significativos, pero menos importantes que la de los efectos principales de la edad y el sitio. Esta interacción se aprecia, por ejemplo, cuando el  $L$  de la clase de edad II es mayor que el de las otras clases para algunos sitios pero para otros no.

### 3.2. Patrones temporales de cambio del índice de área foliar

Los máximos valores observados de  $L$  (con su correspondiente desviación estándar) fueron similares para los distintos sitios (Cuadro 5). Se aprecia que el máximo  $L$  ocurre más temprano en Santa Bárbara ( $777 \pm 92$ ) y más tardíamente en Nacimiento ( $912 \pm 57$ ), con valores intermedios para Lomas Coloradas ( $847 \pm 91$ ) y Tapihue ( $810 \pm 140$ ).

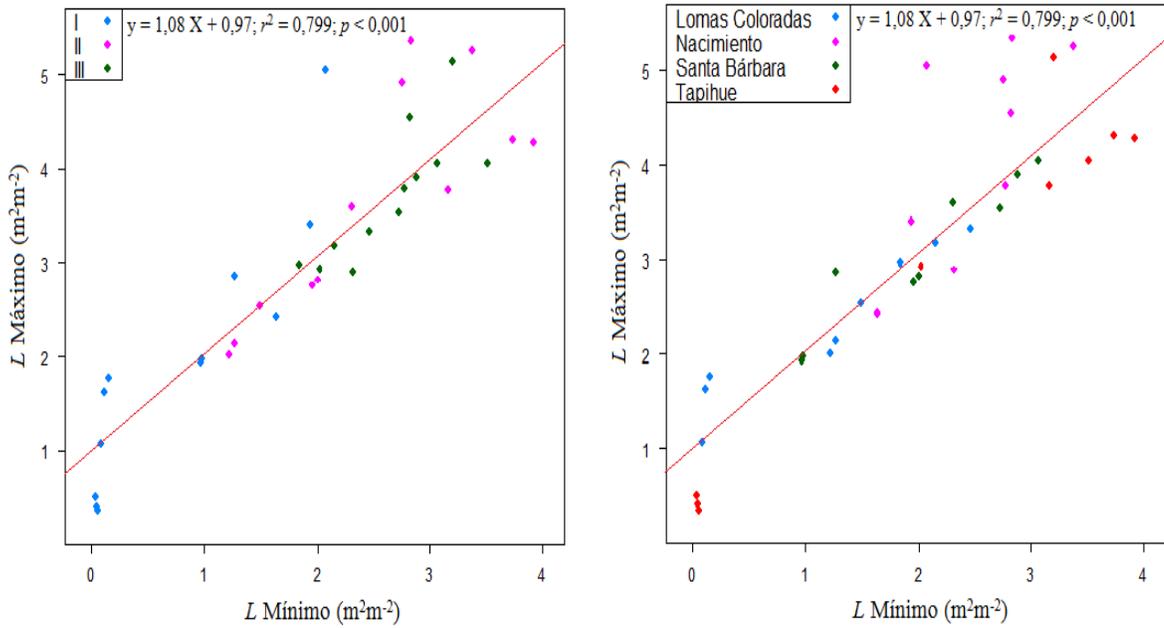
**Cuadro 5.** Días julianos promedios  $\pm 1$  desviación estándar para cada una de las clases de edad en que se alcanza máximos valores de  $L$ :

Clase de Edad	Variables		
	Día Juliano Promedio	Desviación Estándar (-)	Desviación Estándar (+)
Lomas Coloradas	26-04-2012	26-01-2012	26-07-2012
Nacimiento	30-06-2012	04-05-2012	26-08-2012
Santa Bárbara	16-02-2012	16-11-2011	18-05-2012
Tapihue	20-03-2012	01-11-2011	07-08-2012



**Figura 6.** Relación entre el valor máximo de índice de área foliar y el día juliano en cada uno de los predios estudiados y sus clases de edad.

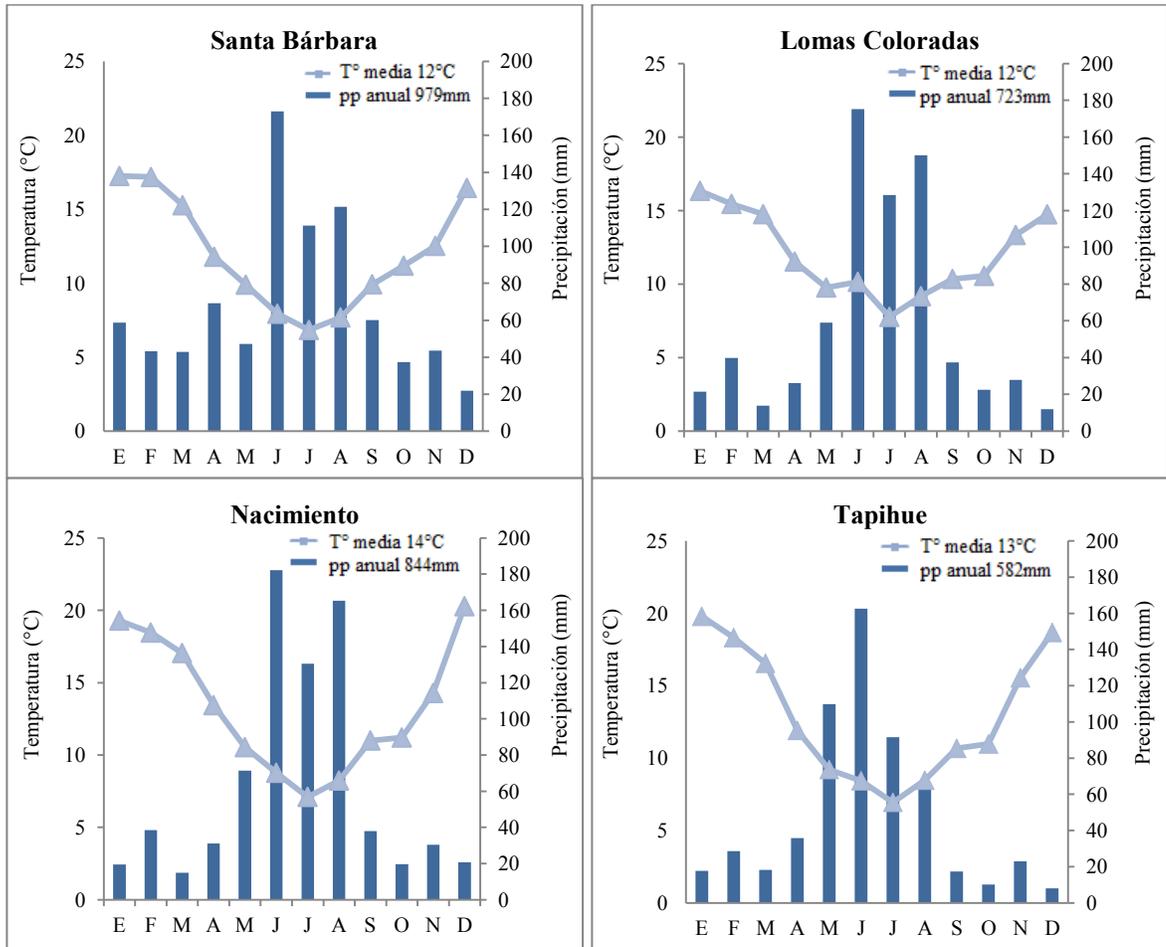
Se establecieron relaciones entre los valores de  $L$  máximo y  $L$  mínimo. En la figura 7, se puede observar esta relación donde también se distinguen con distintos colores las clases de edad y los sitios. La relación entre los valores máximos y mínimos de  $L$  tienen un buen ajuste ( $r^2 = 0,799$ ;  $p < 0,001$ ) independientemente de las clases de edad y del sitio.



**Figura 7.** Relación del  $L$  mínimo versus  $L$  máximo.

### 3.3. Influencia del clima sobre los patrones temporales del índice de área foliar

Los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas de Escuadrón, Pichún, Santa Bárbara y Trilahue que mantiene Forestal Mininco, ayudaron a generar diagramas ombrotérmicos (Figura 8) para cada uno de los predios.



**Figura 8.** Diagrama ombrotérmicos de las estaciones meteorológicas cercana de cada uno de los sitios estudiados donde se midió el índice de área foliar ( $L$ ) en la Región del Bío Bío.

En el cuadro 6, se aprecia información de las variables meteorológicas, donde la temperatura mínima mensual más extrema se registró en Lomas Coloradas (0,8 °C), mientras que la temperatura máxima mensual más alta se registró en Nacimiento (26,9 °C) y Tapihue (26,9 °C).

El registro más bajo de humedad relativa se detectó en Nacimiento (72,4 %) y el mayor en Lomas Coloradas (86,9 %). En cuanto a lo que sucede con la radiación solar, los valores más bajos son registrados en Tapihue (8589 MJ/m<sup>2</sup>) y los mayores en Nacimiento (12588 MJ/m<sup>2</sup>).

