

La Captura de Carbono en Pino Radiata

El potencial de acumulación de carbono de las plantaciones de pino radiata en Chile presenta una buena proyección, especialmente en aquellos bosques jóvenes.

por Miguel Espinosa¹
Eduardo Acuña¹ - Jorge Cancino¹
Fernando Muñoz¹ - David A. Perry²

La concentración de CO₂ en la atmósfera, su efecto en el cambio climático y las probables consecuencias para la supervivencia del planeta es hoy un tema recurrente de la investigación mundial. Esta problemática se puede enfrentar, por un lado, reduciendo drásticamente la emisión de CO₂, objetivo de difícil implementación por los países de mayor desarrollo relativo por su alto costo (Coviello, 2000)- y, por otro, incrementando su captura (Birdsey, 1992). Los bosques, que cubren alrededor de un tercio de la superficie de la Tierra (Perry, 1994; FAO, 2001) son una alternativa cierta para el logro

de esta última opción, por cuanto secuestran el carbono de la atmósfera como parte de su proceso de fotosíntesis.

La captura de C será de mayor o menor magnitud según la ubicación geográfica del recurso, la composición del bosque, la tasa de crecimiento de las especies, la densidad básica de la madera y la edad (Gates *et al.*, 1983 citados por Pardo, 1999; ACDI, 2000; FAO, 2001). Los bosques jóvenes, en pleno crecimiento, almacenan C a tasas muy elevadas, contrariamente a lo que sucede en bosques maduros, donde existe equilibrio entre producción y consumo de CO₂ (Birdsey, 1992). En consecuencia, el aumento de las plantaciones, especialmente con especies de crecimiento rápido, es una medida que favorece la absorción de CO₂ atmosférico (Kyrklund, 1990; Wright *et al.*, 2000).

¹ Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Victoria 631, Casilla 160-C, Correo 3, Concepción, Chile. mespinos@udec.cl

² Department of Forest Science, Oregon State University, 321 Richardson Hall, Corvallis, OR 97331-5752, USA.



nueva plantación (esto sin considerar el destino dado al producto obtenido).

Basado en información anual acerca de la superficie cubierta con plantaciones de esta especie por clase de edad y región administrativa del país, se determinó el contenido potencial de C acumulado en el fuste restándole el removido por efecto de la cosecha. Para ello se generó un modelo que estima la incertidumbre en la predicción del contenido de C, incorporando funciones de distribución de probabilidad (Heath y Smith, 2000; Smith y Heath, 2000). Este modelo utiliza como variables estocásticas el coeficiente de C de la madera, el periodo de rotación, la tasa de crecimiento y la tasa de plantación anual. La información se

proyectó hasta el año 2060. El C potencial acumulado por las plantaciones se compara con las emisiones actuales y proyectadas de CO₂.

Material y Métodos

■ **Descripción del modelo.** El contenido de C de las plantaciones de pino radiata se determinó utilizando como base el registro de superficie plantada por clase de edad y región administrativa (Tabla 1). El C acumulado en el fuste a una edad de cosecha dada, se obtuvo del producto entre la superficie por clase de edad, la densidad básica, la clase de edad, el incremento medio anual (IMA) y el coeficiente de contenido de C de la madera (**relación 1**).

Relación 1

donde:

cc_k = es el contenido de C en el fuste de las plantaciones en el k -ésimo año de la proyección (Mt).

cc = es el contenido de C en la madera (kg kg⁻¹).

IMA = es el incremento medio anual de las plantaciones de pino radiata (m³ ha⁻¹ año⁻¹).

R = es el número de regiones con plantaciones de pino radiata (Tabla 1).

E_i = es la edad de rotación en la i -ésima Región.

e_{ij} = es la j -ésima clase de edad en la i -ésima Región (año); $e_{ij}=1, \dots, E_i$

d_{ij} = es la densidad de la madera de la j -ésima clase de edad en la i -ésima Región (kg m⁻³).

s_{kij} = es la superficie en la j -ésima clase de edad de la i -ésima Región en el k -ésimo año de la proyección (ha).

