

**BIOMASA Y CANTIDAD DE CARBONO ALMACENADO EN *Handroanthus heptaphyllus* (VELL.) MATTOS, EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CON *Ilex paraguariensis* ST.HIL.**

**BIOMASS AND CARBON STORAGE IN *Handroanthus heptaphyllus* (VELL.) MATTOS, IN AN AGROFORESTRY SYSTEM WITH *Ilex paraguariensis* ST.HIL.**

**López, L.N.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniero Forestal, consultor independiente. Av. San Martín 3260. [lucas\\_eldorado@yahoo.com.ar](mailto:lucas_eldorado@yahoo.com.ar)

**Resumen**

Se realizó una estimación de biomasa y carbono almacenado en *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo, actualmente identificada como *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos, (Bignoniaceae) mediante fórmula convencional y un modelo alométrico. Los ejemplares estudiados, se encuentran en un sistema agroforestal con especies maderables nativas asociadas con la Yerba mate, *Ilex paraguariensis* St.Hil. (Aquifoliaceae), especie reconocida mundialmente por la infusión que se prepara con ella y de alto valor cultural; el Guatambú blanco, *Balfourodendron riedelianum* Engl. (Rutaceae); y el Timbó colorado, *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. (Mimosaceae) en un área degradada. Se consideraron dos coeficientes de forma: 0,5 y 0,775. Para la edad de 16 años coeficiente de forma igual de 0,5 se estimó una biomasa 108,61 kilogramos en fuste y cantidad de carbono almacenado 54,25 kilogramos por fuste. Y considerando coeficiente de forma de 0,775 se estimó una biomasa de 168,18 kilogramos por fuste y 84,09 kilogramos de carbono por fuste.

**Palabras clave:** Misiones, modelo alométrico, coeficiente forma.

**Summary**

In this paper is presented an estimation of biomass and carbon storage in *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo, actually known as *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos, (Bignoniaceae) by an allometric model. The study was conducted in an agroforestry system with native species associated with Yerba mate, *Ilex paraguariensis* St.Hil. (Aquifoliaceae). The last one is worldwide recognized as an infusion with a high cultural value; Guatambú blanco, *Balfourodendron riedelianum* Engl. (Rutaceae) and Timbo Colorado, *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. (Mimosaceae) in a degraded area. Were considered two coefficients form to calculate over ground biomass and Carbon storage, 0.5 and 0.775. By the age of 16 years with the first coefficient was estimated 108.61 kilograms biomass in stem and 54.25 kilograms of carbon storage per stem. With the second coefficient was estimated a biomass of 168, 18 kg per stem and 84, 09 kilograms of carbon storage per stem.

**Key words:** allometric model, form coefficient, Province.

**Introducción**

Actualmente se afirma que los bosques y el cambio climático están íntimamente ligados, es por ello que desde el primer momento en que se debate sobre el cambio climático, se hace referencia al rol de los bosques frente a este (GIRO, 2007), citado por ALVAREZ, 2008.

Considerando que una opción para reducir el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y almacenar el C en la biomasa de la vegetación y en el suelo donde se encuentran las masas arbóreas, los programas de forestación y reforestación en las chacras o estados pueden funcionar muy bien como secuestradores de CO<sub>2</sub>. (CALDWELL *et al.* 2006).

Según un estudio realizado por THOMAS *et al.* 2007, de secuestro de carbono a través de especies nativas en el noreste de China obtuvieron como resultado que ciertas especies nativas de madera dura, presentaron alto potencial para secuestro de carbono. También concluyeron que el incremento del uso de especies nativas con este fin, tendría beneficios adicionales en términos de diversificación económica y prestación de "servicios ecosistémicos", incluyendo la protección de la biodiversidad.

DIXON (1997) citado por (PEARCE *et al.* 2001) analizando diferentes prácticas silviculturales en 40 países, determinó que el secuestro de carbón varía desde 5 Mg C/ha/año en promedio, en altas latitudes y hasta 40 Mg C/ha/año a bajas latitudes. De todas formas, concordando con MONTAGNINI y NAIR (2004) existen grandes variaciones en el potencial secuestro de carbón entre las diferentes regiones, variación en las condiciones ambientales y manejo silvícola.