**Cuadro 6.** Promedio de las variables climáticas para 3 años (2010, 2011 y 2012)

		VARIABLES					
		T mínima	T media	T máxima	Humedad Relativa	Radiación Solar	PP
Unidad		°C	°C	°C	%	MJ/m <sup>2</sup>	mm
Lomas Coloradas		0,8	11,9	22,6	86,9	9.758	700,8
Nacimiento		4,8	13,1	26,9	72,4	12.588	736,1
Santa Bárbara		3,4	12,0	24,6	82,6	10.671	830,0
Tapihue		1,1	12,7	26,9	74,6	8.589	577,6
ANOVA	Clase de Edad	***	***	***	***	***	***
	Sitio	***	***	***	***	***	***
	C. Edad x Sitio	***	***	***	***	***	***

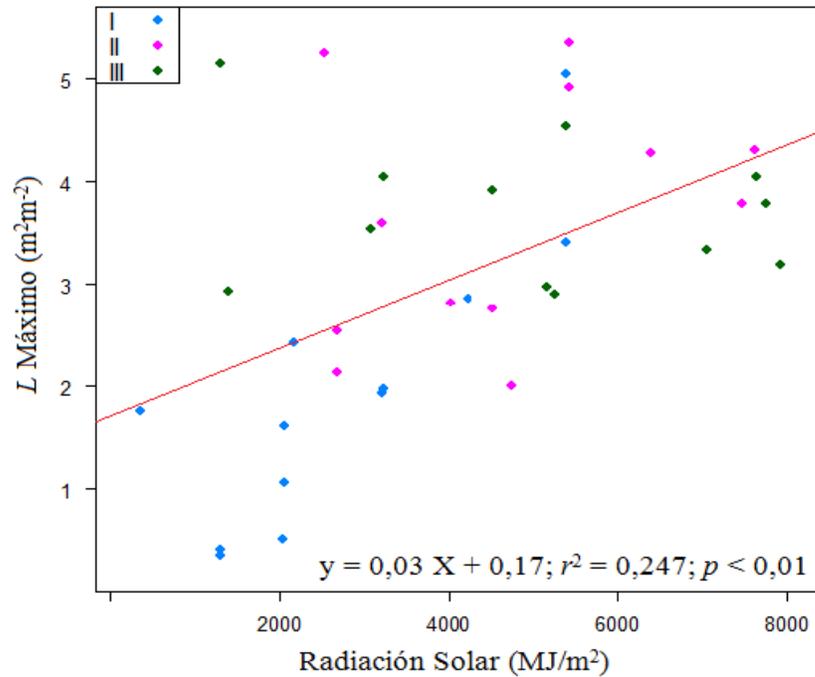
\*:  $p < 0,05$ ; \*\*:  $p < 0,01$ ; \*\*\*:  $p < 0,001$ ; ns:  $p > 0,05$

Se realizó una matriz de correlación (Cuadro 7) entre las variables meteorológicas (Temperatura mínima, temperatura media, temperatura máxima, humedad relativa, radiación solar y precipitación) y el  $L$ , donde se obtuvieron los siguientes resultados: T mínima ( $Person-r = 0,019$ ;  $p > 0,05$ ); T media ( $Person-r = 0,003$ ;  $p > 0,05$ ); T máxima ( $Person-r = 0,086$ ;  $p > 0,05$ ); Humedad relativa ( $Person-r = -0,159$ ;  $p > 0,05$ ); Radiación solar ( $Person-r = 0,519$ ;  $p < 0,001$ ) y Precipitación ( $Person-r = -0,097$ ;  $p > 0,05$ ). Del análisis anterior se desprende que ninguna de las variables analizadas genera influencias significativas en el incremento de  $L$ , salvo en el caso de la radiación solar que muestra una asociación positiva.

**Cuadro 7.** Matriz de Correlación de Pearson's, para las variables meteorológicas y el índice de área foliar máximo.

	$L$	Humedad Relativa	Precipitación	Radiación Solar	Temp. mínima	Temp. media	Temp. máxima
$L$	1.000	-0.159 ns	-0.097 ns	0.519 ***	0.019 ns	0.003 ns	0.086 ns
Humedad Relativa		1.000	0.003 ns	-0.403 *	-0.451 **	-0.648 ***	-0.722 ***
Precipitación			1.000	-0.094 ns	-0.064 ns	-0.021 ns	0.034 ns
Radiación Solar				1.000	0.205 ns	0.445 ***	0.571 ***
T mínima					1.000	0.848 ***	0.615 ***
T media						1.000	0.926 ***
T máxima							1.000

\*:  $p < 0,05$ ; \*\*:  $p < 0,01$ ; \*\*\*:  $p < 0,001$ ; ns:  $p > 0,05$



**Figura 9.** Gráfico de dispersión entre el  $L$  máximo y la radiación solar acumulada.

Se realizó una regresión lineal múltiple entre la clase de edad, el área basal y la radiación solar acumulada con respecto al  $L$  máximo, en donde se aprecia que esta tiene un buen ajuste ( $r^2 = 0,952$ ;  $p < 0,001$ ), siendo el área basal ( $Pearson-r = 0,849$   $p < 0,001$ ) y la radiación solar ( $Pearson-r = 0,401$ ;  $p < 0,01$ ) las que influyen en el modelo.

En la apéndice 1 (a, b, c y d) se presentan gráficos dispersión de  $L$  y variables meteorológicas relevantes, para cada uno de los predios en donde se puede observar la influencia de cada una de estas variables sobre el comportamiento de  $L$ .

### 3.4. Relación entre variables de estado y el índice de área foliar

El área basal aumenta en casi todos los sitios con respecto a la edad (Cuadro 4); siendo la excepción Nacimiento, donde se registraron los mayores valores de área basal en la clase de edad II ( $52,9 \pm 2,5 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ ,  $1053 \text{ árb ha}^{-1}$ ) disminuyendo en la clase de edad III ( $29,9 \pm 2,7 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ ,  $273 \text{ árb ha}^{-1}$ ), lo cual se puede atribuir a raleos efectuados por Forestal Mininco. Por su parte Santa Bárbara y Tapihue tienen igual área basal en la clase de edad III ( $46,9 \pm 2,4$  y  $46,9 \pm 5,5 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ ), pero hay diferencias significativas en la cantidad de árboles por hectárea presentes en cada uno de estos predios respectivamente ( $417$  y  $1140 \text{ árb ha}^{-1}$ ).

En cuanto a los valores de follaje, la clase de edad II presenta los mayores registros: Lomas Coloradas ( $8,9 \pm 0,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ); Nacimiento ( $14,0 \pm 0,3 \text{ kg ha}^{-1}$ ), Santa Bárbara ( $12,9 \pm 0,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y Tapihue ( $12,6 \pm 0,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ). La biomasa total se incrementó a medida que

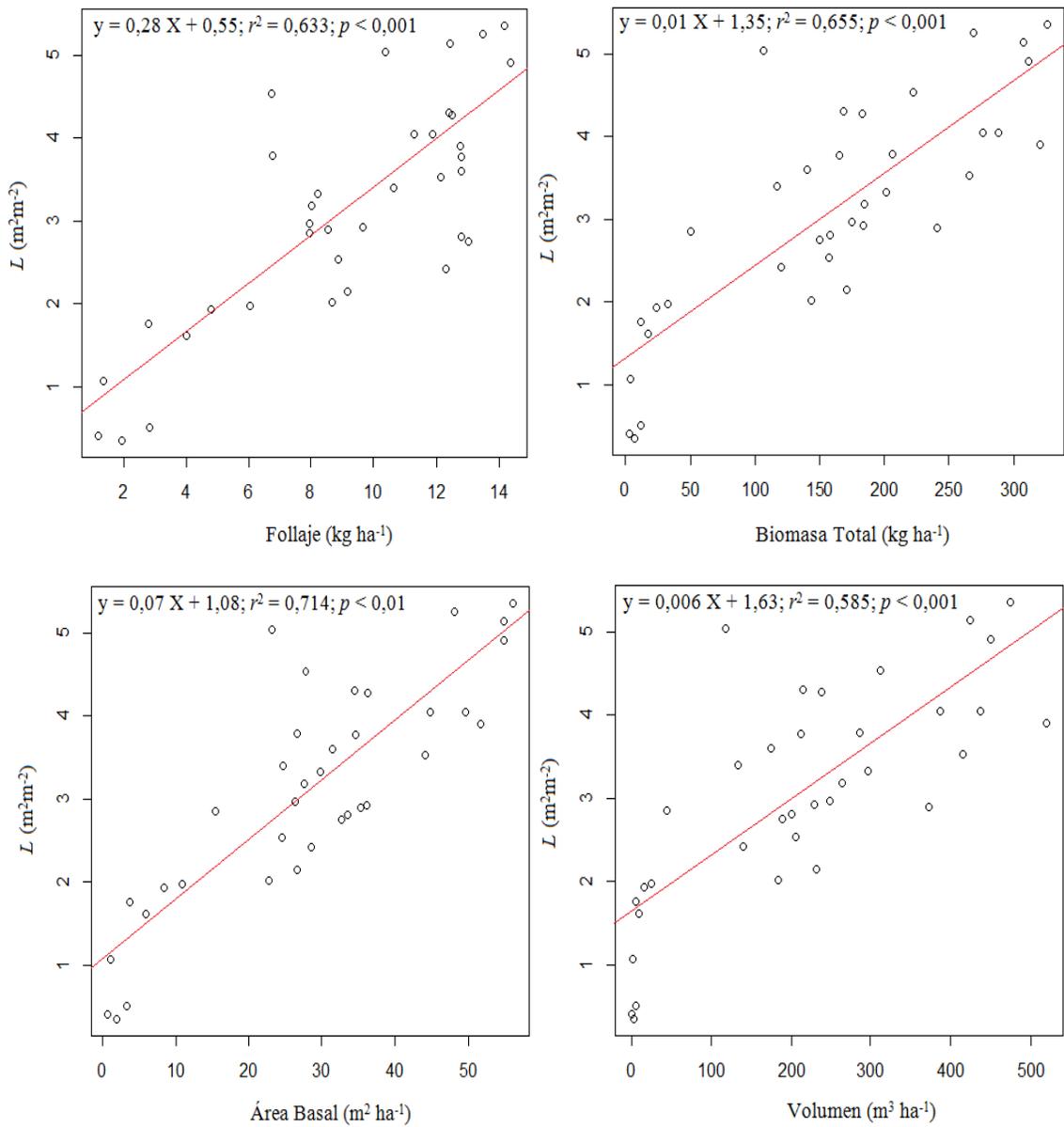
aumentaba la clase de edad de cada uno de los predios. Sin embargo el mayor valor se obtuvo en la clase de edad II en Nacimiento ( $302,3 \pm 17,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y por el contrario el menor registro se alcanzó en la clase de edad III en Tapihue ( $7,3 \pm 2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Lo anterior sugiere que  $L$  culmina entre los 7-14 años.

