

Productividad en el ejemplo de seis sitios característicos de la VIII Región con *Pinus radiata* D. Don*

Productivity in a example of six characteristic sites of the VIII Region with *Pinus radiata* D. Don

JUAN SCHLATTER, VICTOR GERDING

Instituto de Silvicultura, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

SUMMARY

Six sites with adult stands of *P. Radiata* representing the main soil groups in the VIII Region (soils derived from: granitic rock formed *in situ*, pleistocene volcanic ash, metamorphic schist rock, sea sediments, holocene volcanic ashes and andesitic-basaltic volcanic sands) were studied. Each site was characterised with respect to climate, chemical and physical properties of the soil, litter and aerial biomass of the forest. The inventory of nutrients (C, N, P, K) of the soil-litter-forest system was evaluated. Tree growth was related to site factors, and those limiting factors were identified in each case. Finally the main management measures for the sustainability of *P. radiata* plantations in each site were deduced.

Key words: productivity, nutrient balance, biomass, *Pinus radiata*.

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúan seis sitios con rodales adultos de *P. radiata* que representan los principales grupos de suelos de la VIII Región (suelos derivados de: rocas graníticas formados *in situ*, esquistos metamórficos, cenizas volcánicas pleistocénicas, sedimentos marinos, cenizas volcánicas jóvenes y arenas volcánicas andesítico-basálticas). Se caracteriza cada sitio considerando el clima, las propiedades físicas y químicas del suelo, el mantillo y la biomasa aérea del vuelo; se evalúa el inventario de elementos nutritivos (C, N, P, K) del sistema suelo-mantillo-bosque; se relaciona el crecimiento de los árboles con los factores del sitio, y se identifican los factores limitantes para la producción en cada caso. De lo anterior se derivan las principales medidas de manejo para la sustentabilidad del cultivo de *P. radiata* en cada sitio.

Palabras claves: productividad, balance nutritivo, biomasa, *Pinus radiata*.

INTRODUCCION

La meta de la silvicultura es mantener o aumentar la capacidad productiva de los sitios y asegurar la estabilidad del bosque y su medio (Dengler 1982). Sin embargo, para lograrlo debe cumplirse una serie de requisitos, uno de los cuales es el conocimiento de la relación causal entre los factores del sitio y el crecimiento de las especies forestales. Al respecto, una de las especies cultivadas de las que se tiene mejor información es el *Pinus*

radiata D. Don (pino). En Chile el dominio sobre el tema es muy general, aunque numerosos estudios han permitido lograr un mejor conocimiento de la relación causal del crecimiento del pino con el sitio. Después de los estudios pioneros de Valenzuela (1964) y del Instituto Forestal (1966 y 1969) siguieron los de Schlatter *et al.* (1982), Cox (1982), Vera (1988), Schlatter y Gerding (1984) y Gerding y Schlatter (1995). A pesar de ello, al nivel de sitio los análisis son muy escasos o no existen.

* Trabajo presentado en X Silvotecn. IUFRO Conference. Site Productivity Improvement. Proyecto financiado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile (S-96-28).

En este trabajo se evalúan seis sitios con rodales de *P. radiata* que representan los principales grupos de suelos en la VIII Región, como una contribución al estudio de sitios específicos. Estos son analizados en detalle relacionando el crecimiento con los factores del sitio, y además se evalúa el inventario de elementos nutritivos del sistema suelo-bosque con el fin de identificar los factores que en cada caso particular son limitantes para la producción. La información así obtenida permite ilustrar las diferencias causales de la productividad en cada tipo de suelo y su proyección en rotaciones sucesivas.

METODOLOGIA

Origen de los datos. Los datos provienen de una serie de estudios anteriores que permitieron formar una base de datos que comprende 70 sitios con plantaciones adultas de *P. radiata*, abarcando la principal zona de distribución de esta especie en Chile (33°-41°S) (Delmastro *et al.* 1981, Peters *et al.* 1985, Schlatter 1986, Gerding 1991). En los trabajos de los autores indicados se describe de-

talladamente la metodología empleada en la obtención de datos. Para el trabajo que aquí se desarrolla se presenta, a continuación, una síntesis con los principales aspectos metodológicos.

Sitios seleccionados y sus características climáticas. Se seleccionaron seis sitios de la VIII Región, representativos de los principales grupos de suelos en los cuales se desarrollan las plantaciones de *P. radiata*: suelos derivados de rocas graníticas (graníticos) formados *in situ* (Oñate 1997), derivados de rocas esquistos metamórficos (Gerding 1991), rojo arcillosos derivados de cenizas volcánicas pleistocénicas (Leonelli 1998), derivados de sedimentos marinos (Arancibia 1999), formados por cenizas volcánicas jóvenes (trumaos) (Ruiz 1998) y arenas volcánicas andesítico-basálticas (arenas) (Edwards 1997) (cuadro 1).

Las características climáticas de los sitios se obtuvieron de Santibáñez y Uribe (1993) (cuadro 2). El sitio de más al norte es el del suelo granítico de Concepción, el más costero el de sedimentos marinos de Los Alamos y el más cordillerano el de cenizas volcánicas de Pinto. Esto explica las principales variaciones climáticas indicadas en el cuadro 2.

CUADRO 1

Identificación y ubicación de los sitios
Sites identification and location.

Sitio	Tipo de suelo	Localidad	Latitud sur	Longitud oeste	Elevación (m s.n.m.)	Exposición	Pendiente (%)	Posición fisiográfica	Ubicación relieve	Fuente de datos
1-G	Granítico	Concepción	36°56'	72°44'	330	NE	28	cerro	ladera alta	Delmastro <i>et al.</i> (1981)
2-RA	Rojo arcilloso	Mninco	37°51'	72°29'	220	NO	2	plano	-	Delmastro <i>et al.</i> (1981)
3-SM	Sedimento marino	Los Alamos	37°41'	73°26'	80	E	11	loma	ladera alta	Peters <i>et al.</i> (1985) Schlatter (1986)
4-CV	Cenizas volcánicas	Pinto	36°44'	71°46'	430	O	22	cerro	ladera alta	Delmastro <i>et al.</i> (1981)
5-A	Arenas volcánicas	Cholguán	37°10'	72°06'	230	-	0	plano	-	Delmastro <i>et al.</i> (1981)
6-M	Esquistos metamórficos	Los Alamos	37°35'	73°24'	150	N	5	loma	cumbre	Peters <i>et al.</i> (1985) Schlatter (1986)

CUADRO 2

Características climáticas de los sitios.
Sites climatic characteristics.