En esta contribución se hace una estimación de la biomasa y la cantidad de carbono almacenado en Lapacho negro, *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo, (Bignoniaceae) plantada en un sistema agroforestal con especies maderables nativas asociadas con la Yerba mate, *Ilex paraguariensis* St. Hil. (Aquifoliaceae); el Guatambú blanco, *Balfourodendron riedelianum* Engl. (Rutaceae); y el Timbó colorado, *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. (Mimosaceae) en un área degradada, esta última referenciada como fijadora de nitrógeno (MONTAGNINI *et al.* 2006), utilizando un modelo alométrico propuesto por REDONDO BRENES y MONTAGNINI (2006). Para la selección de las especies a ser utilizadas en el sistema agroforestal se tuvo en cuenta el valor de su madera y características de buen crecimiento en la provincia de Misiones.

## **Materiales y métodos**

### **Especie bajo estudio**

*Tabebuia heptaphylla* conocido vulgarmente como lapacho negro es considerada por la calidad de su madera para Misiones como del grupo de las "Maderas de Ley". Su uso es múltiple, en el rubro de la Carpintería en general, se utiliza para marcos de puertas y ventanas, construcción civil, parquet, puentes, vigas y tirantes, machimbres, en construcciones navales para fondo de embarcaciones.

Se trata de un árbol que alcanza los 35 m de altura y hasta 1,5 m de DAP. Presenta fuste recto a tortuoso, follaje caedizo. La especie es natural de las zonas tropicales y subtropicales de Sudamérica. Crece en el bosque alto de la cuenca del río Paraná. Tiene una distribución limitada. Habita casi exclusivamente los sitios bajos con suelos húmedos y profundos, formando parte del estrato superior. Es muy raro en otros microambientes (LÓPEZ *et al.* 1987).

Es una planta muy resistente a la intemperie. El lapacho negro es considerado junto al lapacho amarillo, urunday, urundel, itin, quebracho como muy pesadas, ya que posee una densidad promedio mayor a 1.000 gr/cm<sup>3</sup> (SUIREZ, 2007).

### **Inventario**

Para el presente trabajo se realizaron siete mediciones sucesivas, desde el año 1994 hasta el año 2009 a la especie bajo estudio *Tabebuia heptaphylla*. Las mediciones se realizaron en siete diferentes años, 1994, 1995, 2000, 2003, 2004, 2008 y 2009. En cada año mencionado se realizó la toma de datos de altura total (Ht) y diámetro a la altura del pecho

(DAP) a 1,3 m sobre el nivel del suelo. Los datos fueron tomados para todos los individuos presentes en el año de medición. Para la medición de diámetro se utilizó una cinta diamétrica o calibre, el segundo en las primeras mediciones, y una vara telescópica para la medición de altura. La anotación de los datos de los individuos medidos, se realizó en una planilla convencional.

### Análisis de datos

Fueron calculados para cada individuo el área basal, el volumen y estimado la biomasa del fuste y cantidad de carbono almacenado en el fuste. Para los análisis que implican DAP fueron utilizados los datos a partir de la edad de 5 años mientras que los análisis que involucran la altura total fueron utilizados los datos desde los 2 años. El incremento medio anual (IMA) fue calculado a partir de la edad de 5 años, y resultó de dividir el valor de crecimiento por la edad correspondiente de plantación. El volumen individual de los árboles fueron calculados mediante:

1. fórmula propuesta por NEWBOULD (1967) citada por (REDONDO BRENES y MONTAGNINI, 2006) utilizando un coeficiente de forma (cf) de 0,5:

$$\text{volumen} = \text{area basal} \times \text{altura total} \times 0,5$$

$$\text{Donde } \text{area basal} = \frac{\pi}{4} \times \text{DAP}^2$$

DAP = diámetro a la altura del pecho en metros (m).

