

Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile.

Jorge Gayoso¹

Resumen

Chile, como muchas naciones ha considerado importante participar en las iniciativas para mitigar el efecto invernadero y a su vez ha visto en ello, la posibilidad para atraer recursos y financiamiento que permitan favorecer el desarrollo sostenible de áreas rurales, la conservación de bosques nativos y la incorporación de tecnologías de producción, ambientalmente más apropiadas. Si bien Chile está entre las naciones que aún no han ratificado el Protocolo de Kyoto, su posición será la de apoyar la elegibilidad de las actividades de proyectos relacionados con la forestación y reforestación en el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Mientras se llega a los acuerdos necesarios que habiliten las transacciones, el país ha dedicado este tiempo a la investigación y a la formación de capacidades para la medición, seguimiento, contabilidad y gestión de proyectos de carbono.

El objetivo de este estudio es desarrollar funciones de biomasa, factores de expansión y reducción y definir la metodología de inventario de carbono para determinar la capacidad de captura de carbono de distintos bosques.

Este proyecto comprende a la fecha, el estudio de 14 especies del bosque nativo siempreverde y 3 especies de plantaciones de exóticas. Las funciones de biomasa y coeficientes de expansión fueron estimados en base a ensayos destructivos sobre 540 árboles y la extracción de 137 raíces. El inventario de carbono se basó en 168

parcelas, de tamaño entre 250 y 500 m², distribuidas en 13 predios forestales (37° LS y 42° LS).

Los resultados para las especies nativas del tipo forestal siempreverde (árboles de DAP > 10 cm) muestran que la biomasa aérea de los árboles se distribuye como sigue: 0,62 - 5,05% en las hojas; 6,09 - 22,23 % ramas; 61,89 - 88,06 % fuste; y, 4,62 -16,21 % en la corteza. La importancia de las raíces (diámetro > 5 mm) como promedio para todas las especies medidas del bosque siempreverde alcanza a 27,50 % de la biomasa aérea. El contenido de carbono varía entre 34,86 % y 48,15 %, según el componente.

En rodales de *Pinus radiata* D. Don, edad de 23 años, la biomasa alcanza: 4,07 % en las acículas; 9,08 % en las ramas; 5,64 % en la corteza; y 80,56 % en el fuste comercial con índice de utilización 8 cm. Las raíces corresponden al 25,39 % de la biomasa aérea. El contenido de carbono varía entre 44,69 y 45,47 % para los distintos componentes.

El carbono acumulado por unidad de superficie es muy variable según el tipo y estado del bosque. Destacan los bosques siempreverdes adultos, donde el carbono total alcanza 606,80 MgC/ha, con la siguiente distribución: 283,75 MgC/ha en la biomasa aérea; 79,92 MgC/ha en raíces (diámetro >5 mm); 2,79 MgC/ha en el sotobosque; 53,56 MgC/ha en la necromasa; 5,87 MgC/ha en la hojarasca; y 180,91 MgC/ha en los primeros 30 cm de suelo.

Estos resultados abren la posibilidad a diferentes proyectos de carbono, entre

los que destacan la forestación con especies exóticas y nativas, el enriquecimiento de bosques nativos degradados, el manejo de renovales de especies nativas y el abandono de tierras ganaderas a uso forestal. El análisis económico muestra una adicionalidad de 2 % en la tasa de rentabilidad por cada 10 US\$ MgC⁻¹.

Muchas interrogantes quedan planteadas, las cuales hacen recomendable posteriores discusiones para armonizar la metodología de medición, la contabilidad y los protocolos para la preparación y gestión de proyectos de carbono en la Región.

Measurement of carbon sequestration capacity by native and plantation forest of Chile

Summary

Chile, as many nations, has considered important to take part in the initiatives to mitigate the greenhouse effect and has seen this as a possibility to add funds to contribute with sustainable development in rural areas, native forest conservation, and clean technology introduction. Though Chile is among the nations that have not ratified the Kyoto Protocol, its position will be to support the eligibility of the related projects activities with afforestation and reforestation as part of Clean Development Mechanism. While adequate agreements are reached for the transactions be possible, research and capacity building concerning measurement, monitoring, accounting and carbon

¹ Universidad Austral de Chile

projects management were the main goals of the country.

The study purpose is to develop biomass functions, expansion and reduction coefficients, and to define carbon inventory methodology to determine carbon sequestration capacity by distinct forests.

Up to date, 14 species of evergreen native forest and 3 species of exotic plantations were studied. Biomass functions and expansion coefficients were assessed from 540 trees harvesting (destructive sampling) and 137 tree roots extraction. Carbon inventory was based on 168 plots, each 250 - 500 m², located in 13 tree-farms between 37° S and 42° S.

Main results for aerial biomass, trees DBH > 10 cm, as average for native forest species, were as follows: 0.62 - 5.05 % leaves, 6.09 - 22.23 branches, 61.89 - 88.06 % stem-wood, and 4.62 - 16.21 % bark. Medium and large roots (diameter > 5 mm) reached 27.50 % of aerial biomass. Carbon percentages in the different plant organs varied between 34.86 and 45.16 %.

In *Pinus radiata* D. Don stands, 23 years old, biomass were: 4.07 % leaves, 9.08 % branches, 5.64 % bark, and 80.56 % stem-wood to 8 cm utilization index. Roots were 25.39 % of aerial biomass. Carbon percentages were between 44.69 and 45.47 % for the different tree components.

Carbon stocks were highly variable depending on type and conservation state of the forest. Thus, total carbon stock for evergreen old growth stands reached 606.80 MgC/ha: 283.75 MgC/ha in aerial biomass, 79.92 MgC/ha in roots, 2.79 MgC/ha in understory, 53.56 MgC/ha in necromass, 5.87 MgC/ha in litter, and 180.91 MgC/ha in the 30 cm topsoil.

Results give bent to possibilities for a wide range of projects, such as afforestation with both exotic and native species, replanting and management of degraded native forests, secondary native forest management and pastures areas abandonment for vegetation recovering. Economic valuation

showed a surplus of 2 % in the internal return rate per each 10 US\$ CMg⁻¹.

Many queries remained unsolved making necessary further discussions to harmonize a unique measurement and accounting methodology and protocols to elaborate and manage carbon projects in the Region.