**Cuadro 8.** Matriz de Correlación de Pearson's, para las variables de estado del rodal y el índice de área foliar.

	$L$	$L_{BF}$	$L_{min}$	NHA	H	DAP	AB	V	IS	Follaje	Biomasa
$L$	1.000	0.802 ***	0.805 ***	-0.066 ns	0.664 ***	0.566 ***	0.850 ***	0.772 ***	0.437 ns	0.802 ***	0.815 ***
$L_{BF}$		1.000	0.825 ***	-0.029 ns	0.587 ***	0.531 ***	0.896 ***	0.725 ***	0.554 ***	1.000 ***	0.775 ***
$L_{min}$			1.000	-0.202 ns	0.735 ***	0.663 ***	0.876 ***	0.809 ***	0.371 *	0.825 ***	0.848 ***
NHA				1.000	-0.726 ***	-0.789 ***	-0.174 ns	-0.426 **	-0.218 ns	-0.029 ns	-0.377 *
H					1.000	0.965 ***	0.748 ***	0.867 ***	0.481 **	0.587 ***	0.868 ***
DAP						1.000	0.672 ***	0.816 ***	0.503 **	0.531 ***	0.795 ***
AB							1.000	0.938 ***	0.356 ns	0.895 ***	0.963 ***
V								1.000	0.311 ns	0.726 ***	0.963 ***
IS									1.000	0.554 ***	0.331 **
Follaje										1.000	0.776 ***
Biomasa											1.000

\*:  $p < 0,05$ ; \*\*:  $p < 0,01$ ; \*\*\*:  $p < 0,001$ ; ns:  $p > 0,05$

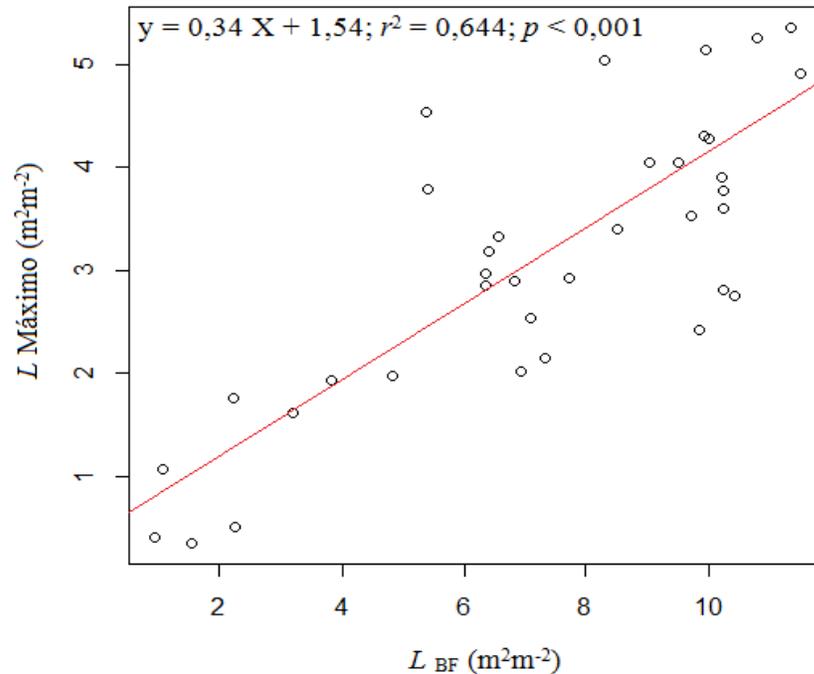
Según lo expuesto en el Cuadro 8, se observan efectos significativos de las siguientes variables de estado de los rodales sobre el  $L$ : Área basal ( $Person-r = 0,849$ ;  $p < 0,001$ ); el DAP ( $Person-r = 0,566$ ;  $p < 0,001$ ); la Altura ( $Person-r = 0,644$ ;  $p < 0,001$ ); el Volumen ( $Person-r = 0,772$ ;  $p < 0,001$ ); Follaje ( $Person-r = 0,802$ ;  $p < 0,001$ ) y la Biomasa total ( $Person-r = 0,815$ ;  $p < 0,001$ ). El índice de sitio no influyó significativamente sobre  $L$  ( $Person-r = 0,437$ ;  $p > 0,05$ )



**Figura 10.** Gráficos de dispersión de las variables de estado de rodal más significativas sobre el  $L$ .

### 3.5. Relación Ceptómetro / Biomasa

Al realizar una regresión lineal entre el  $L$  máximo calculado con el ceptómetro y el  $L_{BF}$  (Índice de área foliar obtenido a partir de biomasa foliar), se puede observar que tienen un buen ajuste ( $r^2 = 0,644$ ;  $p < 0,001$ ) y presentan una correlación positiva ( $Person-r = 0,802$ ;  $p < 0,001$ ) para todos los datos analizados. Además, se realizó una regresión lineal entre el  $L$  máximo y el  $L$  mínimo que entrega un buen ajuste ( $r^2 = 0,799$ ;  $p < 0,001$ ).



**Figura 11.** Comparación entre la dispersión del  $L$  máximo y el  $L_{BF}$  obtenido por biomasa.

A demás se realizó una regresión lineal entre  $L_{\text{mínimo}}$  y  $L_{BF}$ , obteniendo también un buen ajuste ( $r^2 = 0.680$ ,  $P < 0.001$ ).

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Relación del índice de área foliar con respecto a las clases de edad y los sitios

En el presente estudio se encontró una asociación positiva entre  $L$  y la edad. Los mayores aumentos mensuales en  $L$  se encontraron en la clase de edad I, luego en la II mientras que en la clase de edad III el crecimiento es prácticamente nulo.

En los predios de Nacimiento y Tapihue la clase de edad III presentó un menor  $L$  comparado con la clase de edad II, debido a que estos sitios fueron raleados por Forestal Mininco como parte de sus esquemas de manejo.

La edad es uno de los factores que tienen una mayor influencia sobre el índice de área foliar, obteniéndose valores similares a otros estudios (Jagodziński, 2008).

En cuanto a los sitios, también es posible apreciar la influencia de estos en el incremento del  $L$ , debido a los tipos de suelos presentes en cada una de las zonas de crecimientos de *Pinus radiata*, concuerdan con los resultados obtenidos para la productividad en suelos característicos de la VIII Región (Gerding, 1995; Schlatter, 1999).

Los valores máximos de  $L$  dependen de la edad de las plantaciones y la calidad de los sitios (Vose *et al.*, 1994). En el caso del presente estudio, observamos que los mayores incrementos del  $L$  se generan en las clases de edad I y II, mientras que no se observaron incrementos apreciables en la clase de edad III. Esto se ve favorecido por las diferentes zonas de crecimientos estudiadas en las cuales existen diferentes productividades para *Pinus radiata* (Schlatter, 1999).

En el predio Nacimiento se encontraron los mejores incrementos de  $L$  en sus clases de edad I y II ( $3,6 \pm 0,8$  y  $5,2 \pm 0,1$   $m^2m^{-2}$ ), no presentándose los mismos rendimientos en su clase de edad III ( $3,7 \pm 0,5$   $m^2m^{-2}$ ), debido a que estas parcelas fueron afectadas por procesos de raleo. El mayor valor de  $L$  en la clase de edad III se obtuvo en el predio Tapihue ( $4,04 \pm 0,6$   $m^2m^{-2}$ ). Los menores valores de  $L$  en la clase de edad I se encuentran en el predio Tapihue ( $0,4 \pm 0,04$   $m^2m^{-2}$ ). En cuanto a los valores mínimos de la clase de edad II y III esto se encuentran en el predio Lomas Coloradas ( $2,2 \pm 0,2$  y  $3,2 \pm 0,1$   $m^2m^{-2}$ ).

### 4.2. Relación de las variables temporales sobre el índice de área foliar

Existe una marcada tendencia estacional con máximos de área foliar que ocurren consistentemente en verano y mínimos en invierno. Esto puede ocurrir por fluctuaciones naturales en el área foliar o resulta ser un efecto de la medición con ceptómetro (p.ej. cambio en la inclinación en los rayos de sol a lo largo del año). Una de las razones biológicas para la estacionalidad en los valores de  $L$ , puede ser explicada debido a que los

valores mínimos de  $L$ , ocurren en invierno periodo donde no hay crecimiento y existe una fuerte caída de hojarasca.