2. fórmula propuesta por NEWBOULD (1967) citada por (REDONDO BRENES y MONTAGNINI, 2006) utilizando coeficiente de forma de 0,775, propuesta por HUTCHINSON (1974) citado por el Consorcio ForCerPa (2009). Coeficiente de forma general para especies nativas, entre ellas *Tabebuia heptaphylla*, del Paraguay (con tipo de clima similar a Misiones).

$$\text{volumen}' = \text{area basal} \times \text{altura total} \times 0,775$$

Para la estimación de biomasa presente en lapacho y cuantificación de carbono almacenado, se procedió teniendo en cuenta los distintos resultados de volumen debido a los coeficientes de forma utilizados. Se realizaron las estimaciones y cálculos para fuste, considerando que en términos porcentuales, el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representando entre 55 y 77 % del total (GOMEZ, 1976; MADGWICK, 1977; OVEREND, 1978; PARDE, 1980; SCHONENBERGER, 1984; PEDRASA, 1989; SAEZ, 1991; GAYOSO *et al.* 2002) citado por ALVAREZ (2008).

Para la estimación de biomasa se procedió de tres formas:

1. A través de la ecuación convencional de cálculo de biomasa, donde el volumen fue calculado mediante la fórmula propuesta por NEWBOULD (1967):

$$\text{Biomasa} = \text{volumen} \times \text{densidad} \quad (1)$$

2. A través de la ecuación convencional de cálculo de biomasa, donde para el cálculo de volumen el coeficiente de forma es el propuesto por HUTCHINSON (1974) citado por el Consorcio ForCerPa:

$$\text{Biomasa}' = \text{volumen}' \times \text{densidad} \quad (2)$$

3. Mediante modelo alométrico desarrollada por MONTERO y MONTAGNINI (2005):

$$\ln(y) = a + b * \ln(DAP)$$

- considerando coeficiente de forma (cf)=0,5:

$$\Rightarrow y = e^{[a+b \times \ln(DAP)]} \quad (3)$$

- considerando coeficiente de forma (cf) =0,775:

$$\Rightarrow y' = e^{[a+b \times \ln(DAP)]} \quad (4)$$

Donde y e y' = biomasa en kilogramos (kg) respectivamente, DAP = diámetro a la altura del pecho en centímetros (cm), a y b coeficientes hallados a través de gráfico de regresión entre DAP – Biomasa y DAP – Biomasa' (Anexo I).

Para fórmulas de estimación de biomasa (1) y (2), la densidad utilizada fue 990,286 kg/m<sup>3</sup>, que es el resultado el promedio de las densidades (peso seco) propuestas por INTI – CITEMA (2009); MADERASNOA (2009) y SUIREZS (2009).

A partir de la biomasa de fuste se calculó la concentración de carbono presente en el mismo. La cuantificación de carbono se realizó en kilogramos en fuste y en Megagramos por hectárea. Se consideró que el 50 % de la biomasa está formada por carbono (ALVAREZ, 2008; MONTERO y MONTAGNINI, 2005). Para la estimación de carbono de fuste almacenado se consideró la biomasa estimada a partir del volumen calculado con cf=0,5, biomasa' estimada a partir del volumen' calculado con cf=0,775 y biomasa estimada a través del modelo alométrico.

$$\text{Cantidad de carbono almacenado} = \text{biomasa} \times 50\%$$

Donde biomasa se estimó de (1)

$$\text{Cantidad de carbono almacenado}' = \text{biomasa}' \times 50\%$$

Donde biomasa se estimó de (2)

$$\text{Cantidad de carbono almacenado}_y = y \times 50\%$$

Donde biomasa se estimó de (3)

$$\text{Cantidad de carbono almacenado}_{y'} = y' \times 50\%$$

Donde biomasa se estimó de (4)

La estimación de la cantidad de carbono almacenado en fuste por hectárea, resultó de multiplicar el número de individuos en la parcela (2500m<sup>2</sup>) por 4.

Para una investigación estricta, se observa la necesidad de determinar parámetros dasométricos específicos para la población en estudio.