Tabla 1

Distribución de Superficie (ha) de Plantaciones de Pino Radiata por Clase de Edad y Región a Diciembre de 2000

Región	Edad (años)								Total
	0	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-Más	
V	30	2.528	3.474	3.337	2.281	2.589	511	55	14.805
RM	0	6	5	52	406	498	35	0	1.002
VI	6.694	17.959	11.970	9.564	10.050	7.837	3.246	278	67.598
VII	16.330	117.920	38.125	101.606	81.163	3.828	3.051	1.716	363.739
VIII	27.985	156.760	134.762	131.108	129.431	54.852	3.154	1.896	639.948
IX	5.859	55.576	49.940	53.912	55.285	29.707	6.525	3.638	260.442
X	2.513	23.701	38.159	19.446	19.366	20.920	1.220	1.258	126.583
Total	9.411	374.450	276.435	319.025	297.982	120.231	17.742	8.841	1.474.117

Fuente: INFOR (2001).

■ **Descripción de las variables del modelo.** Según Baumeister *et al.* (1978) y Houghton *et al.* (1985), citados por Hollinger *et al.* (1993), el contenido de C de la madera varía entre 0,47 y 0,53 kg kg⁻¹, rango que se adoptó para efecto de este estudio. En lo que respecta al incremento medio anual, se estableció un rango entre 15 y 25 m³ ha⁻¹ año⁻¹, que corresponde a la tasa media de crecimiento de las plantaciones de pino radiata

en su área de distribución geográfica en el país (Sedjo, 1999; Toro y Gessel, 1999; INFOR, 2001). Como edad de rotación se consideró un rango entre 20 y 30 años, rango en el cual se cosechan habitualmente las plantaciones de esta especie en Chile (Toro y Gessel, 1999).

La densidad de la madera (d), por clase de edad y región, se determinó según un modelo ajustado por los autores, en base a datos de densidad básica de la madera de pino radiata

Factores como la longitud de la rotación, el manejo de los residuos y la aplicación de silvicultura intensiva (e.g. fertilización, regulación de la densidad), junto con un mejoramiento de la gestión de los recursos, pueden también afectar la capacidad potencial de captura de C de los bosques (Liegel, 1991; FAO, 2001; Pussinen *et al.*, 2002).

En Chile, las plantaciones de *Pinus radiata* (pino radiata) no se establecen como "bosques de carbono", aunque capturan y almacenan C hasta que alcanzan la edad de rotación, luego de lo cual la superficie cosechada debe ser obligatoriamente replantada al año siguiente, iniciándose un nuevo ciclo con una nueva plantación. Dado que la superficie a cosechar anualmente representa una fracción del área total con plantaciones, habría una ganancia neta de C en la biomasa en pie y, por otro lado, no habría emisiones netas, ya que el C será capturado por el proceso de fotosíntesis de la

procedentes de estudios efectuados en distintos puntos dentro del área de distribución de esta especie en el país (no publicado). Se asumió que el IMA, la longitud de rotación y el contenido de C de la madera no varían entre regiones, mientras que la densidad de la madera fue específica para cada región y clase de edad.

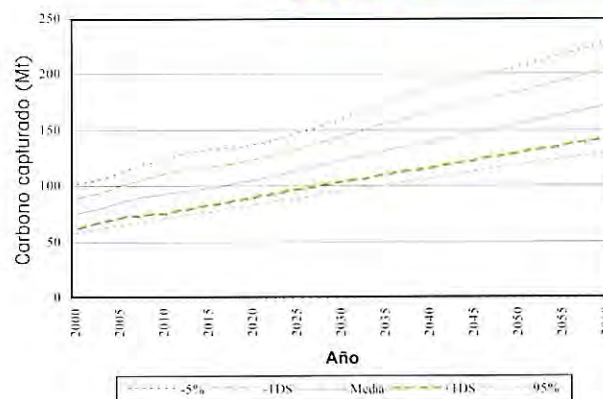
La superficie por clase de edad en cada año de la proyección se estimó transformando los valores de la Tabla 1 a una base anual, asumiendo una distribución uniforme de plantaciones para cada año dentro de cada clase de edad. Así, cada intervalo de clases de edad es de amplitud uno. La superficie de plantaciones que alcanza la edad de rotación se corta y se reforesta en el año siguiente, iniciándose un nuevo ciclo con una nueva plantación. En consecuencia, el modelo proyecta el C acumulado descontando el removido por efecto de la cosecha. Adicionalmente, se tomó en cuenta una tasa de forestación anual entre 20.000 y 40.000 hectáreas, la que se distribuyó en forma proporcional a la superficie existente en cada región al año de inicio del análisis.