Introducción

Chile, como muchas naciones ha considerado importante participar en las iniciativas para mitigar el efecto invernadero y a su vez ha visto en ello, la posibilidad para atraer recursos y financiamiento que permitan favorecer el desarrollo sostenible de áreas rurales, la conservación de bosques nativos y la incorporación de tecnologías de producción, ambientalmente más apropiadas. Si bien Chile está entre las naciones que aún no han ratificado el Protocolo de Kyoto, su posición será la de apoyar la elegibilidad de las actividades de proyectos relacionados con la forestación y reforestación en el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Mientras se llega a los acuerdos necesarios que habiliten las transacciones, el país ha dedicado este tiempo a la investigación y a la formación de capacidades para la medición, seguimiento, contabilidad y gestión de proyectos de carbono.

La dimensión forestal de Chile puede resumirse en la disponibilidad de 13,40 millones de hectáreas de bosques nativos, de los cuales 38 % se estima bosque productivo (CONAMA-CONAF, 1997) y, 1,95 millones de ha de plantaciones (INFOR, 1999) de las cuales 75 % corresponde a la especie *Pinus radiata*. Además, se estima que existen al menos 12 millones de hectáreas susceptibles de plantación (Chile Forestal, 1998). Esta disponibilidad de terrenos de aptitud forestal abre la posibilidad para diferentes tipos de proyectos de carbono, tanto de conservación y captura de carbono, como de sustitución de energía (Gayoso, 2000).

Si bien, en la realización de Inventarios Nacionales de Gases Efecto Invernadero son utilizables estimadores promedio por defecto para el cálculo de los cambios en la biomasa y emisiones (IPCC, 1996), los proyectos específicos requieren de mayor exactitud para cuantificar y demostrar los beneficios de carbono (SGS, 2000). Aún cuando existe información, esta es más abundante para bosques tropicales y más bien escasa para las especies de bosques templados australes (Brown y Lugo, 1990; Iverson *et al.* citado en FAO, 1997). Este estudio contribuye a llenar este vacío de información y en lo esencial, deriva tanto funciones de biomasa por especie como una función de amplia aplicación para estimar la biomasa aérea del tipo forestal siempre verde. Cuantifica igualmente, la capacidad y tasa de captura de carbono para diferentes situaciones de bosques naturales y plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. Además, mide la biomasa radical y el contenido de carbono presente en los diferentes compartimentos del ecosistema forestal: biomasa aérea, biomasa radical, sotobosque, necromasa, hojarasca y suelo.

Este trabajo es un adelanto de resultados del "Proyecto Medición de la Capacidad de Captura de Carbono en bosques de Chile y Promoción en el Mercado Mundial de Carbono", financiado por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico del Gobierno de Chile. Los objetivos específicos fueron: prospectar el mercado mundial del carbono; establecer la metodología de medición de la captura de carbono y determinar los coeficientes de expansión y reducción para condiciones locales; promover proyectos en el mercado internacional; y, apoyar el desarrollo de la institucionalidad.

Material

A la fecha, el estudio comprende 14 de 28 especies principales del bosque nativo templado tipo siempreverde, dos especies caducifolias y tres especies exóticas, Cuadro 1. La información se colectó en 13 predios forestales considerando una amplia distribución latitudinal (37° S y 41° S), longitudinal (72° 30' W y 73° 30' W) y altitudinal (80 a 880 m.s.n.m.), Cuadro 2.

La mayor parte de los sitios presenta alta pluviometría y comprenden dos macro sectores, la Precordillera Andina y la Cordillera de la Costa. Ambos presentan suelos de origen volcánico (*Andisols*) que se han desarrollado de cenizas modernas depositadas sobre rocas andesíticas para el primero y de cenizas antiguas sobre el complejo metamórfico para el segundo. Son suelos con buen drenaje, moderadamente profundos a profundos y textura franco a franco limosa en el sector Andino y franco limoso a arcillo limoso hacia la Costa (INIA, 1995).

Método

La selección de los sitios para el muestreo destructivo, se realizó a partir de los criterios de representatividad, en cuanto a superficie nacional según el Catastro de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (CONAF - CONAMA - BIRF, 1997), diversidad de especies y potencial de manejo de los diferentes bosques. Según esto, se seleccionaron 2 tipos forestales (TF), el TF Siempreverde con 4,1 millones de ha y el TF Roble – Raulí - Coigüe con 1,4 millones de ha. La ubicación de las parcelas en estos TF se ajustó con la disponibilidad de predios aportados por las empresas forestales asociadas al proyecto, a partir de los cuales, se

Cuadro 1
Las especies comprendidas en los ensayos destructivos

Nombre científico especie	Clave	Nombre local
<i>Aextoxicon punctatum</i>	AP	Olivillo
<i>Amomyrtus luma</i>	AL	Luma
<i>Dasyphyllum diacanthoides</i>	DD	Trevo
<i>Drimys winteri</i>	DW	Canelo
<i>Eucryphia cordifolia</i>	EC	Ulmo
<i>Gevuina avellana</i>	GA	Avellano
<i>Laurelia sempervirens</i>	LS	Laurel
<i>Laureliopsis philippiana</i>	LP	Tepa
<i>Nothofagus alpina</i> (*)	NA	Raulí
<i>Nothofagus dombeyi</i>	ND	Coigüe
<i>Nothofagus nitida</i>	NN	Coigüe de Chiloé
<i>Nothofagus obliqua</i> (*)	NO	Roble
<i>Persea lingue</i>	PL	Lingue
<i>Podocarpus nubigena</i> (**)	PN	Mañío hojas punzantes
<i>Saxegothaea conspicua</i> (**)	SC	Mañío hojas cortas
<i>Weinmannia trichosperma</i>	WT	Tineo
<i>Pinus radiata</i> (***)	PI	Pino insigne
<i>Eucalyptus globulus</i> (***)	EU	Eucalipto
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (***)	PO	Pino Oregón

(*) caducifolias; (**) coníferas nativas; (***) exóticas

ubicaron los sitios más representativos para cada situación, considerando la homogeneidad del bosque y condiciones de accesibilidad.