#### **4.3. Influencia de las variables climatológicas sobre el índice de área foliar**

Para el caso de este estudio las variables climatológicas tanto como de temperatura, precipitación y humedad relativa influyen positivamente en la productividad de *Pinus radiata* (Gerding, 1995; Schlatter, 1999; Mason, 2011; Álvarez, 2013). Sin embargo estas variables no muestran una generación de efectos significativos en el aumento o disminución del  $L$ , obteniendo resultados disímiles con respecto al estudio de (Grier, 1977). La radiación solar es la única variable climatológica analizada que presenta una asociación positiva ( $Person-r = 0,519$ ;  $p < 0,001$ ) con respecto al  $L$ . Monteith (1977) encontró una fuerte correlación positiva entre la productividad de cultivos y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en un ancho de banda de 400 a 700 nm que es absorbida, lo que reafirma los resultados obtenidos.

#### **4.4. Relación del índice de área foliar con las variables de estado del rodal**

Las variables que influyen de manera significativas sobre el índice de área foliar son las siguientes:

- a) Biomasa total: presenta una correlación positiva ( $Person-r = 0,815$ ;  $p < 0,001$ ) con el  $L$ , lo que se ve corroborado con los valores obtenidos en el cuadro 7, (Jagodziński, 2008). Este autor plantea que la biomasa se correlaciona significativamente con el  $L$ , encontrándose los mayores coeficientes de determinación en la biomasa foliar, siendo todos los componentes de la biomasa estadísticamente significativos.
- b) Número de árboles por hectárea (NHA): presenta una correlación negativa con respecto al  $L$  ( $Person-r = -0.066$ ;  $p > 0,05$ ), concordando con los resultados obtenidos por (Jagodziński, 2008).
- c) Área basal: presenta una correlación positiva ( $Person-r = 0,849$ ;  $p > 0,05$ ) al  $L$ . Esto podría indicar que los menores valores de índice de área foliar fueron encontrados donde existía menor cantidad de área basal. Esta relación no se cumple a cabalidad como lo demuestra el cuadro 4, lo que se ve corroborado por diversos estudios (Küßner, 2000; Mason, 2012).

- d) Follaje: presenta una correlación positiva con el  $L$  ( $Person-r = 0,802$ ;  $p < 0,001$ ). Sin embargo, variadas investigaciones aseguran que la intercepción de la luz estimada mediante instrumental óptico es influenciada por la vegetación leñosa lo cual produciría estimaciones sesgadas del índice de área foliar (Gower y Norman, 1991; Gower et al, 1999; Kucharik et al, 1998; Küßner y Mosandl, 2000; Leblanc y Chen, 2001). Sin embargo la correlación obtenida en el presente estudio para el follaje permitirían establecer esta variable como un resultado sólido para la determinación rápida y efectiva del  $L$  (Jagodziński, 2008).

La variable que influye en menor grado sobre el índice de área foliar es:

- a) Volumen: presenta una correlación positiva con respecto al índice de área foliar ( $Person-r = 0,772$ ;  $p < 0,001$ ), obteniendo resultados similares a los entregados por otros estudios (Linder, 1984).
- b) DAP y Altura: ambos presentan una escasa significancia sobre el  $L$ . Aun así entregan una buena correlación, lo cual sin embargo no garantiza que sean buenos predictores del  $L$ .

#### 4.5. Relación entre Ceptómetro y $L_{BF}$

El  $L$  obtenido a partir de la Biomasa Foliar se correlacionó con valores de  $L$  mínimo ( $Person-r = 0,825$ ;  $p < 0,001$ ) y de  $L$  máximo ( $Person-r = 0,802$ ;  $p < 0,001$ ) obtenido mediante el ceptómetro. Aquí se puede apreciar que el  $L$  mínimo tiene la mejor correlación con el  $L_{BF}$ , Mason (2012) afirma que la relación fue mayor para los pequeños valores de  $L$  que para valores grandes.

Este indicador permite realizar modelaciones robustas en *Pinus radiata*, a partir de evaluaciones rápidas del  $L$ . La correlación positiva obtenida entre el  $L$  máximo y  $L_{BF}$ , también se confirma con valores obtenidos por Gower y Norman (1991), quienes estimaron que los valores de  $L$  para cuatro coníferas eran entre un 35-40% por debajo de los valores de  $L$  directos.

Los valores de  $L$  registrados con ceptómetro deben ser calibrados mediante muestreo destructivo de biomasa, utilizando las funciones de biomasa de Madgwick (1994), de esta forma se procede a obtener el índice de área foliar a partir de biomasa foliar ( $L_{BF}$ ). Así se podrá realizar una buena calibración y se obtendrán valores confiables de índice de área foliar para el ceptómetro

## 5. CONCLUSIONES

- La edad es uno de factores que tienen mayor influencia sobre el índice de área foliar, en donde a medida que aumenta la edad se produce un aumento en el  $L$ . Sin embargo la mayor acumulación de  $L$  ocurre en los primeros 10 años.
- La radiación solar tienen una asociación positiva con el incremento del  $L$ , en donde los mayores valores de radiación solar fueron obtenidos en el predio Nacimiento ( $12588 \text{ MJ/m}^2$ ) predio que alcanzo los mayores registros de  $L$  ( $5,2 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ ). Los menores valores de radiación solar se dieron en Tapihue ( $8589 \text{ MJ/m}^2$ ) en donde se registró el menor valore de  $L$  ( $0,4 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ ).
- Las variables de estado analizadas en el presente estudio (DAP, DAC, Altura Total, entre otras), no influyen en el índice de área foliar. Por lo mismo, para generar modelos precisos e insesgados de predicción de  $L$  se debería utilizar otros factores, que acompañasen las variables anteriormente expuestas, lo cual nos llevaría a obtener resultados más confiables.
- La estimación del índice de área foliar por medio de métodos indirectos como el ceptómetro, permite generar modelos rápidos y confiables para la estimación de  $L$ , debido a que existe una correlación positiva entre el  $L$  máximo y  $L$  obtenido a partir de la biomasa foliar. Estudios revelan Gower y Norman (1991) plantea, que las mediciones de  $L$  indirectos en coníferas están entre un 35-40 % por debajo de los valores de  $L$  directos, concordando con los resultados obtenidos a lo largo del presente estudio.
- En torno al material bibliográfico relacionado con las variables climáticas (específicamente: temperatura, precipitación y humedad relativa), aún falta sistematizar datos o indicadores que permitan correlacionar directamente el aumento de índice de área foliar con fenómenos meteorológicos.

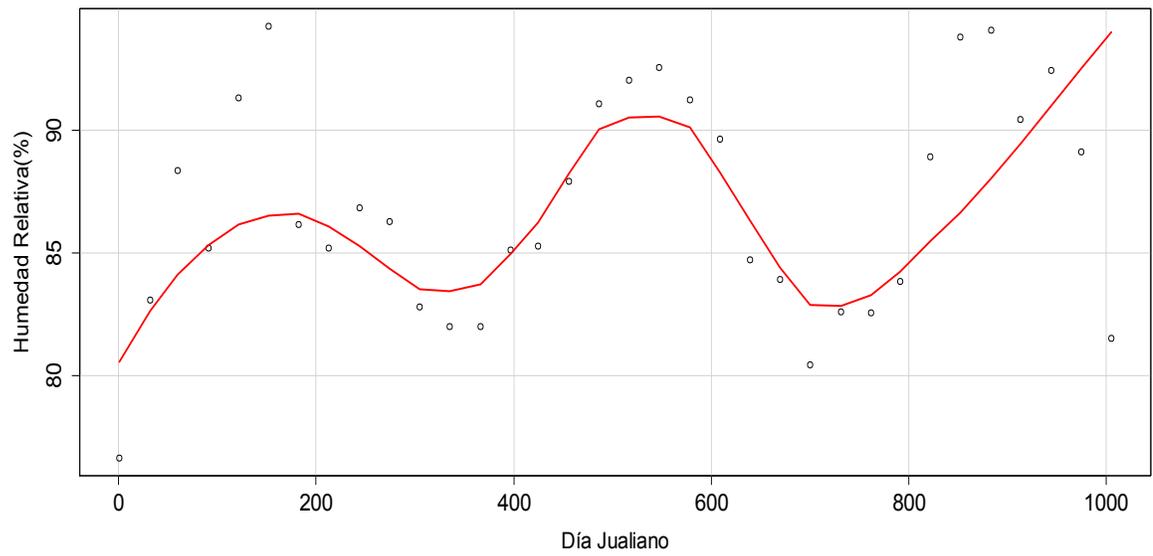
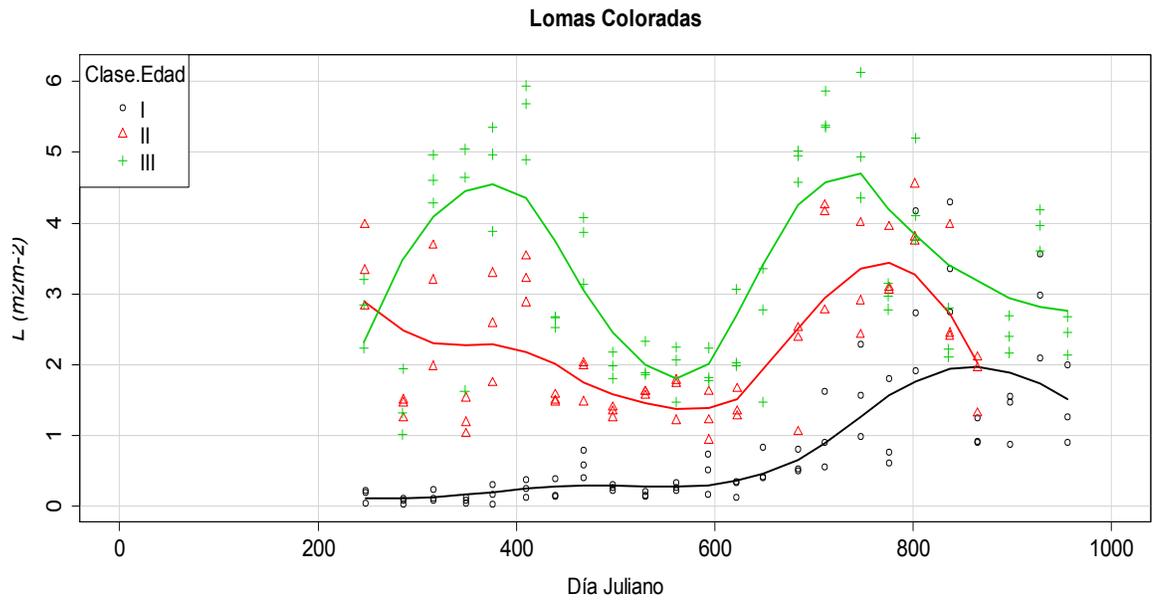
## 6. BIBLIOGRAFÍA