■ **Incertidumbre y modelo de simulación.** Las variables definidas fueron utilizadas para generar un modelo que estimó la incertidumbre en la predicción del contenido de C. El modelo incorpora funciones de distribución de probabilidad para el coeficiente de contenido de C, IMA, edad de rotación y tasa de forestación anual, asumiendo que los valores tienen una distribución normal. Similar procedimiento para estimar incertidumbre en la acumulación de C en los bosques ha sido utilizado por Heath y Smith (2000) y Smith y Heath (2001). La incertidumbre se determinó construyendo el modelo en el software @Risk (Palisade Corp. 2000), empleando la simulación de Monte Carlo con muestreo Latin Hypercube (Morgan y Henrion, 1990; Vose, 1996; Cullen y Frey, 1999). La información generada se proyectó hasta el año 2060. Como resultado del proceso de simulación, el modelo genera una función de distribución de probabilidad del contenido de C para los distintos escenarios considerados en el estudio.

Resultados

■ **Carbono acumulado neto.** El C promedio acumulado incrementa desde 67 Mt el año 2000 hasta 169 Mt el año 2060, a una tasa de 1,7 Mt año⁻¹ (Figura 1). El rango de acumulación de C fluctúa entre 127 y 221 Mt en el 2060 (95% de confianza; líneas punteadas en Figura 1).

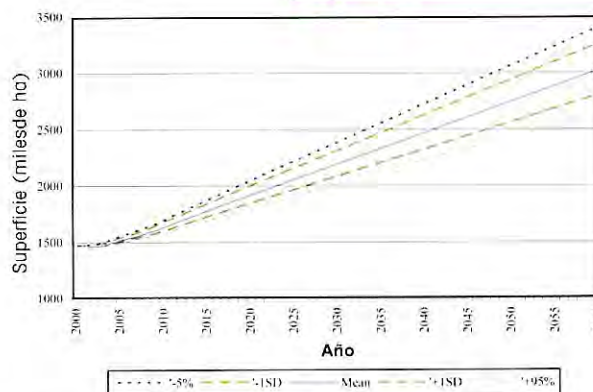
Figura 1



► Captura anual de C de las plantaciones de pino radiata (línea continua) proyectado al año 2060. Las bandas indican el 5%, la media menos una desviación estándar, la media más una desviación estándar y el valor de C correspondiente al 95% de la distribución de probabilidad del C fustal.

■ **Superficie proyectada.** El C acumulado implica necesariamente una expansión de la superficie plantada con pino radiata, desde 1,5 a 3 millones de hectáreas en el 2060. La máxima superficie proyectada fluctúa entre 3,4 y 2,6 millones de ha (Figura 2).

Figura 2



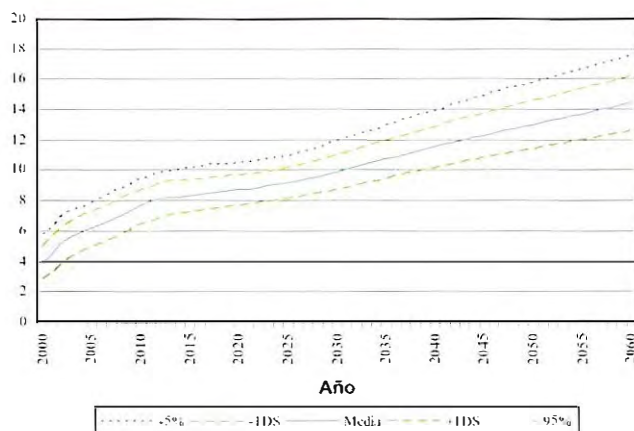
► Superficie anual proyectada de las plantaciones de pino radiata. Las bandas indican el 5%, la media menos una desviación estándar, la media más una desviación estándar y el valor correspondiente al 95% de la distribución de probabilidad de la superficie acumulada.