En cada unidad de muestreo de bosque nativo, se establecieron dos conglomerados al azar, conformados por dos parcelas de 500 m² cada uno (20 x 25 m) separadas a una distancia de 60 m. En el caso de plantaciones, se establecieron dos conglomerados, conformados por dos parcelas de 250 m² (10 x 25 m). Para la correcta ubicación de las parcelas en terreno se utilizó material cartográfico y equipos de sistema de posicionamiento global (GPS) con corrección diferencial.

A partir de los inventarios de estas parcelas, se seleccionaron los árboles muestra para el análisis destructivo, base para construcción de las

funciones generales de biomasa. El método consideró la tabla de frecuencia según clase diamétrica para determinar el número de individuos a muestrear por especie en cada sitio, pero asegurando además, al menos un individuo de cada especie por cada clase diamétrica que tenga al menos tres individuos. Dada la gran variabilidad de situaciones consideradas, el número de árboles se eligió según la cantidad de especies dominantes encontradas, desde 25 hasta 45 individuos. La muestra tomó un total de 540 árboles y la extracción de 137 raíces. En general, el procedimiento de muestreo sigue las directrices detalladas en el Manual de Procedimientos para Muestreos de Biomasa Forestal (Schlegel, *et al.*, 2000).

Cuadro 2
Caracterización de los sitios de estudio

Tipo de Bosque	Predio	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud msnm	Precipitaciones mm/año	Caracterización de los suelos
Siempre verde andino	Putraique	39°56'	72°27'	800	3000 a 4000	Cenizas volcánicas recientes (<i>Hydric Dystrandept</i>); moderadamente profundos a profundos, drenaje bueno a excesivo, franco, ligeramente plástico
	San Juan	39°56'	72°27'	880	3000 a 4000	
	Boquial	40°36'	72°46'	200	1750	Cenizas volcánicas modernas (<i>Typic Dystrandept</i>); moderadamente profundo, drenaje imperfecto, textura franco limosa, ligeramente plástico
Siempre verde costero	Chaihuín	39° 58'	73° 30'	300	3000	Metamórfico, moderadamente profundo, texturas moderadamente finas y drenaje moderado
	Llancacura	40°17'	73°27'	600	1500	Cenizas volcánicas antiguas (<i>Typic Palehumult</i>), drenaje bueno, moderadamente profundos, textura arcillo limosa, plástico y adhesivo
	Buenaventura	39°49'	73°09'	300	2000-2500	Cenizas volcánicas modernas sobre complejo metamórfico (<i>Typic Dystrandept</i>), drenaje moderado a bueno, textura franco limosa, ligeramente plástico
Roble, raulí, coigüe	Jauja	38°05'	72°28'	800	1500-2000	Cenizas volcánicas modernas (<i>Typic Dystrandept</i>); profundos, textura franco limosa, ligeramente plásticos, drenaje bueno
Pinus Radiata	Mardoñal	37°10'	72°50'	200	1500	Granítico formado por rocas meteorizadas ricas en cuarzo, textura arcillosa, compactos,
	Los Pinos	39° 44'	73° 10'	80	2000	Cenizas volcánicas modernas sobre complejo metamórfico (<i>Typic Dystrandept</i>), drenaje moderado a bueno, textura franco limosa, ligeramente plástico
La Promesa	39° 47'	73° 14'	180	2500		
Eucalyptus globulus	Las Palmas	39° 44'	73° 09'	200	2000	
	Chaihuín	39°58'	73°30'	300	3000	id. Siempre verde costero

El proceso comprende la medición y pesado de cada árbol. Una vez volteado el árbol, se mide la altura total, altura de comienzo de copa, diámetro a la altura de comienzo de copa, diámetro y altura de tocón, diámetro con corteza cada 2 m y espesor de corteza. Luego se pesa la biomasa verde de ramas y hojas por separado, con ayuda de un juego de pesas de 100 kg a 300 gramos, y se extraen muestras para determinar contenido de humedad, la densidad básica de la madera y el contenido de

carbono. Igual proceso recibe el fuste, se troza en tamaños de fácil manipulación y separa en fuste comercial con índice de utilización 10 cm (bosque siempreverde) y 8 cm (*P.radiata*) y, fuste no comercial.

La biomasa de raíces se determinó mediante la extracción de las mismas con ayuda de un aparejo mecánico de 3 toneladas de capacidad de levante y posterior pesaje. La medición de raíces consideró cuatro estratos: 0,5 a 2 cm, 2 a 5 cm, 5 a 10 cm y > de 10 cm de diámetro, adaptando el método

Skeleton (Böhm, 1979). Las raíces finas no fueron medidas por las dificultades que representa su separación e identificación.

Los contenidos de carbono se determinaron en laboratorio mediante oxidación, empleando una solución de dicromato de potasio en ácido sulfúrico y medido colorimétricamente.

Cuadro 3
Distribución de la biomasa por componentes del árbol.
Porcentaje promedio en base a peso seco

Especie	N	Fuste Comer. (%)	Fuste no come (%)	Corteza (%)	Subtotal Fuste (%)	Ramas (%)	Hojas (%)
AL	8	14.39	60.57	5.43	80.39	14.56	5.05
DD	3	0.00	75.87	6.16	82.03	14.59	3.38
DW	34	62.14	9.06	10.83	82.03	15.08	2.89
EC	42	77.34	6.96	6.26	90.56	7.30	2.14
GA	11	59.07	12.23	8.72	80.02	17.03	2.95
LP	35	70.61	6.35	5.99	82.95	13.05	4.00
ND	29	68.67	3.58	7.79	80.04	16.71	3.25
NN	29	71.11	4.93	11.08	87.12	9.82	3.07
PN*	28	63.00	5.18	4.62	72.80	22.23	4.97
SC*	13	50.25	11.64	16.21	78.10	18.31	3.60
WT	14	84.04	4.02	5.23	93.29	6.09	0.62
AP	4	67.38	7.02	3.83	78.23	16.23	5.53
LS	4	73.54	2.81	11.20	87.55	10.70	1.75
NA**	37	69.30	3.86	12.47	85.63	12.77	1.60
NO**	40	70.83	7.19	10.41	88.43	10.67	0.90
PL	11	58.76	10.79	6.73	76.28	17.16	6.55
PI 3-23	30	58.69	9.75	5.18	73.62	14.95	11.42
PI 23	3	80.56	0.65	5.64	86.85	9.08	4.07

(*) coníferas nativas; (**) caducifolias

La función de biomasa aérea total, de tipo alométrico, se estimó por MCO a partir de los datos de peso seco de la biomasa aérea (follaje, ramas y fuste) con el DAP y diámetro de tocón, altura total y de comienzo de copa. Se identificaron los modelos posibles,

entre los cuales se probaron distintas funciones lineales, cuadráticas y exponenciales. El mejor modelo se escogió por su simplicidad y el contraste de hipótesis clásicas, entre ellas, la comprobación de la normalidad y media cero (Jarque-Bera)

y ausencia de autocorrelación entre residuales (Q de Ljung-Box), test de heterocedasticidad de White, precisión de las variables estimadas ($p < 0.05$) y el coeficiente de determinación R^2 ajustado.