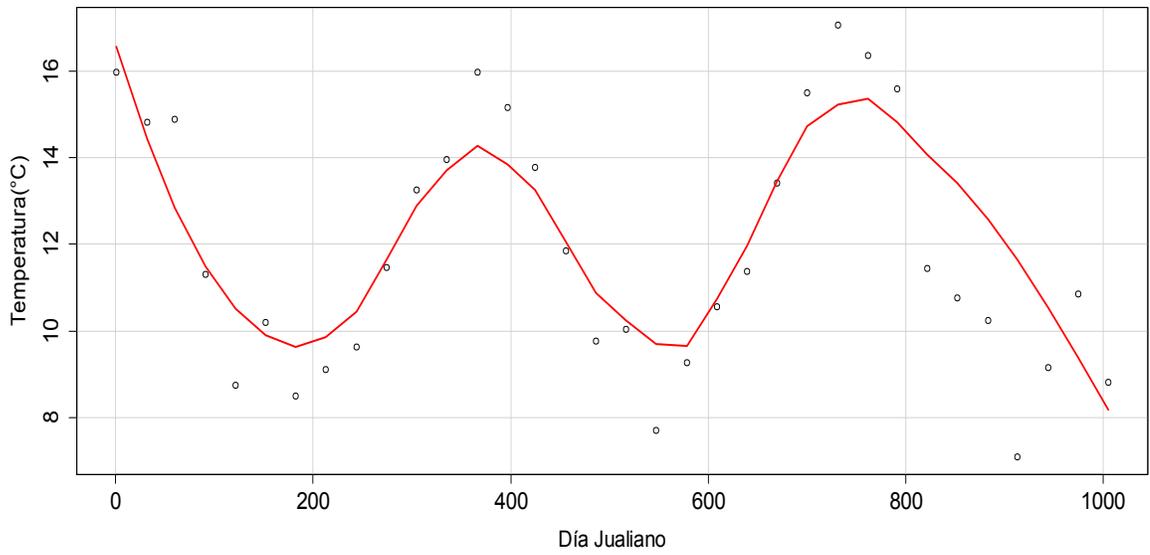
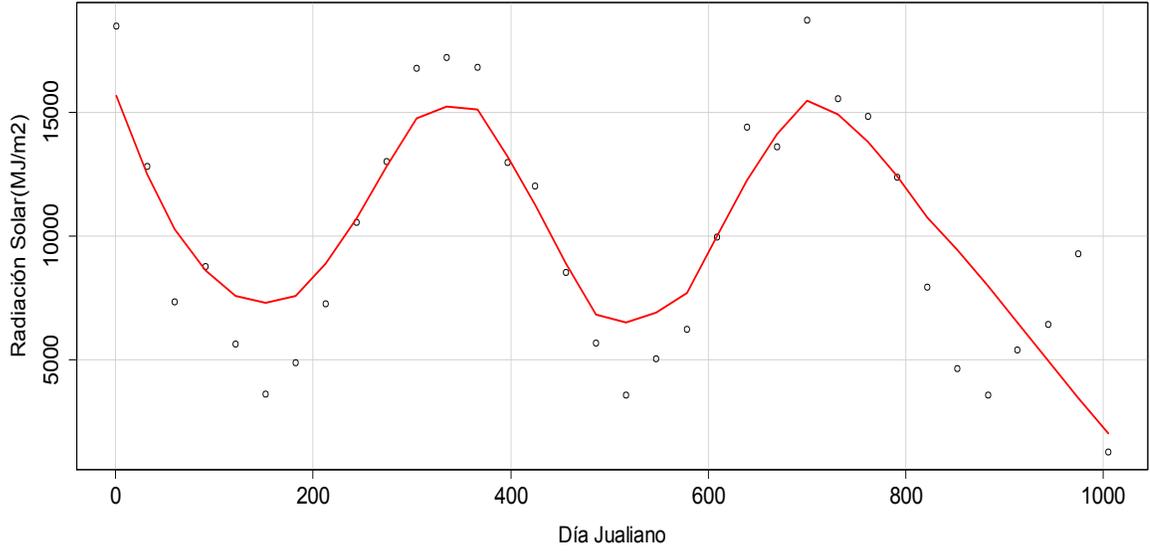
- ÁLVAREZ, J. 2013. Factors influencing the growth of radiate pine plantations in Chile. *Forestry An International Journal of Forest Research*. 86: 13–26.
- ARRIAZA, A.; FERNANDEZ, F.; LÓPEZ, M.; MUÑOZ, M.; PEREZ, S. y SANCHEZ, A. 2008. *Estadística básica con r y r-comander*. 9-160.
- BRÉDA, N. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54(392): 2403-2417.
- BOWN, H.E. (2007). Representing Nutrition of *Pinus radiata* in Physiological Hybrid Productivity Models. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 265 p.
- CHASON, J.; BALDOCCHI, D. y HUSTON, M. 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural Forest Meteorology* 57: 107-128.
- CHEN, J. M., RICH, P. M., GOWER, S. T., NORMAN, J. M., and PLUMMER, S. 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements. *J. Geophys. Res.* 102(D24):29,429–29,443.
- CLEVELAND, W. S. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *J. Amer. Statist. Assn.* 74: 829-836.
- CONTENSSE, D. 1986. Apuntes y consideraciones para la historia del pino radiata en Chile. *Bol. Acad. Chil. Hist.* 97: 351–373.
- DECAGON DEVICES, Inc. AccuPAR, PAR/LAI ceptometer model *LP-80*. 2010 (Operator's Manual Version 10)
- GERDING, V. and SCHLATTER, J.E. 1995. Important site variables and factors for *Pinus radiata* D. Don productivity in Chile. *Bosque* 16(2), 39–56.
- GHOLZ, H.L. and W.P. CROPPER. 1991. Carbohydrate dynamics immature *Pinus elliotti* var. *elliottii* trees. *Can. J. For. Res.* 21:1742–1747.
- GOWER, S.T. and J.M. NORMAN. 1991. Rapid estimation of leaf-area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology* 72:1896 –1900.
- GOWER, S.T., KUCHARIK, C.J., NORMAN, J.M. 1999. Direct and Indirect estimation of leaf area index,  $f_{APAR}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote sens. Environ* 70: 29-51.

- GRIER, C.G. and RUNNING, S.W. 1977. Leaf area of mature Northwestern coniferous forests: Relation to site water balance. *Ecology* 58: 893-899.
- HE, Y.; GUO, X. y WILMSHURST, J.F. 2007. Comparison of different methods for measuring leaf area index in a mixed grassland. *Can. J. Plant Sci.* 87: 803–813.
- IHAKA, R. Y GENTLEMAN R. 1996. R: A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5: 299-314.
- JAGODZINSKI, A.M.; KAUCKA, I. 2008. Age-related changes in leaf area index of young Scots pine stands. *Dendrobiology* 59: 57-65.
- JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYSA, B., COPPIN, P., WEISS, M., and 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.
- JONES, G. H. 1992. *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology.* Second edition. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 428
- KUCHARIK, C.J., NORMAN, J.M., GOWER, S.T., 1998. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agric. For. Meteorol.* 91, 69–88.
- KÜBNER, R., MOSANDL, R., 2000. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. *Can. J. For. Res.* 30 (3), 440–447.
- LAMBERS H, CHAPIN FSI, PONS TL. 2008. *Plant physiological ecology*, 2nd edn. New York: Springer.
- LEBLANC, S.G., CHEN, J.M., 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agric. For. Meteorol.* 110, 125–139.
- LINDER, S. and ROOK, D.A.BOWEN, G.D. and NAMBIAR, E.K.S. 1984. Effects of mineral nutrition on carbon dioxide exchange and partitioning in trees. *Nutrition of Plantation Forests.* London, Academic Press. 211–236.
- MADGWICK, H.A.I. 1994. *Pinus radiata - biomass, form and growth.* Ed. Madgwick, Rotorua, New Zealand. 428 pp.
- MASON, E.G., METHOL, R., COCHRANE, H., 2011. Hybrid mensurational and physiological modelling of growth and yield of *Pinus radiata* D.Don. using potentially useable radiation sums. *Forestry* 12 (2), 99–108.