Sitio	Temperatura anual (°C)			índice humedad anual (pp/etp)*	Precipitación total anual (mm)	Período seco (meses/año)	Período libre de heladas (días/año)	Heladas <0.5 m altura (días/año)
	media	mínima	máxima					
1-G	13.5	8.1	20.1	0.92	1.029	5.5	274	21
2-RA	12.2	7.0	18.5	1.30	1.354	5.0	213	44
3-SM	12.5	8.4	17.9	1.49	1.437	5.0	322	13
4-CV	12.6	7.2	19.3	1.05	1.226	5.5	213	42
5-A	12.6	7.2	19.3	1.05	1.226	5.5	213	42
6-M	12.4	9.7	16.3	1.50	1.437	5.0	325	13

* Precipitación anual/evapotranspiración potencial anual

CUADRO 3

Características dasométricas de las plantaciones de pino.
Dasometric characteristics of the pine plantations.

Sitio	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	DMC (cm)	Area basal (m ² /ha)	Altura dominante (m)	Índice de sitio* (m)	IMA** biomasa (t/ha/año)
1-G	19	1578	20.9	54.3	25.9	27.0	13.9
2-RA	17	1922	18.7	52.8	25.3	29.2	15.1
3-SM	20	1445	23.8	64.0	30.8	30.8	16.6
4-CV	23	1500	23.6	65.4	34.5	31.5	15.9
5-A	18	1488	17.9	37.3	20.2	21.8	7.1
6-M	27	534	37.1	57.9	37.9	30.6	14.2

* Según García (1970), ** Incremento medio anual.

Rodales. Los rodales de los sitios 1-G, 2-RA, 4-CV y 5-A se describieron a través de una parcela cuadrada de 900 m², en la cual se inventariaron todos los árboles. Para los sitios 3-SM y 6-M se utilizó el inventario (tabla de rodal) efectuado por la respectiva empresa propietaria de los bosques. El cuadro 3 presenta las características de las plantaciones con edades que fluctúan entre 17 y 23 años y con densidades muy elevadas, ya que corresponden a rodales sin raleo, con la excepción del rodal 6-M.

La estimación de la biomasa aérea (vuelo) se efectuó aplicando las funciones de peso verde para árboles adultos, desarrolladas por Peters *et al.*

(1985), a la tabla de rodal de cada sitio, determinando los componentes: madera del fuste, corteza del fuste, total de tejidos vivos del árbol y total del árbol. A continuación, de acuerdo con Rodríguez (1989), se estimaron las proporciones de los componentes de la copa: acículas, ramillas, ramas verdes, ramas muertas y conos. De esta manera se aseguró que la suma de los componentes de la copa correspondiera a la diferencia entre el peso total del árbol y el peso del fuste, estimados con alto grado de confianza, desechando así las funciones de peso verde de estos componentes de la copa, también desarrolladas por Peters *et al.* (1985), por no lograr una estimación confiable (Prado *et*

al. 1985). Posteriormente, se determinó la materia seca aplicando las relaciones peso seco/peso verde para cada componente según Rodríguez (1989).

Las proporciones de la copa, en algunos casos, evidenciaron distorsiones respecto a lo que informa la literatura para casos semejantes (Will 1964, Madgwick *et al.* 1977, Satoo 1982, Webber y Madgwick 1983, Rodríguez 1989, Gerding 1991). En tales situaciones se realizaron ajustes dependientes de la biomasa total de los rodales según Gerding (1991).

A cada componente de la biomasa de los rodales 3-SM y 6-M se les determinó la concentración de los elementos nutritivos: carbono (oxidación húmeda), nitrógeno (Kjeldahl y destilación), fósforo, potasio, calcio y magnesio (incineración y disolución en HCl 10%, fósforo por colorimetría y las bases por absorción atómica). A los rodales 1-G, 2-RA, 4-CV y 5-A, con iguales procedimientos de laboratorio, se les analizó sólo el follaje y en algunos casos también la madera del fuste, considerando los mismos elementos nutritivos antes mencionados. Para completar los datos de los otros componentes de la biomasa se utilizaron datos de los sitios analizados por Peters *et al.* (1985) y Schlatter (1986), asignando los valores de acuerdo con la semejanza del tipo de suelo (material de

origen y morfología) y del rodal, teniendo en consideración la concentración de elementos nutritivos en las acículas.

Las cantidades de elementos nutritivos en cada rodal se calcularon para cada uno de los componentes de la biomasa, como el producto de su materia seca (peso seco) por la concentración del respectivo elemento en tal componente.

Suelos. En cada sitio se realizó un reconocimiento del suelo con bastón pedológico en un área de aproximadamente 0.5-1 ha y se describió el perfil del suelo en una calicata representativa; luego se tomaron muestras para análisis físico y químico (Schlatter *et al.* 1981). Para el análisis químico del primer horizonte se obtuvo una muestra mezcla de cinco puntos distribuidos en el área de reconocimiento. De acuerdo con la morfología del perfil se consideraron tres estratos en profundidad para el análisis de las muestras (cuadro 4). Los análisis y su respectiva metodología se presentan en el cuadro 5.

A partir de las concentraciones de los elementos nutritivos en cada estrato de muestreo y las respectivas cantidades de suelo por hectárea (peso seco del suelo), se calcularon las cantidades de elementos nutritivos en cada suelo.

CUADRO 4

Morfología de los perfiles de suelo y estratos de profundidad de muestreo.
Morphology of the soil profiles and sampling depth.

1-G			2-RA			3-SM		
Horizonte	Profundidad (cm)	P*	Horizonte	Profundidad (cm)	P*	Horizonte	Profundidad (cm)	P*
Ap	0-13	P1	Ap	0-15	PI	Ap	0-14	P1
AB	13-35	P2	AB	15-30	P2	AB	14-26	
B1	35-55		B	30-50		B1	26-48	P2
B2.1	55-80	P3	BC	50-120	P3	B2	48-120+	P3
B2.2	80-120+		BCg	120-140+		-		
4-CV			5-A			6-M		
Horizonte	Profundidad (cm)	P*	Horizonte	Profundidad (cm)	P*	Horizonte	Profundidad (cm)	P*
Ah(p)	0-17	P1	Ah	0-11	P1	ABp	0-12	P1
AB	17-38	P2	AC	11-20		BA	12-20	
BA	38-62		C1	20-40	P2	B1	20-38	P2
B1	62-90	P3	C2	40-100+	P3	B2	38-110+	P3
B2	90-170+		-			-		

* Estrato de profundidad de muestreo.