## Resultados

### *Crecimiento en diámetro de Tabebuia heptaphylla en un sistema agroforestal.*

La especie bajo estudio no presenta un comportamiento normal en cuanto a su distribución diamétrica. En el sitio bajo estudio la especie mostró un incremento medio anual (IMA) diamétrica de 1,04 cm. Los valores de IMA fueron decreciendo a través de los años (Tabla 1).. En el año 5 el valor medio de diámetro es de 8,13 cm y para el año 16 el valor

medio es de 16,71 cm. Los datos de diámetro observados pueden ser explicados mediante una ecuación exponencial con el 41,34 % de representatividad de los mismos.

### Crecimiento y productividad.

El mayor valor de incremento medio anual para diámetro se registró al año 11 mientras que el IMA en altura total el mayor valor a la edad de 5 años (Tabla 7). El DAP medio para la edad de 16 años es de 16,71 cm y la altura total media para la misma edad es de 9,99 m. El volumen calculado con (cf) igual a 0,5 a la edad de 16 años es de 16,22 m<sup>3</sup> por hectárea, mientras utilizando el cf igual a 0,775 el volumen es de 25,14 m<sup>3</sup>/ha. El IMA DAP decrece a través de los años como así también el IMA Ht. En cuanto al IMA de volumen y volumen' ambos tienden a aumentar a mayores edades, excepto a la edad de 15 años en ambos IMA donde hay una pequeña disminución.

**Tabla 1. Datos generales de crecimiento y productividad de *Tabebuia heptaphylla* en sistema agroforestal.**

**Table 1. General data of growth and productivity of *Tabebuia heptaphylla* in an agroforestry system**

Edad	Individuos	DAP - (cm) medio	Altura Total - Ht - (m) medio	Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)	Volumen Total (m <sup>3</sup> /ha) cf=0.5	Volumen' Total (m <sup>3</sup> /ha) cf=0.775	IMA DAP (cm/año)	IMA Ht (m/año)	IMA volumen (m <sup>3</sup> /ha/año)	IMA volumen' (m <sup>3</sup> /ha/año)
5	39	8,13	5,48	0,81	2,22	3,44	1,63	1,10	0,44	0,69
7	39	11,27	6,18	1,56	4,81	7,45	1,61	0,88	0,69	1,06
10	39	13,25	7,30	2,15	7,85	12,17	1,32	0,73	0,79	1,22
11	37	14,82	7,97	2,55	10,18	15,77	1,35	0,72	0,93	1,43
15	37	16,30	8,80	3,09	13,58	21,05	1,09	0,59	0,91	1,40
16	37	16,71	9,99	3,25	16,22	25,14	1,04	0,62	1,01	1,57

### Estimación de biomasa y carbono almacenado en *Tabebuia heptaphylla*.

El valor de estimación de biomasa, para la edad de 16 años, utilizando cf igual a 0,5 es de 108,51 kg/árbol y de 16058,77 kg/ha. Para la estimación con cf igual a 0,775, para la misma edad es de 168,18 kg/árbol y 24891,10 kg/ha. Mediante modelo alométrico de estimación de biomasa se estimó 1094,06 kg/arb y 16140,91 kg/ha para cf de 0,5 (Tabla 2) y 169,05 kg/árbol y 25018,71 kg/ha para cf de 0,775 (Tabla 9). El valor de biomasa calculado mediante (1) para la edad de 16 años es 108,51 kilogramos por fuste por árbol mientras que el calculado mediante (3) es de 109,06 kilogramos por árbol. La diferencia entre estos valores mencionados es del 0,51 por ciento (Tabla 8). Los valores que presentaron menor diferencia porcentual son a la edad de 15 años para ambas estimaciones. Para todas las estimaciones de biomasa y carbono almacenado se tuvieron en cuenta el fuste con corteza.

**Tabla 2. Biomasa de fuste estimado utilizando coeficiente de forma (cf)=0,5 y respectiva estimación mediante modelo alométrico propuesto por MONTERO y MONTAGNINI, 2005.**

**Table 2. Estimated stem biomass considering form coefficient of 0.5 and respective estimation using allometric model proposed by MONTERO y MONTAGNINI, 2005.**

Modelo Alométrico					
EDAD	(cf) de 0,5 <i>Biomasa=volumen densidad</i>		(cf) de 0,5 <i>ln(Biomasa)= a + b*ln(DAP)</i>		Diferencia porcentual
	biomasa (kg/arb)	biomasa (kg/ha)	y (kg/arb)	y (kg/ha)	
5	14,10	2199,70	14,35	2237,89	1,71%
7	30,52	4761,06	30,47	4753,25	0,16%
10	49,86	7778,40	51,41	8020,73	3,02%
11	68,09	10077,61	68,88	10194,56	1,15%
15	90,89	13451,78	90,94	13459,10	0,05%
16	108,51	16058,77	109,06	16140,91	0,51%

Los coeficientes del modelo alométrico para las distintas edades se detallan en Anexo I.