- MASON, E.G., DIEPSTRASTEN M., PINJUV G., LASSERRE J. 2012. Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don. *Agricultural and Forest Meteorology* 167: 113-167
- MONTEITH, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series B-Biological Sciences*. 281:277-294.
- MOSER G, HERTEL D, LEUSCHNER C. 2007. Altitudinal Change in LAI and Stand Leaf Biomass in Tropical Montane Forests: a Transect Study in Ecuador and a Pan-Tropical Meta-Analysis. *Ecosystems* 198: 229–242.
- NOBEL, P. S. 1991. *Physiochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, San Diego. 474 p.
- NORMAN, J.M. and CAMBELL, G.S. 1989. Canopy Structure. In: Pearcy RW, Ehleringer J, Mooney HA, Rundel PW (eds) *Plant Physiological ecology: Field methods and instrumentation*. London: Chapman and Hall, pp. 301-325
- PARDÉ, J. 1980. Forest Biomass. *Forestry Products Abstracts*. Review Article 1980 (3): 165-184.
- PIERCE, L.L. and S.W. RUNNING. 1988. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology* 69:1762–1767.
- REICH, P. B., I. J. WRIGHT, J. CAVENDER-BARES, J. M. CRAINE, J. OLEKSYN, M. WESTOBY y M. B. WALTERS. 2003. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Science* 164 (3 Suppl.): S143-S164.
- RUNNING, S.W. and J.C. COUGHLAN. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecol. Model.* 42:125–154.
- SCHLATTER, J. and GERDING, V. 1999. Productivity in an example of six characteristic sites of the VIII Region with *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* 20(1), 65–77.
- VOSE, J.M., DOUGHERTY, P.M., LONG, J.N., SMITH, F.W., GHOLZ, H, L. and CURRAN, P.J. 1994. Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. *Ecological Bulletins* 43: 102-114.

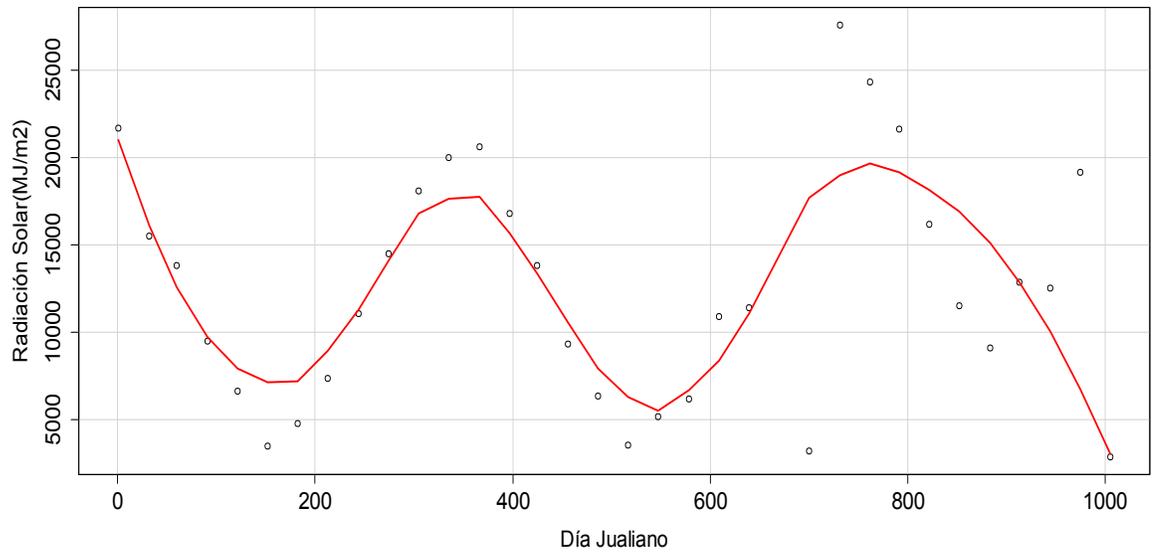
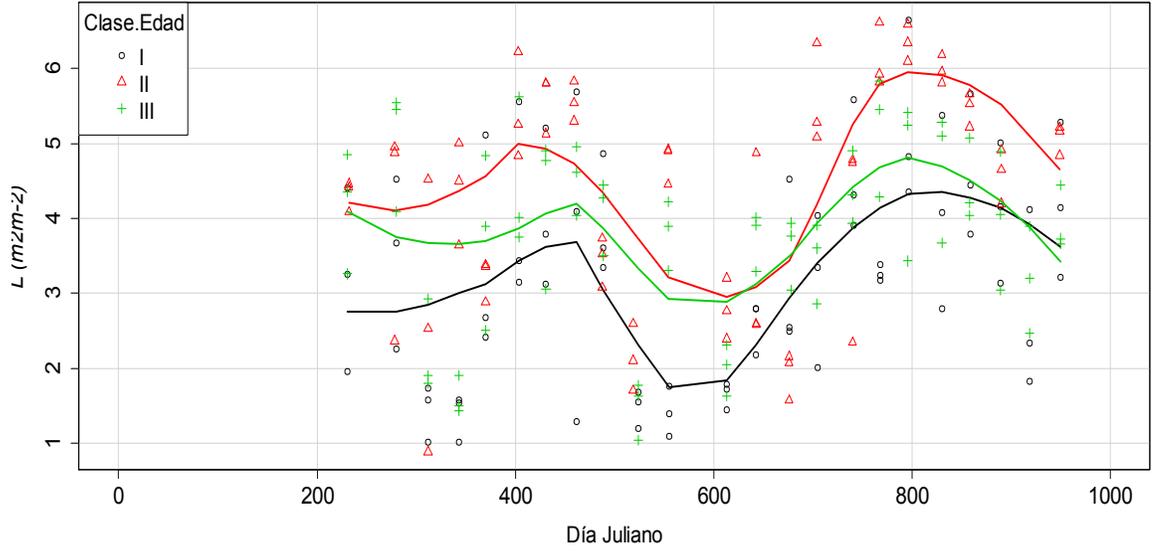
## 7. APÉNDICE

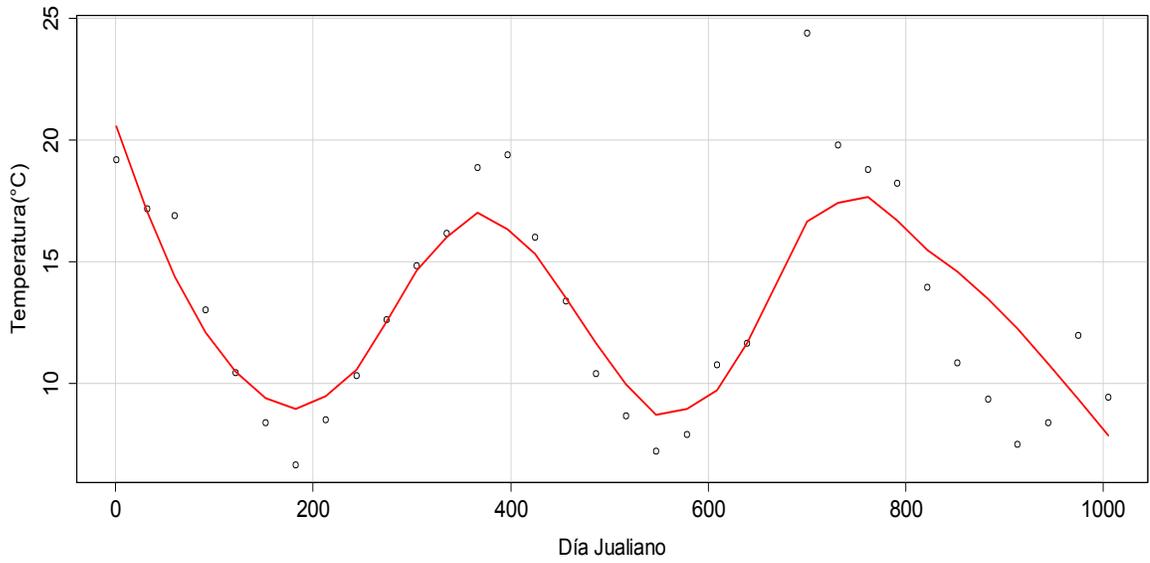
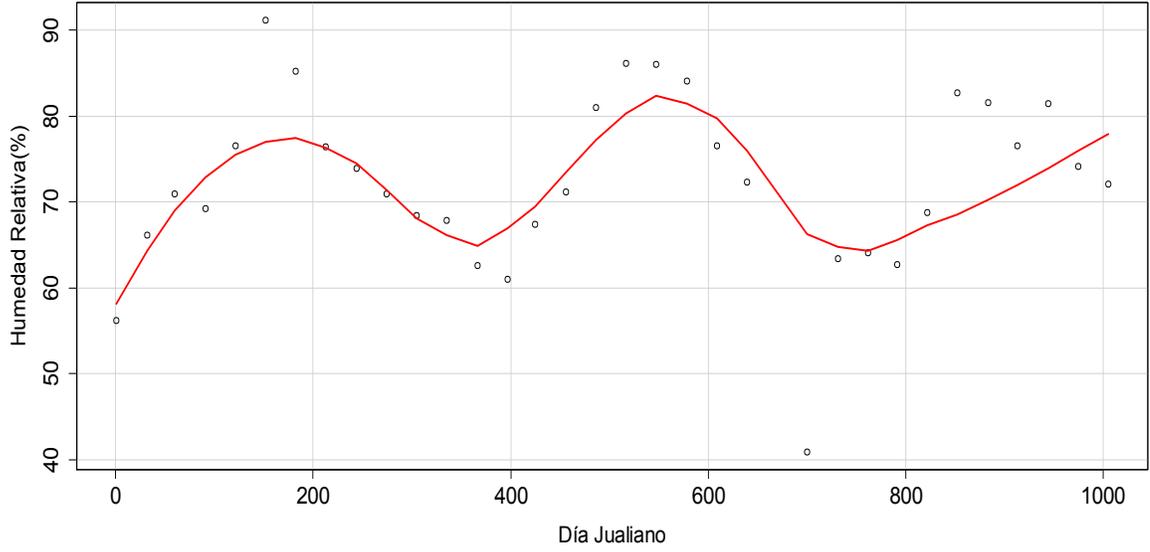