CUADRO 5

Métodos de caracterización de los suelos*.
Soil characterisation methods.

Determinación	Método
Densidad aparente Volumen total de poros Textura	3 cilindros de 100 cm ³ , suelo seco a 105° C. A través de las densidades real y aparente. Sedimentación discontinua y tamizado, luego de tratamiento con H ₂ O ₂ , ditionito-citrato-bicarbonato de sodio y dispersión con hexametáfosfato de sodio.
pH Carbono total Nitrógeno total Fracción de reserva Intercambio efectivo	Determinación electrométrica, en agua destilada y KCl 0.1 N, relación suelo:solución de 1:2.5. Oxidación húmeda. Kjeldahl y destilación. Extracción en HCl 3%, suelo bajo 2 mm; potasio, calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica; fósforo por colorimetría. Extracción en cloruro de amonio 1 N, en columna de percolación por 5 h según Meiwes <i>et al.</i> (1984); potasio, calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica.

* Métodos según el Manual del Laboratorio de Nutrición y Suelos Forestales, Universidad Austral de Chile.

Mantillo. El muestreo del mantillo se realizó en los rodales 1-G, 2-RA, 4-CV y 5-A a través de nueve puntos de 0.1 m² cada uno, distribuidos en el área de reconocimiento de suelos. En los rodales 3-SM y 6-M se obtuvieron seis puntos con igual procedimiento. En cada una de estas muestras se determinó el peso seco y en tres muestras mezcla, de cada sitio, se efectuó el análisis químico. Este análisis consideró los mismos elementos y procedimientos señalados para los tejidos de la biomasa de los rodales. Además se determinó el contenido de cenizas (calcinación) y el pH en agua (relación 1:10) (Delmastro *et al.* 1981, Schlatter 1986, Gerding 1991). La cantidad de elementos en el mantillo se obtuvo como el producto de la masa (peso seco) por la concentración del elemento respectivo.

Inventario de elementos nutritivos. A partir de las cantidades de elementos nutritivos del vuelo, del mantillo y del suelo, se elaboraron los respectivos inventarios de elementos nutritivos de cada sitio.

Factores limitantes de la productividad. Para estimar los principales factores que pueden limitar la productividad de *P. radiata* en cada sitio se emplearon las funciones de índice de sitio desarrolladas por Schlatter *et al.* (1982), Schlatter y Gerding (1984) y Gerding (1991), las cuales esti-

man el índice de sitio a partir de diferentes variables climáticas y edáficas. Para la aplicación de estas funciones se tomaron los datos de los seis sitios en estudio de los trabajos antes mencionados. Cuando el índice de sitio estimado resultó menor que 25, se consideró que la variable independiente en cuestión constituía una limitante importante para *P. radiata* en ese sitio.

RESULTADOS

Vuelo. En la figura 1 se presenta la productividad en términos de biomasa en los distintos sitios seleccionados, por una parte como biomasa acumulada y, por otra, como su producción media anual. La secuencia cuantitativa es algo distinta, siendo mayor la biomasa acumulada en los suelos de cenizas volcánicas, de mayor edad, y la productividad anual promedio en los sedimentos marinos de Los Alamos.

Con una mayor edad y altura del rodal se favorece la proporción de biomasa de los fustes, como se observa en los sitios de cenizas volcánicas y de esquistos metamórficos (figuras 1a y 2). La menor edad, en cambio, en el rodal del sitio de sedimentos marinos, explica en parte su mayor cantidad de biomasa en la copa. Esto también puede estar relacionado con el abastecimiento nutritivo, como se indicará más adelante.

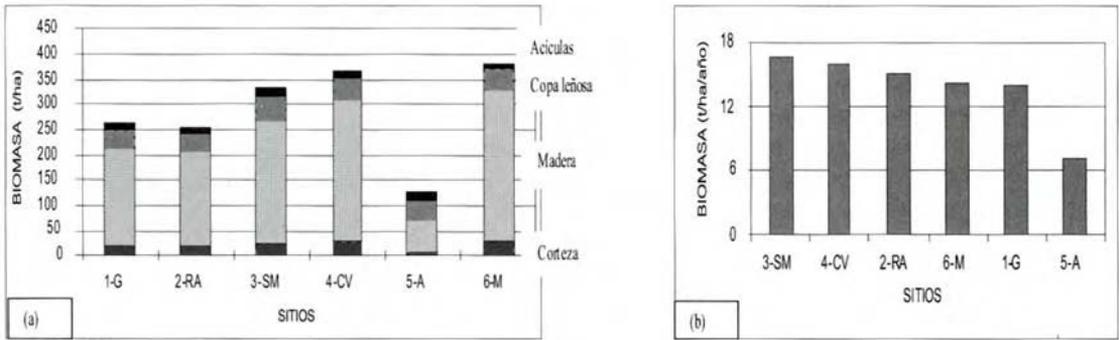


Figura 1. Biomasa total acumulada (a) e incremento promedio anual (b) en cada sitio. Total accumulated biomass (a) and average annual increase (b) in each site.

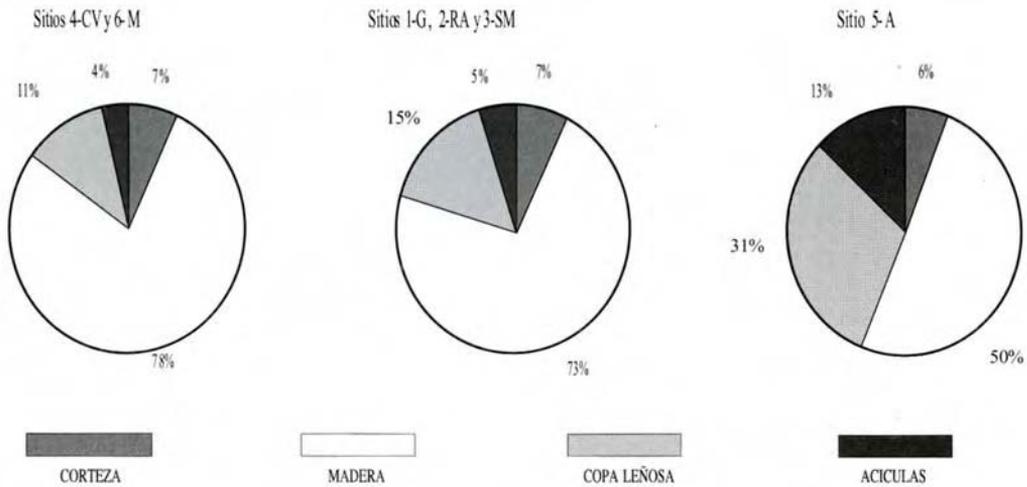


Figura 2. Proporciones de los componentes de la biomasa total. Proportion of the components of total biomass