Cuadro 4

Contenido de carbono (%) por especie y componente del árbol

Especie		Fuste	Hojas	Ramas	Corteza	Prom. Pond
AL		43,37	41,80	41,92	36,87	42,73
DD		43,60	34,86	41,35	42,02	42,88
DW		44,74	44,65	47,35	47,92	45,48
EC		43,57	45,00	43,69	43,98	43,63
GA		43,20	37,67	41,11	41,43	42,53
LP		44,99	42,51	43,47	43,30	44,59
ND		43,89	45,26	42,65	43,54	43,70
NN		44,41	47,69	44,31	44,76	44,54
PN		47,31	45,09	41,16	40,72	45,53
SC		47,82	48,15	44,58	44,21	46,65
WT		42,60	41,11	43,63	45,27	42,79
Siempre Verde	Prom.	44,50	43,07	43,20	43,09	44,10
	SD	1,6688	4,0569	1,8641	2,8525	1,3716
AP		41,30	40,22	41,00	37,50	41,05
LS		44,44	40,33	42,50	44,13	44,13
NA		44,48	44,37	42,10	46,67	44,45
NO		43,50	41,54	39,33	38,14	42,48
PL		42,98	44,83	42,00	43,33	42,96
Roble Raulí Coigüe	Prom.	43,34	42,26	41,39	41,95	43,01
	SD	1,3064	2,2058	1,2751	3,9766	1,3650
PI 3-23	Prom.	45,47	44,83	44,69	45,38	45,27
	SD	1,2971	3,8754	2,3912	3,0970	nd

SD= desviación estándar; nd = no determinado

Adicionalmente, para determinar el carbono acumulado por unidad de superficie, se realizó el inventario de carbono en 168 parcelas circulares, temporales, localizadas al azar, de tamaño entre 250 y 500 m², que consideró los siguientes depósitos: biomasa aérea, biomasa de raíces,

sotobosque, árboles muertos en pie y troncos caídos (necromasa), hojarasca y suelo. El sotobosque y hojarasca se evaluó en 3 subparcelas de 1 m² por cada parcela de inventario, mientras la necromasa se midió en una subparcela de 25 m², clasificándola en tres categorías de descomposición. Para el

suelo, se determinó la densidad aparente y colectó una muestra representativa para la determinación de carbono en los estratos 0-15 cm y 15-30cm de profundidad en tres puntos de la parcela (Schlegel, *et.al.* 2001).

Resultados y Discusión

Biomasa por componente del árbol individual

La biomasa aérea está constituida por las componentes hojas, ramas y fuste, cuyas proporciones varían tanto por especie como por el tamaño de los árboles, Cuadro 3. Los resultados para las especies nativas del tipo forestal siempreverde (árboles de DAP > 10 cm) muestran que la biomasa promedio del fuste con corteza en relación con la biomasa aérea, comprende el rango que va desde 72,80 % (SD = 28,88) para una conífera nativa (PN) hasta 93,29 % (SD = 36,04) para la especie tino (WT). Mientras, las caducifolias alcanzaron valores de 85,63 % (SD = 24,56) para NA y 88,43 % (SD = 31,43) para NO.

Las especies con mayor proporción de hojas correspondieron a lingue (PL) y olivillo (AP), con más de 5,5 %, ambas especies de hoja ancha. Las especies AL y DD presentan ausencia o una baja proporción de fuste comercial, correspondiente con un DAP muy próximo al límite de 10 cm.

La situación de *P. radiata* (PI) igualmente varió según el tamaño del árbol; la proporción promedio de fuste con corteza alcanza a 73,62 % (SD = 28,36) para el rango de clases de edad entre 3 y 23 años; y, las acículas representan 11,42 % (SD = 10,29).

Biomasa en raíces

El porcentaje de raíces como peso seco sobre la biomasa seca aérea varió entre 21,86 % y 33,15 % para las especies del bosque siempreverde, siendo su promedio de 27.50 %. También pudo determinarse que para diámetros menores la proporción de raíces es mayor y para DAP mayores tiende a estabilizarse la biomasa de raíces como porcentaje de la biomasa aérea. En *P. radiata* las raíces representaron para la clase de edad 23 años, 25,39 % de la biomasa aérea. Estos montos son superiores al 25 y 20 % referidos por el IPCC (1996), para bosques templados de hoja ancha y coníferas respectivamente.

Contenido de carbono en la biomasa

El contenido de carbono en la biomasa del bosque siempreverde

Cuadro 5

Contenido de carbono bosque siempre verde por componente (%)

Componente	Promedio	SD	N
Sotobosque	39,01	2,6711	104
Hojarasca	37,58	2,2342	26
Necromasa	40,73	4,4275	26

resultó en todos los casos inferior al 50 % señalado como valor por defecto por el IPCC (1996) e inferior a valores reportados por otros autores, Cuadro 4. Según Barres (1993) citado por Lopera y Gutiérrez (2000) el contenido de carbono de la madera de coníferas está entre 50 y 53 %, mientras que en las especies de hoja ancha varía de 47 a 50 %. Sin embargo, Ortiz (1997) utilizó una

relación de 45% para bosques secundarios de Costa Rica, porcentaje que se acerca a los valores determinados en este estudio. Los valores inferiores de contenido de carbono se manifiestan en el componente hojas de trevo (DD) y avellano (GA).

El promedio ponderado de contenido de carbono en la biomasa aérea para las especies, varía entre 41,05 y 46,65 % correspondiente con las especies de olivillo (AP) y mañío (SC), respectivamente. Se puede decir que para el bosque siempreverde, el contenido promedio de carbono en la biomasa alcanza a 44,10 %.