Bibliografía

- ACIDI. 2000. Asuntos forestales. Los bosques tropicales y los cambios climáticos. Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional. <http://www.rcfa-cfan.org/spanish/s.issues.13.htm>.
- Birdsey, R.A. 1992. *Carbon storage and accumulation in United States forest ecosystems*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report WO-59. Washington, DC, 51 pp.
- Birdsey, R.A. and Heath, L.S. 1997. The forest carbon budget of the United States. In: *USDA Forest Service Global Change Research Program Highlights: 1991-1995*. General Technical Report NE-237. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, pp. 81-85.
- CONAMA. 1999. *Primera comunicación nacional bajo la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile. 153 pp.
- Coviello, M. 2000. Situación de América Latina: Posibilidades de negocio para países del anexo B. En: *Actas del seminario: El mercado del carbono: realidad y perspectiva*. Valdivia, Chile. pp. 53-57.
- Cullen, A.C. and Frey H.C. 1999. *Probabilistic techniques in exposure assessment*. Plenum Press, New York. 335 pp.
- FAO. 2001. *Situación de los bosques del mundo 2001*. Food and Agriculture Organization, Roma, 175 pp.
- Heath, L.S. and Smith, J.E. 2000. An assessment of uncertainty in forest carbon budget projections. *Environ. Sci. & Policy* 3, 73-82.
- Hollinger, D.Y.; Maclaren, J.P.; Beets, P.N. and Turland, J. 1993. Carbon sequestration by New Zealand's plantation forests. *New Zeal. J. For. Sci.* 23 (2), 194-208.
- INFOR. 2001. *Estadísticas forestales 2000*. Boletín estadístico 79. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 145 pp.
- Kyrklund, B. 1990. The potential of forests and forest industry in reducing excess atmospheric carbon dioxide. *Unasylva* 41: 12-14.
- Krankina, O.N.; Harmon, M.E. and Winjum, J.K. 1996. Carbon storage and sequestration in the Russian Forest Sector. *Ambio* 25 (4), 284-288.
- Liegel, L. 1991. Potential effects of global climate change on forest resources and management. Mitigation options. En: *Memorias del Primer Simposio Nacional. Agricultura Sostenible: Una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental*. Comisión de Estudios Ambientales C.P. y M.O.A. International.

■ **Carbono removido en la cosecha.** El modelo utilizado no sólo determina el C acumulado, sino también el C cosechado anualmente de las plantaciones que alcanzan la madurez comercial. Las megatoneladas de C removido en cada uno de los años de proyección se muestran en la **Figura 3**. La pendiente inicial cambia a partir del año 2012, una vez que se ha logrado la regulación de la superficie a cosechar anualmente.

Figura 3



►► Carbono removido anualmente por efecto de la cosecha de las plantaciones de pino radiata proyectado al año 2060. Las bandas indican el 5%, la media menos una desviación estándar, la media más una desviación estándar y el valor correspondiente al 95% de la distribución de probabilidad del C fustal.

El C removido producto de la cosecha al año 2000 alcanza un promedio de 2,3 Mt, que se incrementa a 13,8 Mt al año límite de proyección, a una tasa de 0,19 Mt año⁻¹. El C cosechado en el 2060 es, aproximadamente, un 11% del C total acumulado. La tasa de remoción de C se sustenta en un incremento de la superficie a cosechar anualmente, de 59 mil hectáreas el año 2000 a 113 mil hectáreas el año 2060, lo que equivale a un aumento de 91%.

Discusión

La acumulación de C al año de inicio de la proyección -67 Mt- es cuatro veces mayor a las 16,4 Mt de C emitidas en Chile (CONAMA, 1999). Para el año 2020, CONAMA (1999) proyecta para Chile emisiones de C del orden de 26,2 Mt; al mismo año de proyección, el modelo estima una acumulación neta de C de 104 Mt. Manteniendo la tendencia constante en el incremento de emisiones de C, éstas alcanzarían a 52 Mt en el año 2060. Para igual año, el modelo predice una acumulación neta de 169 Mt de C, suficiente para compensar las emisiones y mantener un superávit de más de un 300%.