Suelo. Las características morfológicas y físicas de los suelos son entregadas en los cuadros 4 y 6. Se aprecia que los suelos son todos profundos a muy profundos. Por lo tanto, éste no es un factor que sea de importancia para explicar la variación de la productividad en estos sitios. La pedregosidad alcanza volúmenes importantes sólo en los suelos de arena y rojo arcillosos. La proporción de arena gruesa de los suelos, en cambio, disminuye en la siguiente secuencia: arena > granítico > ceniza volcánica > rojo arcilloso > esquistos metamórficos > sedimento marino. La secuencia es al revés si se considera el contenido de las fracciones finas: arena fina, limo y arcilla. Esta secuencia coincide bastante bien con aquella del incremento medio anual en biomasa.

La menor productividad en el rojo arcilloso, en comparación con la ceniza volcánica, se explica porque estos suelos presentan una menor capacidad de agua aprovechable (figura 3). El drenaje imperfecto en el subsuelo (horizonte BCg) causado por el estrato de conglomerados subyacentes de menor permeabilidad, sin embargo, no alcanza a ser un factor limitante porque la restricción de drenaje ocurre a una profundidad muy grande. El drenaje restringido ha sido demostrado como un importante factor limitante en la productividad de las plantaciones de *P. radiata* (Gerding y Schlatter 1995), situación que no ocurre en este caso.

La menor productividad promedio en el suelo de esquistos metamórficos está relacionada, en primer lugar, con la baja densidad del rodal y,

secundariamente, con su baja reserva nutritiva de fósforo y potasio.

Otro aspecto que destaca entre las características físicas es el alto contenido de arcilla en los suelos de sedimentos marinos y derivados de esquistos metamórficos. Pero su baja densidad aparente permite inferir que tienen una estructura espaciada y, por lo tanto, la fertilidad se ve así favorecida.

El cuadro 7 muestra algunas características químicas de los suelos. En él se observa que el contenido de materia orgánica (carbono total) del horizonte superior decrece en el siguiente orden: rojo arcilloso > ceniza volcánica > sedimento marino = esquistos metamórficos » granítico > arena.

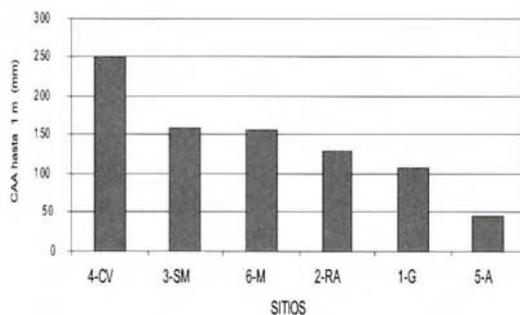


Figura 3. Capacidad de agua aprovechable (CAA) hasta 1 m de profundidad de cada suelo.

Available water capacity (CAA) up to 1 m deep in each soil.

CUADRO 6

Características físicas de los suelos.

Physical characteristics of soils.

Sitio	P*	Pedregosidad (%)	Arena gruesa (%)	Arena fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad total (%)
1-G	P1	10	42	7	23	28	Franca arcillo arenosa	1.48	39
	P2	8	30	6	21	43	Arcillosa	1.55	39
	P3	5	22	6	15	57	Arcillosa	1.54	41
2-RA	P1	0	4	8	46	42	Franca arcillo limosa	0.91	65
	P2	10	8	10	37	45	Franca arcillo limosa	1.32	49
	P3	47	15	12	37	36	Franca arcillo arenosa	1.05	61
3-SM	P1	0	5	7	30	58	Arcillosa	1.07	56
	P2	0	1	3	19	77	Arcillosa	1.01	59
	P3	0	0	1	13	86	Arcillosa	1.03	60
4-V	P1	0	9	11	58	22	Franca limosa	0.71	66
	P2	0	19	20	42	19	Franca	0.63	71
	P3	0	16	18	48	18	Franca	0.67	71
5-A	P1	16	82	9	8	1	Arenosa	1.44	48
	P2	9	98	1	1	0	Arenosa	1.55	45
	P3	37	98	1	1	0	Arenosa	1.65	41
6-M	P1	0	6	8	34	52	Arcillosa	1.00	59
	P2	0	4	6	19	71	Arcillosa	1.00	60
	P3	0	3	4	20	73	Arcillosa	1.24	52

* Estrato de profundidad de muestreo.

CUADRO 7

Características químicas de los suelos.
Chemical characteristic of soils.

Sitio	P*	pH agua	pH KCl	Fracción intercambiable (cmol+/kg)			Fracción de reserva (mg/100 g)				Fracción total (%)	
				K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	P	N	C
1-G	P1	6.0	4.6	0.33	3.90	1.39	108	128	127	15	0.17	1.8
	P2	6.0	4.4	0.28	4.47	1.52	58	104	94	6	0.10	0.9
	P3	6.1	4.6	nd	nd	nd	62	108	100	8	0.06	0.4
2-RA	P1	5.3	4.2	0.59	2.82	0.98	50	209	87	14	0.23	6.1
	P2	5.3	4.0	0.23	7.60	3.45	30	175	172	8	0.16	2.8
	P3	5.5	4.0	nd	nd	nd	30	175	180	9	0.17	1.5
3-SM	P1	5.1	4.0	0.18	3.35	1.66	26	103	82	8	0.26	4.1
	P2	5.6	4.2	0.10	4.48	3.65	11	111	82	2	0.13	1.8
	P3	5.6	4.2	nd	nd	nd	9	101	66	4	0.09	1.2
4-CV	P1	6.5	5.6	0.47	8.80	1.32	29	286	117	71	0.36	5.9
	P2	6.7	5.9	0.19	9.20	0.40	18	277	125	28	0.28	3.0
	P3	7.0	6.1	nd	nd	nd	18	22	125	30	0.17	1.1
5-A	P1	6.7	5.5	0.07	1.63	0.17	14	669	1.352	57	0.06	0.9
	P2	6.8	5.3	0.04	0.71	0.10	5	617	1.017	43	0.01	0.0
	P3	6.7	5.1	nd	nd	nd	8	698	1.045	40	0.00	0.0
6-M	P1	5.2	4.2	0.21	3.04	1.27	21	110	46	7	0.25	4.2
	P2	5.5	4.5	0.12	3.34	0.99	10	110	49	3	0.11	1.0
	P3	5.4	5.0	nd	nd	nd	7	107	37	2	0.07	0.9

* Estrato de profundidad de muestreo. nd: No determinado.