El contenido de carbono en las raíces del bosque siempreverde varía entre 42,66 y 44,70 % con un valor medio de 43,80 % (SD = 0,8543). Para raulí fue 45,16 % (SD = 2,4788) y para pino 45,06 % (SD = 0,7320).

En los otros compartimentos del bosque, los menores contenidos de carbono se presentaron en la biomasa de la hojarasca y el sotobosque, Cuadro 5. Entre los distintos grados de descomposición de la necromasa no fue posible encontrar diferencias significativas en el contenido de carbono.

Densidad básica de la madera

No obstante este estudio determina funciones de biomasa estimadas directamente a partir del pesaje de los árboles, se determinó complementariamente la densidad básica de la madera (relación peso seco

Cuadro 6

Densidades básicas de la madera según especie (Mg/m³)

Especie	Promedio	SD	N
AL	0,7758	0,0903	12
AP	0,4880	0,0448	12
DD	0,6528	0,0456	12
DW	0,4402	0,0331	27
EC	0,6230	0,0601	11
GA	0,4624	0,0410	16
LP	0,4926	0,0403	35
LS	0,4215	0,0696	11
NA manejado	0,4840	0,0853	39
NA sin manejo	0,5076	0,0555	28
NN	0,5378	0,0749	16
NO manejado	0,6294	0,1887	7
NO sin manejo	0,5810	0,1017	28
PL	0,4601	0,0556	20
PN	0,5101	0,0458	16
SC	0,5471	0,0395	11

a volumen húmedo) para fuste, corteza, ramas y raíces, Cuadro 6.

Funciones de biomasa aérea

Con los datos, se ajustaron diferentes ecuaciones para cada especie y conjunto de especies del tipo forestal siempreverde. El Cuadro 7 muestra los mejores modelos, en notación logarítmica, para aquellas especies que contaron un número de árboles mayor de 25. En general corresponden a un modelo exponencial donde entra el DAP, el diámetro de tocón (DAT) o la altura total (HT). El mejor modelo general para el tipo forestal siempreverde es SV1, presenta el mayor coeficiente de determinación, menor error estándar de estimación (S.E.E.) y el coeficiente Durbin-Watson (D-W test) más cercano a dos (residuales con media cero, distribución normal y exentos de autocorrelación). Sin embargo, como la altura total individual no siempre es fácil de medir en bosques densos, el modelo simplificado SV2, resulta igualmente adecuado para ser aplicado sobre la tabla de rodal. Estos modelos están en construcción y serán

mejorados cuando se incorporen todos los árboles muestra en actual proceso.

Inventario de biomasa

En general, los bosques nativos en la zona centro-sur de Chile presentan una alta variación en cuanto al volumen por hectárea, dependiendo en gran medida de las condiciones de sitio, estructura, composición de especies y estado sanitario del bosque. En el Cuadro 8 se presentan los resultados de aplicar los modelos de biomasa sobre la tabla de rodal de los sitios estudiados. La capacidad de almacenaje de carbono por hectárea, sin considerar el suelo, alcanza de 190 a más de 600 Mg/ha para bosques adultos. La comparación de los montos de biomasa obtenidos no es fácil, debido al amplio rango de situaciones y la ausencia de información detallada. Para los bosques adultos del Tipo Forestal Siempreverde, en la Cordillera de los Andes, Donoso (1981) estima un volumen comercial entre 320 y 510 m³/ha y para renovales de la Cordillera de la Costa alrededor de 350 m³/ha.

Mientras para los renovales del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coigüe señala un rango de 200 a 300 m³/ha.

La relación de la biomasa total de los árboles de DAP>10 cm del bosque siempreverde, incluidas las raíces, sobre la biomasa comercial, alcanza coeficientes entre 1,4 y 1,9 aproximadamente. Los factores de expansión para incluir además de la biomasa de los árboles, el sotobosque, la necromasa y la hojarasca alcanzan valores que fluctúan 1,89 y 2,83 promediando 2,20 (SD = 0,35) para los diferentes sitios evaluados.

En cuanto a la tasa de incremento anual, existe información dispar que señala un amplio rango, dependiendo si se trata de bosques secundarios o adultos. Donoso (1993) señala crecimientos anuales de 2,93 a 17,9 m³/ha/año para renovales de la especie canelo y 9,21 m³/ha para renovales del tipo forestal Siempreverde costero.

Cuadro 7

Modelos para la estimación de la biomasa aérea total (BTA) en kg

Esp.	Modelo	Estadísticos					
		N	r ² aj	S.E.E	F	p	D W test
DW	LN BTA = - 1,7899 + 2,0567*LN(DAT)	33	94,42	0,3279	560	0,0000	1,91
EC	LN BTA = - 1,5233 + 2,2385*LN(DAP)	41	98,47	0,2038	2646	0,0000	1,75
LP	LN BTA = - 2,4990 + 2,2789*LN(DAT)	34	98,42	0,2084	2118	0,0000	2,56
ND	LN BTA = - 1,9056 + 2,3147*LN(DAP)	28	98,54	0,2344	1884	0,0000	1,37
NN	LN BTA = - 1,6938 + 2,0827*LN(DAT)	28	88,19	0,2795	210	0,0000	1,89
PN	LN BTA = - 2,0713 + 2,3522*LN(DAP)	27	98,20	0,2235	1476	0,0000	1,51
SV1	LN BTA = - 2,3587 + 2,0746*LN(DAP) + 0,4382*LN(HT)	245	98,00	0,2422	5982	0,0000	1,81
SV2	LN BTA = - 1,8332 + 2,2920*LN(DAP)	245	97,56	0,2674	9804	0,0000	1,69

Cuadro 8

Carbono acumulado por hectárea para los diferentes sitios (MgC/ha)

Bosque	Biomasa aérea	Raíces	Soto-bosque	Necro-masa	Hoja-rasca	Total Biomasa	Suelo	Total
Putraique (SVA)	243,18	68,68	9,68	26,89	4,88	353,31	143,76	497,06
San Juan (SVA)	506,21	133,79	0,50	18,67	6,80	665,97	Nd	
Boquial (SVA)	333,80	90,97	1,84	39,59	6,65	472,85	Nd	
Chaihuín (SVC)	160,79	43,83	1,20	36,67	13,80	256,24	148,47	404,71
Llancacura (SVC)	283,75	79,92	2,79	53,56	5,87	425,89	180,91	606,80
Buenaventura (SVC)	140,78	39,07	0,48	10,44	3,40	194,16	Nd	
Jauja manejado	107,44	31,68	5,19	8,57	8,20	161,08	156,98	318,07
Pino 23 años	133,33	33,73	0,41	1,11	1,33	170,03	Nd	

Nd= no disponible a la fecha de este documento

Sólo la instalación de parcelas permanentes de inventario de carbono permitirán determinar las tasas reales de captura anual de las especies y del bosque siempreverde.