**Apéndice 1a.** Área foliar y variables climáticas relevantes para Lomas Coloradas

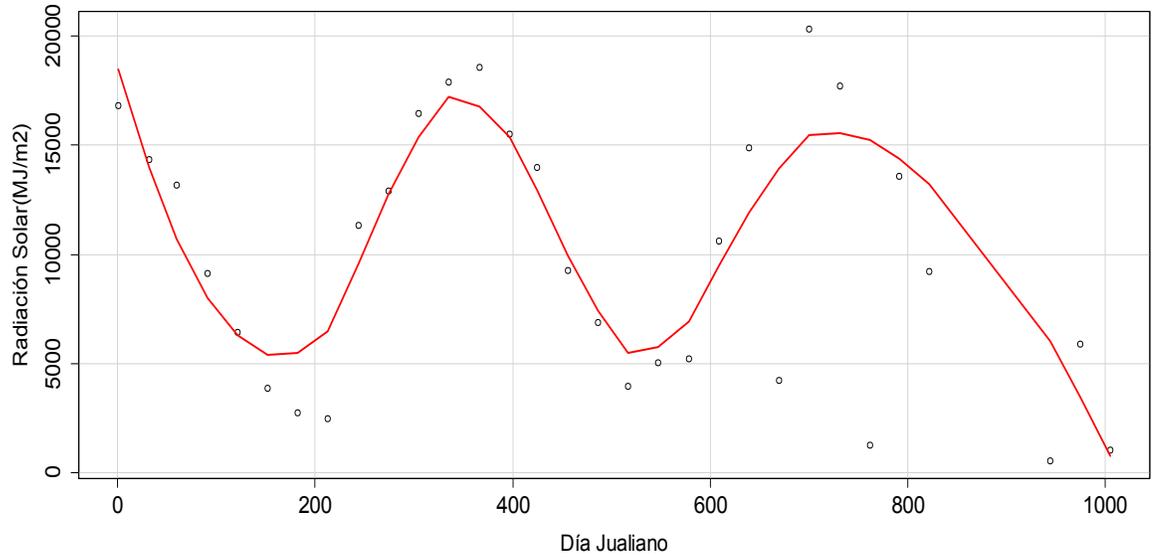
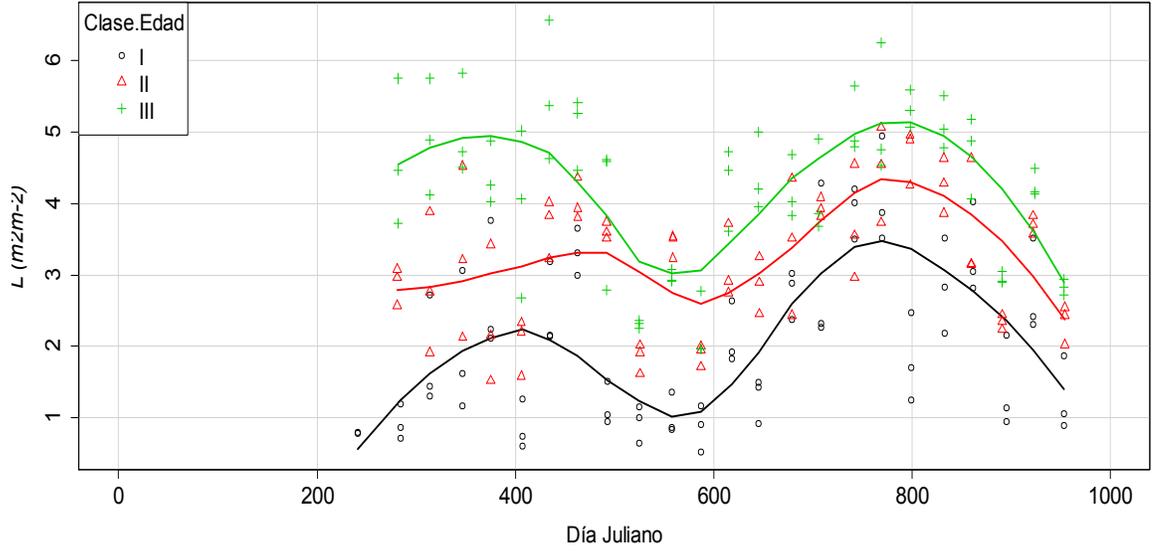
### Nacimiento

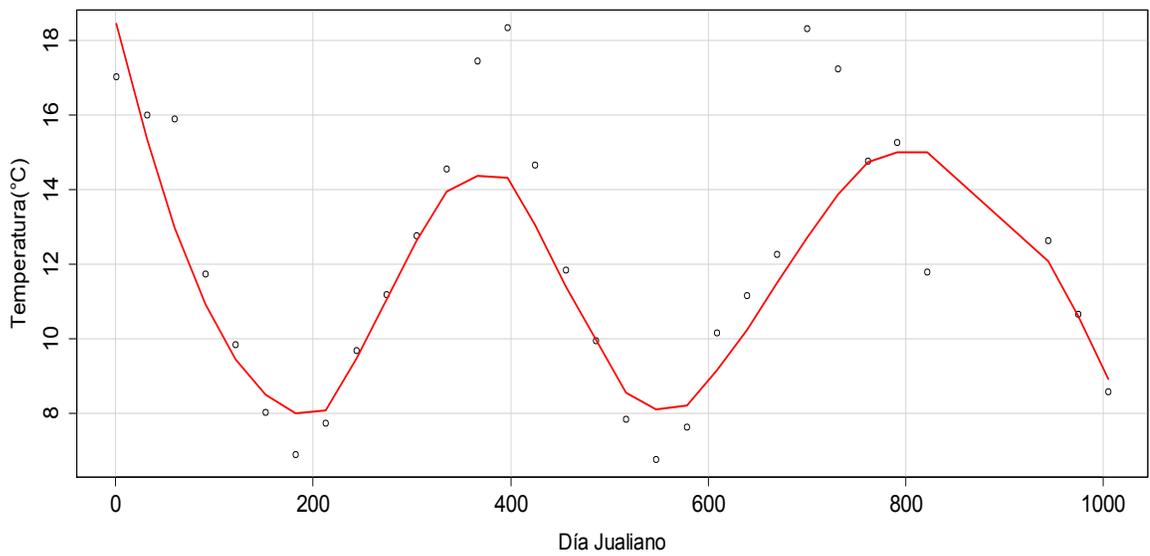
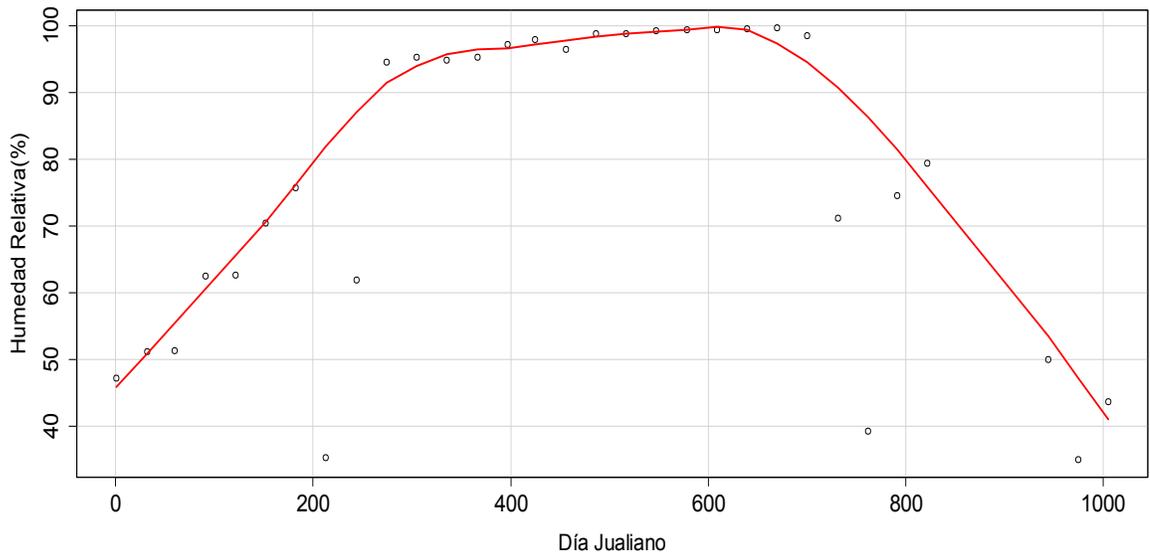