Brown *et al.* (1996), citados por FAO (2001), estimaron que entre los años 1995-2050 se podrían absorber 30,6 Gt de C gracias a las actividades de forestación y reforestación, de las cuales 11,78 Gt por los bosques de las zonas templadas. En los próximos 50 años, las plantaciones de pino radiata en Chile podrían contribuir con 1,3% de esta cifra.

El C acumulado estimado por el modelo representa sólo una parte del C potencial acumulado por las plantaciones. Éste podría ser aún mayor si se consideraran los otros componentes del ecosistema (*i.e.* suelo, piso forestal y el sotobosque) y otros componentes del árbol (Frankina *et al.*, 1996; Bouwman, 1990, citado por Heath y Smith, 2000). Tampoco consigna las intervenciones silvícolas (*i.e.* raleos y podas) a que son sometidas regularmente las plantaciones cuyo manejo está orientado preferentemente a producir madera para el mercado internacional. Birdsey y Heath (1997) estiman que el C acumulado en los árboles de los ecosistemas forestales de EE.UU. representa sólo un 29% del total, de los cuales un 50% de éste se concentra en el fuste.

El potencial de captura de C de las plantaciones de pino radiata se compara favorablemente con las tasas de captura anual de C de diferentes tipos forestales (IPCC 1996, citado por Wright *et al.*, 2000). Las plantaciones de pino radiata en Chile tienen la condición de ser económicamente viables sin considerar la acumulación de carbono. De esta forma, Chile, sólo con sus plantaciones de pino radiata, presenta un margen favorable en el balance de C, reduciendo la presión sobre los bosques naturales y convirtiéndose en un oferente potencial de créditos de C para los países industrializados, que deben reducir sus emisiones de CO₂ acordadas en el Protocolo de Kyoto. 🌲

- Morgan, M.G. and Henrion, M. 1990. *Uncertainty: A guide to the treatment of uncertainty in quantitative policy and risk analysis*. Cambridge University Press, New York. 332 pp.
- Palisade Corp. 2000. *Guide to using @Risk: Risk analysis and simulation add-in for Microsoft Excel*. Palisade Corp. Newfield, NY. 443 pp.
- Pardo, J.A. 1999. Ante un cambio climático: Papel de los montes arbolados y los productos forestales en la retención del carbono. *Investigación Agraria: Sistema de Recursos Forestales Fuera de Serie* N° 1, 93-99.
- Perry, D.A. 1991. *Forest Ecosystems*. The John Hopkins University Press, Baltimore. 649 pp.
- Pussinen, A.; Karjalainen, T.; Mäkipää, R.; Valsta, L. and Kellomäki, S. 2002. Forest carbon sequestration and harvests in Scots pine stand under different climate and nitrogen deposition scenarios. *For. Ecol. Manage.* 158, 103-115.
- Sedjo, R.A. 1999. The potential of high-yield plantation forestry for meeting timber needs. *New Forest.* 17 (1/3), 339-360.
- Smith, J.E. and Heath, L.S. 2000. Considerations for interpreting probabilistic estimates of uncertainty of forest carbon. In: *The impact of climate change on America's Forests*. Joyce, L.A. and Birdsey, R. (eds.). USDA Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-59, pp. 102-111.
- Smith, J.E. and Heath, L.S. 2001. Identifying influences on model uncertainty: an application using a forest carbon budget model. *Environ. Manage.* 27 (2), 253-267.
- Toro, J. and Gessel, S. 1999. Radiata pine plantations in Chile. *New Forest.* 18, 33-44.
- Van Kooten, G.C.; Arthur, L.M. and Wilson, W.R. 1992. Potential to sequester carbon in Canadian forests: Some economic considerations. *Can. Public Pol.* 18 (2), 127-138.
- Vose, D. 1996. *Quantitative risk analysis: A guide to Monte Carlo simulation modeling*. John Wiley & Sons, Chichester. 328 pp.
- Wright, J.A.; DiNicola, A. and Gaitan, E. 2000. Latin American forest plantations: Opportunities for carbon sequestration, economics development, and financial returns. *J. Forest.* 98 (9), 20-23.