Por su parte, el sitio Mardoñal de plantaciones de *P. radiata*, muestra en base a las mediciones de 6 clases de edad, un incremento medio anual sin considerar la biomasa de raíces de 5,8 MgC/ha/año (7,27 MgC/ha/año incluido raíces), montos que son conservadores para los crecimientos de la especie en Chile.

El carbono acumulado en los suelos supera en todos los casos estudiados 140 MgC/ha tomando en cuenta que se consideraron los primeros 30 centímetros de profundidad de suelo ya que aunque se encuentra materia orgánica hasta los 120 cm se estima que los cambios que se puedan producir más allá de los 30 cm no son significativos.

El contenido de carbono del suelo del bosque siempreverde de Chaihuín es 148,47 MgC/ha superior a 86,79 MgC/ha que se registran para suelos agrícolas de la zona donde se ubica este bosque (Fuentes, 1988). Esta diferencia se aprecia también comparar

los resultados obtenidos en este estudio para el bosque siempreverde de Llancacura (180,91 MgC/ha) y los de Fuentes (1988) para suelo agrícola del mismo sector (62,63 MgC/ha).

Proyectos combinados de aprovechamiento forestal y manejo para captura de carbono

En los párrafos siguientes se estudia la viabilidad técnica y económica de distintos tipos de proyectos forestales en que se combina el aprovechamiento forestal con los beneficios de carbono, que incluyen forestación y manejo del bosque nativo, a través del análisis de tendencia de la renta de los proyectos en función del precio del carbono. En Chile existe un potencial para secuestrar grandes cantidades de carbono de la atmósfera a través del establecimiento de plantaciones en suelos sin vegetación y manejo de bosque nativo, especialmente en áreas de bosques alterados.

Descartando los proyectos tipo “negocio como común”, los beneficios de carbono no parecen incentivo suficiente para que los propietarios de la tierra opten por proyectos de manejo de captura de carbono, lo cual

hace mirar hacia proyectos de objetivos múltiples. Los casos que se analizan comprenden áreas donde el solo beneficio de la madera no justificaría su desarrollo o sitios marginales donde hoy no es rentable plantar o manejar el bosque. No se consideran áreas de proyectos altamente rentables, ya que su adicionalidad podría ser discutible al ser considerados “negocio como común”. Para las diferentes estimaciones se ha utilizado información de costos y beneficios representativos de las áreas de los ejemplos.

Se analizan cinco situaciones, dos de plantaciones y tres de manejo de bosque nativo. Para cada una de ellas se grafica el efecto del incremento del precio del carbono sobre la Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto, Figura 1. Todos los ejemplos, cumplen en su diseño con los criterios de adicionalidad de beneficios de carbono y contribuyen al desarrollo sostenible del país. En el Cuadro 9 (final del texto) se analizan las fugas potenciales y se define una estrategia para controlarla.

Plantaciones de *Pinus radiata*, caso pequeños propietarios

En esta situación, de acuerdo con la ley de fomento forestal vigente en Chile, los pequeños propietarios reciben un subsidio para la forestación correspondiente a un porcentaje de los costos netos, un 90 % para las primeras 15 hectáreas y 75 % para las restantes. En la Figura 1 se observa que el proyecto sin carbono alcanza una TIR de 8 %. Incorporando carbono, la rentabilidad sube 0,2 puntos porcentuales por cada dólar de incremento en el precio del carbono. Tomando como referencia el precio al cual vendió Costa Rica en el año 1997, 10 US\$/MgC², la TIR incrementaría en 2 %.

Plantaciones de *Pseudotsuga menziesii*

En esta situación se consideró subsidio como en la situación anterior, sin importar el tamaño del propietario, debido a que la condición de suelos degradados habilita este beneficio. La tasa de retorno esperada sin carbono alcanza cerca de 6 % y el beneficio del carbono sigue una tendencia semejante al caso de plantaciones de *Pinus radiata*. Por ejemplo para 10 US\$/MgC, el incremento de la TIR alcanzaría a 2 %. Este análisis, puede contener una serie de sesgos derivados de no interpretar adecuadamente los precios futuros de *Pseudotsuga menziesii* (pino oregón), o porque al material pulpable no se le asignó valor económico ante la incertidumbre de su posible utilización. Sin embargo, es válido en cuanto a estimar la magnitud del posible aporte del carbono en el negocio forestal.

Manejo o recuperación de bosque nativo degradado

Si el manejo del bosque nativo degradado, ya sea mediante enriquecimiento³ u otra técnica, logra

aumentar la tasa de crecimiento biológico, existe adicionalidad de beneficios de carbono, los cuales son potencialmente negociables. Tomando como ejemplo, los montos de bonificación que otorga a los pequeños propietarios un programa de apoyo al manejo sostenible del bosque

de 20 US\$/MgC para alcanzar una TIR cercana al 10 %.