El contenido de carbono del primer estrato de suelo del sedimento marino, del esquisto metamórfico y de la arena es comparativamente bajo con respecto a un horizonte A, porque las muestras incorporaron una mayor profundidad en el perfil (cuadro 4).

El contenido de nitrógeno total no presenta exactamente el mismo orden, pero sigue la tendencia del carbono. Las reservas minerales, en cambio, presentan otra secuencia. Los elementos fósforo, calcio y magnesio y el pH presentan la siguiente secuencia decreciente: arena > ceniza volcánica > rojo arcilloso > granítico > sedimento marino = esquistos metamórficos.

La secuencia anterior representa el grado de evolución (meteorización) del material formador. Sin embargo, para el elemento potasio la tendencia es otra, por su contenido original distinto en

las rocas, siendo mayor en rocas acidas de tipo granítico. Los niveles de este elemento en el caso del rojo arcilloso se consideran una excepción de valor alto en relación a este tipo de suelo.

Los elementos intercambiables están más relacionados con el contenido coloidal en los suelos. Por ello, los niveles de intercambio son más altos en los suelos más finos, comparados con la arena. En este aspecto, la materia orgánica también juega un rol destacado.

Mantillo. La caracterización básica promedio de los mantillos se presenta en el cuadro 8. La acumulación de materia orgánica en el mantillo está muy relacionada con la biomasa acumulada en el suelo y con las condiciones para su descomposición. La cantidad acumulada es semejante en los sitios más productivos, que duplican a los for-

CUADRO 8

Características del mantillo en cada sitio.
Characteristic of litter in each site.

Sitio	Espesor (cm)	pH agua	C	N	P	K	Ca	Mg	Cenizas	Peso seco (t/ha)	
										Total	Materia orgánica
1-G	3.2	4.9	18.9	0.41	0.061	0.106	0.41	0.083	63.8	27.5	10.3
2-RA	2.8	5.1	25.0	0.54	0.037	0.079	0.36	0.087	54.8	22.3	10.4
3-SM	6.5	4.7	32.8	1.00	0.077	0.077	0.31	0.130	35.4	32.5	21.7
4-CV	6.0	5.1	35.5	0.96	0.115	0.066	0.59	0.113	30.2	32.9	23.8
5-A	3.8	5.0	32.9	0.62	0.100	0.043	0.71	0.279	39.7	22.5	14.0
6-M	7.0	4.6	34.4	0.56	0.052	0.063	0.30	0.090	34.9	44.4	29.9

CUADRO 9

Inventarios de los elementos nutritivos carbono, nitrógeno, fósforo y potasio
(fracción de reserva del suelo en estrato superior de muestreo).

Inventory of nutrients: carbon, nitrogen, phosphorus and potassium (soil reserve fraction in upper stratum of sampling).

Inventario de carbono (t/ha)					
Sitio	Suelo	Mantillo	Fuste	Copa	Total
1-G	31	5.2	102	27	165
2-RA	80	5.6	101	24	211
3-SM	114	10.7	127	33	285
4-CV	71	11.7	152	27	262
5-A	16	7.4	35	27	87
6-M	84	15.3	159	27	285

Inventario de fósforo (kg/ha)					
Sitio	Suelo	Mantillo	Fuste	Copa	Total
1-G	260	17	19	40	336
2-RA	190	8	15	40	254
3-SM	223	25	23	43	314
4-CV	857	38	21	34	950
5-A	1.034	23	7	50	1.114
6-M	140	23	21	30	214

Inventario de nitrógeno (kg/ha)					
Sitio	Suelo	Mantillo	Fuste	Copa	Total
1-G	2.944	113	161	265	3.483
2-RA	3.200	120	95	274	3.688
3-SM	7.233	325	230	339	8.127
4-CV	4.345	316	203	244	5.108
5-A	1.089	140	58	318	1.605
6-M	5.000	249	175	227	5.651

Inventario de potasio (kg/ha)					
Sitio	Suelo	Mantillo	Fuste	Copa	Total
1-G	1.438	29	181	191	1.839
2-RA	740	18	120	188	1.066
3-SM	723	25	197	238	1.183
4-CV	350	22	279	187	838
5-A	254	10	64	185	513
6-M	420	28	210	169	827

mados en suelos graníticos y rojo arcilloso. No así en el sitio de arenas, cuyo mantillo presenta una acumulación mayor que estos dos últimos, a pesar de observar igual biomasa en la copa. Esto indica que la descomposición de la materia orgánica es más restringida en este sitio.

Inventario de los elementos nutritivos en el sistema suelo-bosque. En el cuadro 9 se presentan los inventarios de elementos nutritivos (C, N, P, K) considerando la biomasa actual de los rodales y la fracción de reserva del suelo en el estrato superior de muestreo del suelo (P1).

El carbono es el elemento que define la tendencia cuantitativa de la biomasa, debiendo destacarse adicionalmente aquella del mantillo y del suelo mineral. La cantidad de carbono en el suelo es mucho mayor en el sedimento marino, similar entre la ceniza volcánica, esquisto metamórfico y el rojo arcilloso, menor en el granito y mucho menor en la arena. Esto está asociado a la productividad del sitio y a las características del suelo.

El inventario del carbono explica el del nitrógeno, que se presenta mayor en sitios de más biomasa o materia orgánica. No así el del fósforo, el que se presenta en mayores cantidades en los suelos más jóvenes (cenizas y arenas volcánicas). Esto último se refleja en la copa del rodal sobre arenas, pero no en la del rodal ubicado sobre cenizas volcánicas, que presenta una cantidad proporcionalmente baja de fósforo acumulada. Esto indica que la disponibilidad de fósforo probablemente no esté directamente relacionada a la fracción de reserva en los suelos de cenizas volcánicas.