**Apéndice 1b.** Área foliar y variables climáticas relevantes para Nacimiento

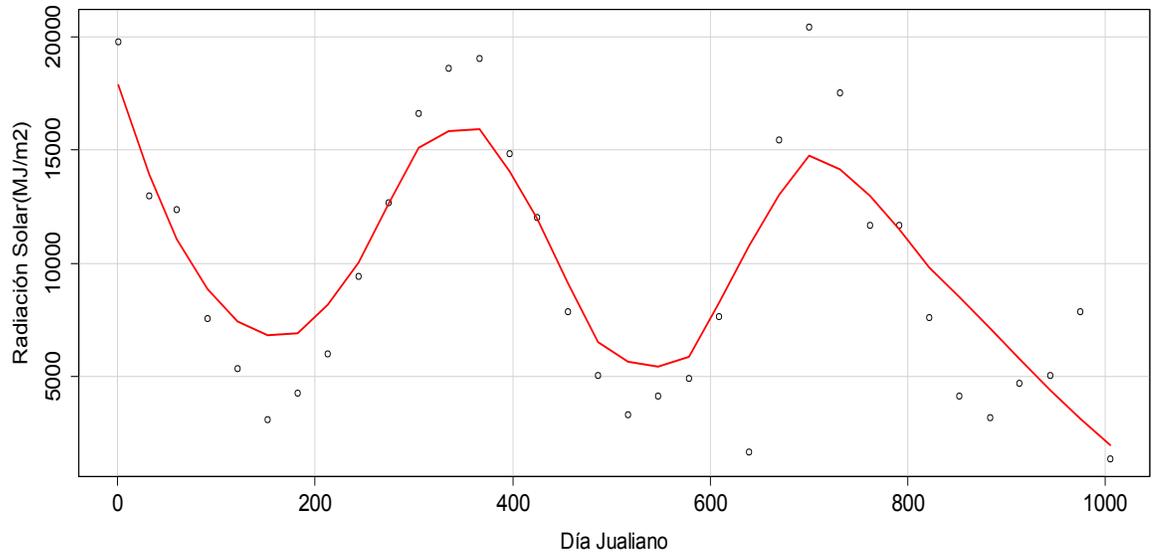
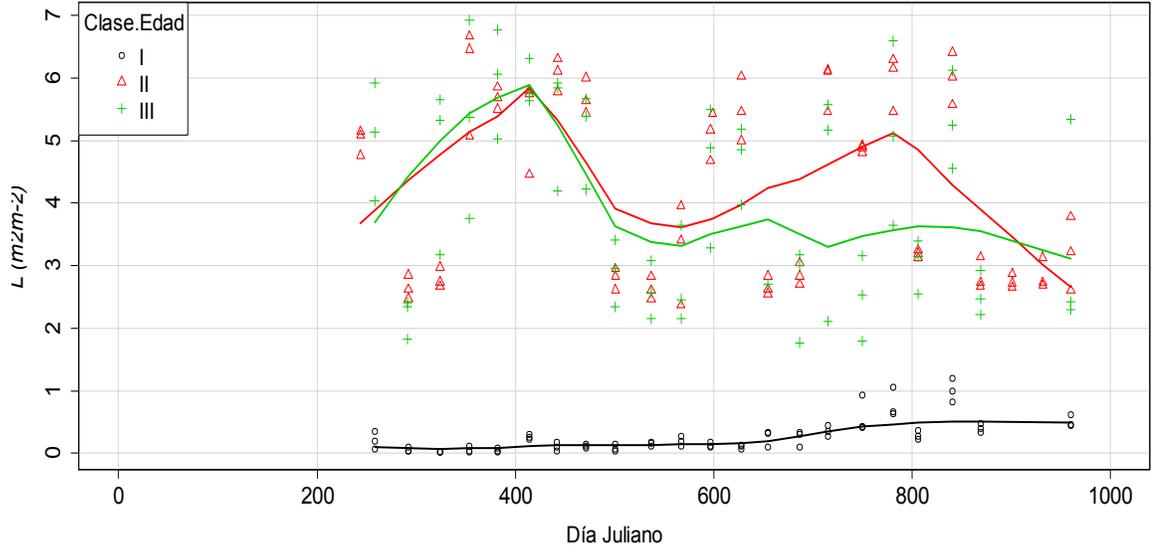
### Santa Bárbara

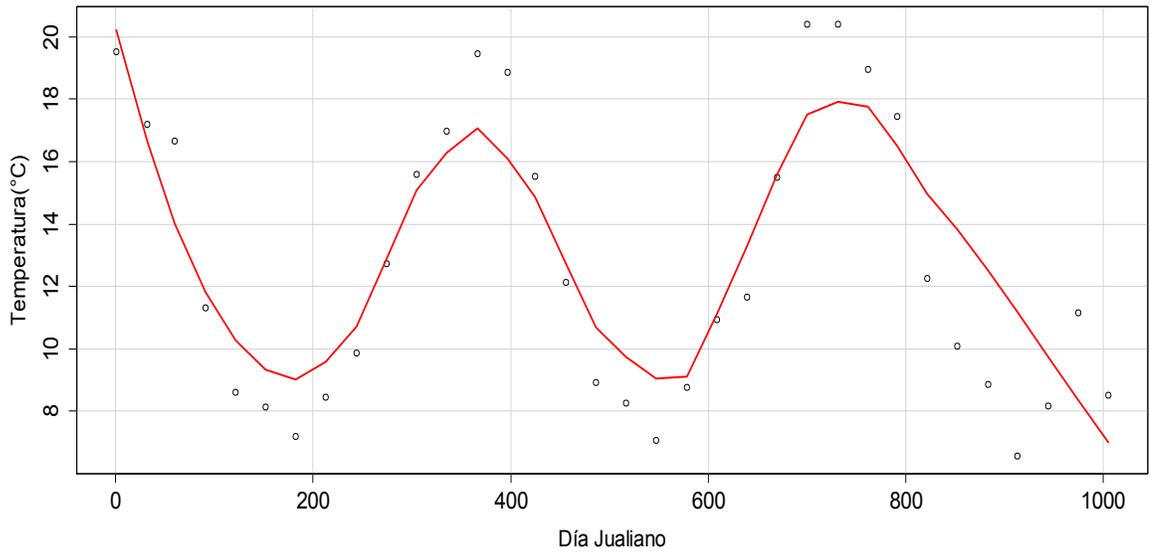
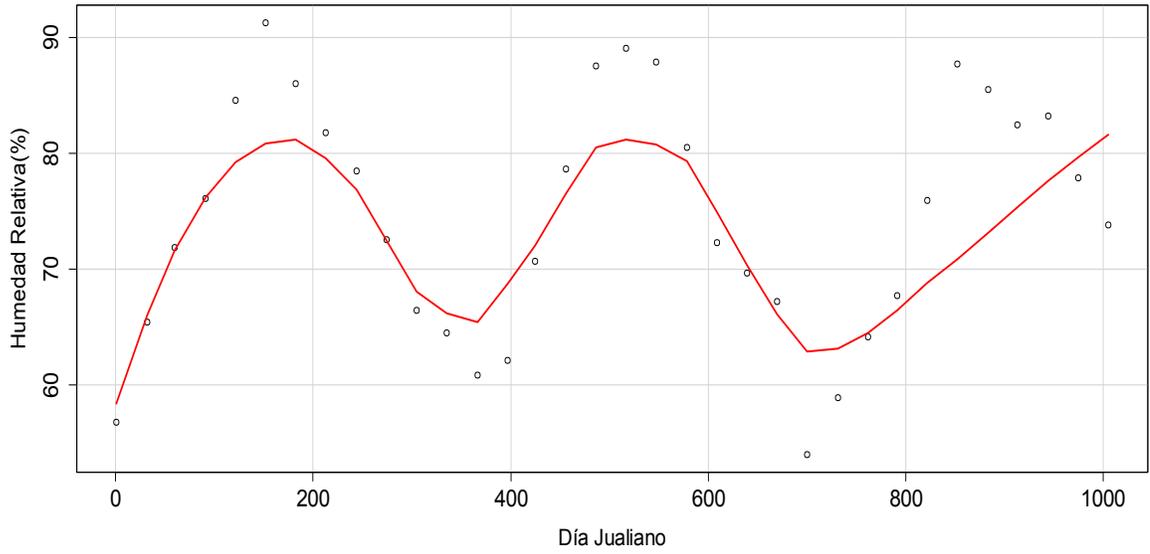




**Apéndice 1c.** Área foliar y variables climáticas relevantes para Santa Bárbara

### Tapihue





**Apéndice 1c.** Área foliar y variables climáticas relevantes para Tapihue