Escenario sin bonificación abierto a cualquier tamaño de propiedad. La rentabilidad en este caso es aún inferior a la anterior y sería necesario un precio de 40 US\$/MgC para llegar

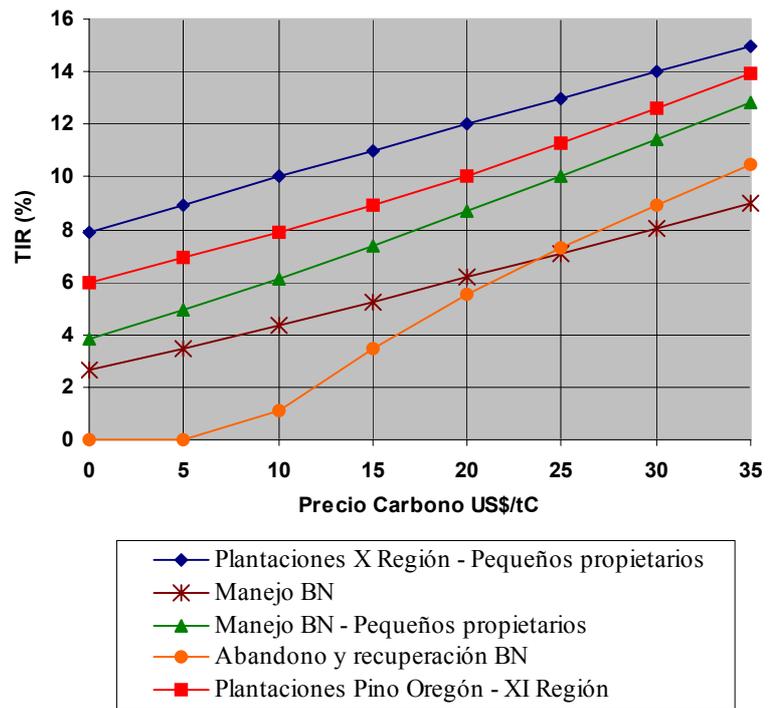


Figura 1. Rentabilidad proyectos forestales para diferentes precios de carbono.

nativo, se simularon dos escenarios, con y sin bonificación. Para las dos situaciones se consideró un enriquecimiento o plantación de 830 plantas/ha y un crecimiento medio de 8 m³/ha/año⁴.

Escenario con bonificación para pequeños propietarios, del 75 % de los costos del enriquecimiento y cercos. La TIR en este caso está por debajo del 4% sin considerar carbono y la tendencia con negocio de carbono es similar a los ejemplos de plantaciones. Sin embargo, se requeriría un precio

a una TIR del 10 %.

Exclusión de ganado y regeneración natural

Otra forma de proyecto podría considerar la exclusión de ganado para posibilitar la regeneración natural en áreas de bosque nativo. Se toma un área desprovista de vegetación o con bosques muy degradados en que la regeneración no ha sido posible por la acción del pastoreo o invasión de ganado. Se cerca la superficie para evitar la invasión de ganadería y permitir la regeneración y crecimiento del bosque, con el supuesto de un crecimiento promedio de 5 m³/ha/año. Por encima de 5 US\$/MgC, valor que cubre los costos

² 1 t de C equivale aproximadamente a 3,67 t de CO₂

³ enriquecimiento o plantación de reforzamiento.

⁴ Ingeniería de Bosques (1976), plantea crecimientos medios para bosque Siempreverde adulto para la Cordillera de la Costa de 6,2 - 12,9 m³/ha/año.

de los cercos, la administración y monitoreo del carbono, se observa una interesante contribución a la rentabilidad.

Considerando que las alternativas de inversión en proyectos de largo plazo, como es el caso de los proyectos forestales, presentan rentabilidades cada vez más moderadas y que las oportunidades para los propietarios de tierras marginales son escasas, los proyectos combinados de madera y carbono pueden llegar a constituir una opción si se implementan adecuados mecanismos de financiamiento. Además, el precio del carbono en el futuro mercado estará influenciado por la calidad y tipo de proyectos, donde la seguridad de la permanencia de los beneficios de carbono, el control adecuado de las fugas y la disminución de los riesgos, serán determinantes en la obtención de mejores precios.

La posible venta de servicios ambientales de captura de carbono por bosques nativos puede ser una herramienta que financie - en conjunto con otros servicios ambientales como sustento de la biodiversidad, regulación y producción de agua y protección de suelos - el desarrollo y manejo forestal sostenible de vastas áreas de bosque nativo que se encuentran en estado degradado y con muy pocas posibilidades de ser manejados de forma ambiental, social y económicamente sostenible.

Es importante destacar que estos bosques alterados o comúnmente llamados "degradados", en general, presentan buenas condiciones para que las especies forestales puedan establecerse vía regeneración natural o plantaciones (Donoso y Lara, 1999). La venta de captura de carbono y pago por otros servicios ambientales o ecosistémicos provenientes de estos bosques podría ayudar a que estos se regeneren y manejen de forma sostenible. Según De Camino (1999), una de las fortalezas y oportunidades

que presentan los bosques de la región de América Latina, para alcanzar un manejo forestal sostenible, es su potencial de venta de servicios ambientales en los mercados nacionales e internacionales. Por lo tanto, esta oportunidad se puede aprovechar para ciertos tipos de bosques nativos en Chile, especialmente los bosques más susceptibles de ser degradados, sin ninguna posibilidad de ser manejados en forma sostenible si no se retribuye económicamente a los propietarios de bosques por los bienes y especialmente los servicios ambientales que estos proveen a la sociedad nacional, regional e internacional.

Comentarios finales

En este estudio se han encontrado interesantes resultados tanto de porcentaje de distribución de la biomasa como del contenido de carbono en el ecosistema forestal, donde destacan para el tipo forestal siempreverde los valores de 665,97 MgC/ha para el bosque de San Juan y para el bosque de Llancaura incluyendo el suelo de 606,80 MgC/ha. Sin embargo el promedio ponderado del contenido de carbono de cada especie en relación a la biomasa resultó en todos los casos inferior al 50 % señalado como valor por defecto por el IPCC (1996) e inferior a valores reportados por otros autores.

Dadas esas diferencias se percibe interesante poder comparar otros métodos para la determinación del carbono contenido en la biomasa diferentes al método colorimétrico utilizado en este estudio, con el objetivo de poder estandarizar los procedimientos entre los distintos estudios y hacer comparables los resultados entre ellos.

El muestreo destructivo a pesar del alto costo que significa es necesario e imprescindible para la determinación

de funciones de biomasa, las que son fundamentales para contabilizar el carbono acumulado en los bosques. Luego de una alta inversión inicial, para el muestreo destructivo, los costos disminuyen ya que las funciones antes determinadas se aplican a las tablas de rodal generadas de inventarios muy similares a los tradicionales, ya que solo incluyen subparcelas de necromasa, hojarasca y sotobosque y muestras de suelo.