La cantidad de fósforo en el mantillo es una consecuencia de la cantidad de biomasa acumulada y el contenido de fósforo del suelo, siendo claramente menor en el rojo arcilloso.

En el potasio sobresalen las reservas del suelo granítico, como era de esperar, por las características químicas de las rocas originarias. Le siguen el rojo arcilloso y el sedimento marino, y con mucho menores reservas los suelos de esquistos metamórficos y de cenizas y arenas volcánicas por su origen andesítico-basáltico. Sin embargo, en el ámbito de copas y de fustes, las cantidades acumuladas son proporcionales a la biomasa. En el mantillo, en cambio, esta cantidad es el efecto doble de la materia orgánica y del tipo de suelo.

Factores limitantes. En el cuadro 10 se presenta una síntesis del análisis de los factores del sitio más importantes en la definición de la productividad (índice de sitio), identificándose aquellos que más la limitan. En el caso del suelo derivado de sedimentos marinos no destacan factores limitantes, es decir, son sitios muy adecuados para la especie. Lo mismo puede afirmarse, en principio, para el suelo de cenizas volcánicas y el rojo arcilloso, ya que ningún factor causa índices de sitio menores a 25 m. Similar es la situación del suelo de esquistos metamórficos, excepto por una leve restricción de aireación en el subsuelo. El sitio con suelo rojo

arcilloso presenta una limitación debido a su régimen hídrico; su menor capacidad de agua aprovechable en comparación al suelo de ceniza volcánica y su drenaje restringido en el subsuelo limitan, comparativamente, la capacidad productiva del sitio.

Los suelos derivados de rocas graníticas y de arenas presentan varios factores limitantes. Destacan para el suelo granítico los siguientes: horizonte A (delgado), estructura del suelo en todo el perfil (alta densidad aparente, bajo volumen total de poros), textura (bajo contenido de limo, especialmente en el subsuelo), materia orgánica y nitrógeno del suelo superficial (cantidad insuficiente). En este sitio también se presentan las condiciones más desfavorables de balance hídrico de acuerdo con las características climáticas. Para el suelo arenoso destacan los siguientes: drenaje interno (excesivo), capacidad de agua aprovechable (baja), estructura del suelo (alta densidad aparente), textura (carencia de material fino), materia orgánica y nitrógeno del horizonte superficial (cantidad insuficiente).

En relación con los niveles de elementos nutritivos en el follaje (figura 4), se aprecia un estado nutricional, según Will (1985), marginal de nitrógeno en todos los rodales, satisfactorio de potasio, excepto en los arenales donde es marginal, y satisfactorio de fósforo. Dentro de este diagnóstico general destaca el mejor nivel de nitrógeno y menor de fósforo en el rodal sobre suelo de sedimento marino, el menor nivel de nitrógeno en los sitios de cenizas volcánicas y de esquistos metamórficos y de potasio en el de arenas. El menor nivel de fósforo en el sedimento marino no afecta el desarrollo actual de ese rodal, pues la relación N/P es cercana al óptimo (10). En cambio, en los demás sitios el abastecimiento de nitrógeno es demasiado bajo para la oferta de fósforo del suelo. En los sitios con suelo granítico y de arena esto es debido a una baja cantidad en el suelo; en los de ceniza volcánica y esquisto metamórfico, en cambio, está relacionado con una mineralización limitada. En el de esquisto metamórfico se agrega una estructura superficial algo cerrada, lo que limita la acción descomponedora de la fauna del suelo. El menor nivel de potasio en el sitio de arenas es también producto de un insuficiente contenido en el suelo y de la lenta liberación por meteorización de los minerales del suelo.

CUADRO 10

índices de sitio estimados según variables del sitio.
Site index estimated according to site variables.

Variable	Sitios					
	1-G	2-RA	3-SM	4-CV	5-A	6-M
Índice de sitio (García 1970)	27.0	29.2	30.8	31.5	21.8	30.6
Latitud	25	26	26	25	25	26
Precipitación total anual	29	29	30	30	28	28
Precipitación primavera + verano + otoño	28	28	28	29	27	29
Temperatura media otoño	*	*	*	31	*	*
Drenaje interno	27	28	27	27	22	25
Profundidad horizonte A	24	26	28	27	28	28
Capacidad agua aprovechable 1 m	27	29	29	29	21	29
Capacidad agua aprovechable (P1+P2)	25	27	28	30	21	27
Densidad aparente P1	24	29	28	30	24	29
Densidad aparente P3	25	30	30	30	18	29
Volumen total poros P3	22	28	28	30	22	26
Contenido arcilla P1	26	27	28	25	19	28
Contenido limo P1	25	28	26	28	21	27
Contenido arena gruesa P1	25	30	30	29	18	30
Contenido arena gruesa P3	25	27	27	26	21	28
Contenido grava	*	*	*	*	23	*
Contenido N total P1	25	27	27	28	21	26
Contenido C total P1	24	26	26	27	22	26
Capacidad intercambio efectiva P2	*	*	*	32	*	*
Contenido potasio intercambio P1	*	*	*	*	24	*

P1: Horizonte superficial; P2: tercio medio del perfil; P3: tercio inferior del perfil.

*: función no ajustada para tal caso.

En negrita los valores que indican condición limitante.

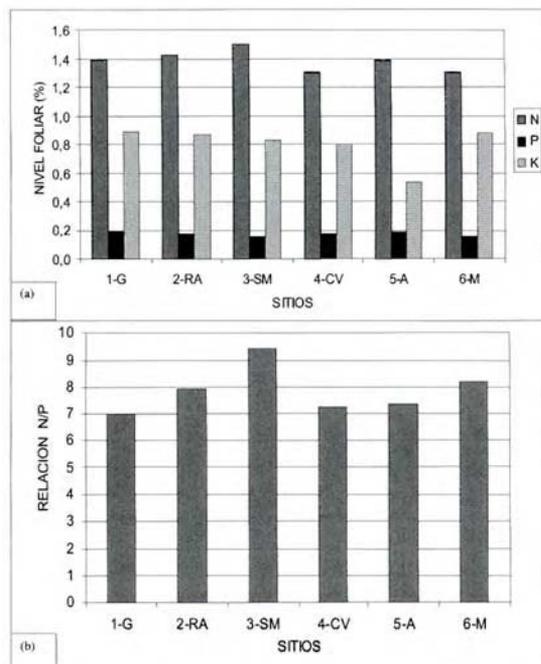


Figura 4. Concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en el follaje de cada rodal (a) y su respectiva relación N/P (b).

Nitrogen, phosphorus and potassium concentrations in foliage of each stand (a) and corresponding N/P relationship (b).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los sitios con *P. radiata* seleccionados en este trabajo son típicos para la VIII Región y representan a grupos de suelos característicos. Para cada grupo de suelos elegido existe, sin embargo, una dispersión considerable en las características del clima y del suelo. En clima, especialmente en los suelos graníticos, de esquistos metamórficos, de cenizas volcánicas y rojo arcillosos por su amplia distribución geográfica. En suelo, principalmente los graníticos, de esquistos metamórficos, rojo arcillosos y arenas. A pesar de ello, los resultados presentados permiten identificar para cada uno de esos grupos los factores limitantes más destacados.

El sitio más favorecido sin dudas es el de sedimentos marinos, ubicado cerca de la costa. En primer lugar lo favorece el clima, ya que presenta más humedad y un período libre de heladas más prolongado. Pero también el suelo, en general, es fértil.

El sitio con suelos derivados de rocas esquistos metamórficos presenta una condición climática similar, pero se ve desfavorecido por un suelo con estructura más cerrada, principalmente desde los 40-60 cm de profundidad hacia abajo, lo que limita el drenaje y la aireación.

Los sitios de cenizas volcánicas equilibran las condiciones de menor humedad ambiental en la precordillera andina con una alta capacidad de agua aprovechable del suelo y gran volumen de suelo arraigable. La disponibilidad nutritiva, sin embargo, no es óptima.

Similar situación presentan los suelos rojo arcillosos cuando son profundos y bien estructurados. En general, sin embargo, presentan menor capacidad de agua aprovechable, lo que se agrava con una menor profundidad arraigable y una estructura más cerrada. En terrenos planos presentan drenaje imperfecto (Bonelli y Schlatter 1995).

Los sitios con suelos graníticos tienen limitaciones físicas por su estructura cerrada y bajo contenido de limo. Además presentan una oferta limitada de nitrógeno, la cual se agrava, como también en los otros elementos nutritivos, cuando han sufrido erosión, siendo especialmente delicado el caso del boro (Schlatter y Gerding 1985).

Los sitios con suelos de arena son más limitados por su composición textural, lo que causa una baja a muy baja capacidad de agua aprovechable. Esto se agrava por ser suelos pobres en materia orgánica, lo que da origen a sus principales deficiencias nutritivas. El sitio elegido para este trabajo representa la porción de peor productividad del grupo analizado.

Los resultados aquí precisados permiten identificar los aspectos más débiles de cada sitio y con ello estimar cuáles requerirán de mayor esfuerzo e inversión para mantener o mejorar la productividad. Conocidas las limitaciones de los suelos se pueden, entonces, desarrollar estrategias para su manejo y/o mejoramiento.

Los suelos de sedimentos marinos no presentan limitantes importantes en la primera rotación. Es necesario evitar, sin embargo, que su estructura espaciada sea afectada por compactación, debido a su carácter arcilloso. Por otra parte, sus bajas reservas de fósforo indican la necesidad de evaluar la sustentabilidad con respecto a este elemento en rotaciones sucesivas.

El sitio con suelo derivado de esquistos metamórficos se asemeja mucho al suelo de sedimentos marinos. Ambos suelos son muy evolucionados, pero se diferencian en la estructura más cerrada del metamórfico, el mayor contenido de magnesio del sedimento marino y la mayor acidez potencial de este último. Es decir, sus diferencias son menores y, por lo tanto, su manejo es muy similar. En general, los suelos de esquistos meta-

mórficos presentan una gran variación en sentido altitudinal, aumentando la pedregosidad y disminuyendo la profundidad de desarrollo con una mayor elevación, lo que afecta su productividad en combinación con un clima menos favorable (Schlatter *et al.* 1997).

Los suelos de cenizas volcánicas presentan abastecimientos marginales en algunos elementos nutritivos, destacando entre ellos el nitrógeno y el fósforo. El manejo nutritivo de las plantaciones en estos suelos deberá favorecer el mejoramiento del abastecimiento de tales elementos para las rotaciones siguientes. También deberá planificarse el tránsito de maquinaria forestal para mantener sus óptimas condiciones físicas.

Los suelos rojo arcillosos deben ser manejados de tal forma de mantener en ellos un alto nivel de la materia orgánica, que les favorezca la capacidad de agua aprovechable y las reservas nutritivas. En el ejemplo presentado en este caso, el fósforo es el elemento más limitante. El análisis foliar indica, sin embargo, que también el contenido de nitrógeno no es óptimo y es conocido, además, que estos suelos presentan frecuentemente insuficiencia de boro (Schlatter y Gerding 1985). La capacidad de agua aprovechable y el arraigamiento dependen en suelos rojo arcillosos de su estructura, por lo cual deberá preverse de no dañarla por compactación, a la cual estos suelos son muy susceptibles por su alto contenido de arcillas, su morfología y su ubicación topográfica (Bonelli y Schlatter 1995).

Los suelos graníticos deben ser manejados con una estrategia similar a la de los rojo arcilloso en el aspecto nutritivo. El nivel de materia orgánica y la oferta de nitrógeno, fósforo y boro son los que principalmente deben preverse en un plan de manejo. Por su alta densidad aparente, la susceptibilidad de estos suelos a la compactación es menor, pero aún así deberá planificarse adecuadamente el tránsito para evitar un empeoramiento de su estructura. El mejoramiento de la estructura debe ser la medida de manejo del suelo prioritaria para un aumento de la productividad, pues así mejoran el espacio arraigable y los regímenes de aire y agua.

Los suelos de arena necesitan aumentar, en primer lugar, su capacidad de agua aprovechable. Ello es posible a través de un mayor nivel de materia orgánica. Las consecuencias de un aumento en la materia orgánica de estos suelos son fundamentales para favorecer, además, la disponibilidad de nitrógeno, potasio y boro, los elementos más críticos en estos suelos.