La metodología empleada ha demostrado su utilidad en el desarrollo de esta investigación, sin embargo existen situaciones que requieren mayor estudio y son aquellas que se refieren a la determinación de los coeficientes de reducción por pudrición y condición sanitaria de los árboles.

Se advierte, además, que es necesario definir de manera precisa el volumen comercial inventariable, la forma de medir las raíces finas y los cambios de carbono en el suelo.

Los resultados de este estudio reflejan la posibilidad para desarrollar diferentes proyectos de carbono en el país, entre los que destacan la forestación con pequeños propietarios o en terrenos marginales con especies nativas o exóticas, aprovechando la oportunidad de los subsidios existentes para la actividad. Muchas interrogantes quedan planteadas, las cuales hacen recomendable posteriores discusiones para armonizar la metodología de medición, la contabilidad y los protocolos para la preparación y gestión de proyectos de carbono en la Región.

Bibliografía

- Böhm, W. 1979. Method of Studing Root Systems. Ecological Studies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York. 188 p.

- Brown, S.; A. E. Lugo. 1990. Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soil in Puerto Rico and U.S. Virgin Island. *Plant and Soil*. 124:53-64.
- Chile Forestal. 1998. Legislación y Políticas. Aprobada Modificación al D.L.701.No hay Plazo que no se cumpla. *Chile Forestal* 257:16-17.
- CONAMA-CONAF- BIRF. 1997. Catastro y Evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales. Universidad Austral de Chile- Pontificia Universidad Católica de Chile- Universidad Católica de Temuco. 49 p.
- De Camino, R.. 1999. Manejo de bosques naturales en América latina.(III) parte. Necesidad de una estrategia. *Chile Forestal* 24(278): 47-50.
- Donoso, C.; A. Lara. 1999. Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Ed. Universitaria. Santiago- Chile. 421 p.
- Donoso, C. 1981. Tipos Forestales de los bosques nativos de Chile. Chile. Documento de Trabajo, Investigación y desarrollo forestal. (CONAF-PNUD-FAO).(38). 70 p.
- FAO. 1997. Estimating biomass and change of tropical forests. A primer. (Technical paper, 134)
- Fuentes, F. 1988. Estados de consistencia de los principales suelos agrícolas de la décima región, Chile. Facultad de Ciencias Forestales Universidad Austral de Chile. Valdivia. 52 p.
- Gayoso, J.; B.Schlegel. 2001. Proyectos Forestales para la mitigación de gases efecto invernadero. Una tarea pendiente. *Ambiente y desarrollo*. Vol. 17(1): 41-49.
- INFOR. 1999. El sector forestal Chileno. Estadísticas 1999-2000. Santiago Chile. 6 p
- Ingeniería de Bosoques. 1976. Estudio de factibilidad proyecto industrial Sarao. Inventario forestal.
- INIA. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Ministerio de Agricultura. Santiago de Chile. 723p.
- IPCC. 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and work book of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Mexico city, 11-13 September 1996.
- Lopera, G.; V. Gutiérrez. 2000. Viabilidad técnica y económica de la utilización de plantaciones de *Pinus patula* Como Sumideros de Carbono. Tesis Ingeniero Forestal, Universidad Nacional de Colombia. Medellín-Colombia. 146 p.
- Ortiz, E. 1997. Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂ Draft paper presented for inclusion in the Beijer Seminar in Punta Leona. Costa Rica. 19 p.
- Schlegel, B; Gayoso, J. y Guerra, J. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF- UACH- INFOR. 20 p.
- Schelegel, B; Gayoso, J. y Guerra, J. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF- UACH- INFOR. 20 p.
- SGS. 1996. Elementos Básicos para la formulación y control de proyectos de carbono. Taller. 3 y 4 Agosto. SGS-Fundación Chile. Santiago de Chile.

Análisis de fugas de proyectos potenciales

Proyecto	Características / Uso anterior del suelo		Consecuencias probables		Efecto Leakage	Estrategias
Plantaciones de <i>Pinus radiata</i> en la X región, caso pequeños propietarios	Los pequeños propietarios en sus tierras mezclan diversidad de usos y generalmente tienen baja productividad por unidad de superficie	Suelo en uso de ganadería o agricultura de subsistencia	Decrece la producción agrícola o ganadera en un bajo porcentaje		Leakage moderado a bajo ya que el suelo está degradado y son bajos los niveles de producción que tenían antes	Existen incentivos estatales Subsidio para forestación. Proyectos en mediería Securitización No permitir forestar toda la propiedad. Aumentar rentabilidad por unidad de superficie
		Suelo sin uso	Utilización de suelo forestal para Forestal		Leakage bajo o inexistente	
Plantaciones de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en la XI región	Suelo degradado, uso de ganadería extensiva para mercado Amplia oferta de suelo Baja rentabilidad por unidad de superficie		Establecimiento de la plantación sobre suelo degradado. Decrece la producción ganadera o se desplaza a otro lugar El proyecto reemplaza actividad económica		Leakage moderado a alto dependiendo de la extensión de la superficie y del tipo de propietario, de la oferta y de la demanda existentes	Existen incentivos forestación, pero también para mejoramiento de praderas Igualar o aumentar la rentabilidad por unidad de superficie. Capacitar para lograr más rentabilidad de la ganadería mediante mejoramiento de praderas
Manejo o recuperación de bosque nativo degradado, X Región	Uso para extracción de madera y leña, consumo local de subsistencia	Bosque sostenible, reducción del maderero, manejo del bosque	Decrece la producción de madera en un corto o largo período		Leakage moderado o alto dependiendo del tiempo si es corto o largo	Desarrollar fuentes alternativas de madera
		Preservar el bosque	Decrece o cesa la producción de madera		Alto leakage	
Exclusión de ganado y regeneración natural, X Región	Praderas naturales y matorrales, Diversos usos No son pequeños propietarios Suelos marginales		Decrece la producción de ganado Desplazamiento de la actividad para satisfacer la demanda	Costos de la exclusión de ganado. Lento el proceso de la regeneración natural	Leakage dependerá de los incentivos y de lo que se demore la regeneración natural y del propósito de esta si manejo o preservación Dependerá también de la rentabilidad anterior del la superficie	Incentivos para recuperación de bosque nativo

Pago por Servicios ambientales