BIBLIOGRAFIA

- ARANCIBIA, C. 1999. Características y variabilidad de sitios con plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en suelos de dunas y sedimentos marinos de las Regiones VII y VIII. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 118 pp.
- BONELLI, C.L., J.E. SCHLATTER. 1995. "Caracterización de suelos rojo arcillosos de la zona Centro-sur de Chile", *Bosque* 16 (2): 21-37.
- COX, F. 1982. Indices de productividad en la evaluación de la calidad de sitio. En: Evaluación de la productividad de sitios forestales. Actas de Reunión de Trabajo. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia. p. 7-26.
- DENGLER, A. 1982. Waldbau auf ökologischer Grundlage. Baumartenwahl, Bestandesbegründung und Bestandespflege. II Band 5^o ed., Verlag Paul Parey. Hamburgo. 280 pp.
- DELMASTRO, R., J. E. DIAZ-VAZ, J. E. SCHLATTER. 1980. Variabilidad de las características tecnológicas hereditarias del *Pinus radiata* (D. Don). Serie Técnica. Informe de convenio N° 43, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 187 p.
- EDWARDS, A. 1997. Características y variabilidad de arenas de la VIII Región, plantados con *Pinus radiata* D. Don. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 102 p.
- GARCIA, O. 1970. Indices de sitio para pino insignis en Chile. Instituto Forestal Serie de Investigación 2. Santiago, 29 p.
- GERDING, V. 1991. *Pinus radiata*-Plantagen in Zentralchile: Standortfaktoren der Produktivität und Nährstoffverteilung in Beständen. Tests Dr. Forstwissenschaftlichen Fachbereichs, Georg-August-Universität, Göttingen, 182 p.
- GERDING, V., J.E. SCHLATTER. 1995. "Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile", *Bosque* 16 (2): 39-56.
- INSTITUTO FORESTAL. 1966. Inventario de las plantaciones forestales de la zona Centro Sur de Chile Informe Técnico N° 24, Santiago, 24 p.
- INSTITUTO FORESTAL. 1969. Inventario de las plantaciones forestales de la provincia de Coquimbo a Talca y de Valdivia a Llanquihue. Informe Técnico N° 30, Santiago, 75 p.
- LEONELLI, M. 1998. Características y variabilidad de sitios con plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en suelos arcillosos de la provincia de Malleco Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 73 p.
- MADGWICK, H., D. JACKSON, P. KNIGHT. 1977. "Above-ground dry matter, energy, and nutrient contents of trees in a age series of *Pinus radiata* plantations", *N.Z.J. For. Sci.* 7(3): 445-68.
- MEIWES, K-J., N. KÖNIG, P. KAHNN, J. PRENZEL, B. ULRICH. 1984. Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung, und Bewertung der Versauerung in Waldböden Bericht des Forschungszentrum Waldökosystemen/Waldsterben Band 7. Göttingen. p. 1-67.
- OÑATE, M. I. 1997. Características y variabilidad de sitios con plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en suelos graníticos de las Regiones VIII y IX. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 93 pp.
- PETERS, R., J. A. PRADO, S. AGUIRRE, M. KUNZ, V. CUBILLOS. 1985. Mantención de la productividad de sitio para *Pinus radiata* D. Don Funciones de biomasa Instituto Forestal, Santiago, 64 p.
- PRADO, J. A., R. PETERS, S. AGUIRRE, M. KUNZ 1985. Funciones de biomasa para bosques adultos de pino insignis (*Pinus radiata* D. Don). En: *Pinus radiata* investigación en Chile. OLIVARES, B. y MORALES E. (eds.) Universidad Austral de Chile. Valdivia. Tomo 1: 325-339.
- RODRIGUEZ, C. 1989. Producción potencial en sitios característicos para *Pinus radiata*. Tesis Magíster en Ciencias, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile Valdivia 160 p.
- RUIZ, M. A. 1998. Características y variabilidad de sitios con plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en suelos de cenizas volcánicas de las Regiones VIII y IX. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 86 p.
- SANTIBAÑEZ, F., J. URIBE. 1993. Atlas agroclimático de Chile VI, VII, VIII y IX Regiones. Laboratorio de Agroclimatología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Ministerio de Agricultura Fondo de Investigación Agropecuaria, Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, 71 p.
- SATOO, T. 1982. Forest biomass. Martinus Nijhoff/Junk Publishers. The Hage. 152 p.
- SCHLATTER, J.E. 1986. Mantención de la productividad de sitio para plantaciones de *Pinus radiata* D. Don B: Determinación del contenido de elementos nutritivos en la biomasa, mantillo y suelo Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.
- SCHLATTER, J. E., V. GERDING. 1984. Important site factors for *Pinus radiata* growth in Chile. En: *Proceedings IUFRO Symposium on site and productivity of fast growing plantations*. GREY, D. C., SCHÖNAU, A. P. G., SCHUTZ, C. J., van LAAR, A. (eds.) Pretoria. South Africa. p. 541-549.
- SCHLATTER, J.E., V. GERDING, M. BONNEFOY. 1982. Factores de sitio de mayor incidencia en la productividad de *Pinus radiata* D. Don En: Evaluación de la productividad de sitios forestales Actas de Reunión de Trabajo Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales Valdivia, p. 61-97.
- SCHLATTER, J.E., V. GERDING, J. ADRIAZOLA. 1997. Sistema de ordenamiento de la tierra, herramienta para la planificación forestal Aplicado a las Regiones VII, VIII y IX 2^o ed. Serie Técnica, Fac. Cs. Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 91 p.
- SCHLATTER, J.E., R. GREZ, V. GERDING. 1981. Manual para el reconocimiento de suelos Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 81 p.
- VALENZUELA, H. 1964. "Productividad de los pinares en algunos suelos", *Maderero* (11): 6-8 y 25-26.
- VERA, A. 1988. Relación entre los factores del sitio y el índice de sitio de *Pinus radiata* D. Don para la zona de Valdivia. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 78 p.
- WEBBER, G., H. MADGWICK. 1983. "Biomass and nutrient content of a 29-year-old *Pinus radiata* stand", *N.Z.J. For. Sci.* 13 (2): 222-228.
- WILL, G. 1946. "Dry matter production and nutrient uptake by *Pinus radiata* in New Zealand", *Comm. For. Rev.* 43: 57-70.
- WILL, G. 1985. Nutrient deficiencies and fertiliser use in New Zealand exotic forests. New Zealand Forest Research Institute. Bull. N° 97, 53 p.