El valor de biomasa calculado mediante (2) para la edad de 16 años es 168,18 kilogramos por fuste por árbol mientras que el calculado mediante (4) es de 169,05 kilogramos por árbol. La diferencia entre estos valores mencionados es del 0,51 por ciento (Tabla 3). Los valores que presentaron menor diferencia porcentual son a la edad de 15 años para ambas estimaciones.

**Tabla 3. Biomasa de fuste estimado utilizando coeficiente de forma (cf)=0,775 y respectiva estimación mediante modelo alométrico propuesto por MONTERO y MONTAGNINI, 2005.**

**Table 3. Estimated stem biomass considering form coefficient of 0.775 and respective estimation using allometric model proposed by MONTERO y MONTAGNINI, 2005.**

Modelo Alométrico					
EDAD	(cf) de 0,775 <i>Biomasa=volumen x densidad</i>		cf=0,775 <i>ln(Biomasa)= a + b*ln(DAP)</i>		Diferencia porcentual
	biomasa (kg/arb)	biomasa (kg/ha)	y (kg/arb)	y (kg/ha)	
5	21,86	3409,53	22,24	3468,73	1,71%
7	47,31	7379,64	47,23	7367,53	0,16%
10	77,29	12056,51	79,69	12432,13	3,02%
11	105,54	15620,30	106,77	15801,56	1,15%
15	140,88	20850,27	140,96	20861,60	0,05%
16	168,18	24891,10	169,05	25018,71	0,51%

Los coeficientes del modelo alométrico para las distintas edades se detallan en Anexo IB.

Calculando el volumen utilizando (cf)=0,5 el carbono almacenado estimado en el fuste para la edad de 16 años es de 54,25 kg por árbol y de 8,03 Mg de carbono almacenado en fuste por hectárea (Tabla 4). Mientras que utilizando el (cf)=0,775 para la misma edad es de 84,09 kg/fuste/árbol y llevado a hectáreas es de 12,45 Mg por fuste de árbol (Tabla 5). La diferencia porcentual tanto los valores estimados con coeficiente de forma de 0,5 como para los valores estimados con coeficiente de forma de 0,775 para la edad de 16 años es de 0,51

por ciento. Siendo la menor diferencia para ambos casos a la edad de 15 años donde es igual al 0,05 por ciento (Tabla 4 y 5).

**Tabla 4. Distintas estimaciones de carbono almacenado en fuste, en *Tabebuia heptaphylla* plantado en sistema agroforestal.**

**Table 4. Different stem carbon storage estimation in *Tabebuia heptaphylla* in an agroforestry system.**

Coeficiente de forma (cf) de 0,5					
EDAD	carbono almacenado (kg/arb)	carbono almacenado (Mg/ha)	carbono almacenado <sub>y</sub> (kg/arb)	carbono almacenado <sub>y</sub> (Mg/ha)	Diferencia porcentual
5	7,05	1,10	7,17	1,12	1,71%
7	15,26	2,38	15,23	2,38	0,16%
10	24,93	3,89	25,71	4,01	3,02%
11	34,05	5,04	34,44	5,10	1,15%
15	45,45	6,73	45,47	0,05	0,05%
16	54,25	8,03	54,53	8,07	0,51%

Carbono almacenado estimado a partir de (1) y Carbono almacenado y estimado a partir de (3)

**Tabla 5 Estimación de carbono almacenado en fuste, en *Tabebuia heptaphylla* plantado en sistema agroforestal.**

**Table 5 Stem carbon storage estimation in *Tabebuia heptaphylla* in an agroforestry system.**

Coeficiente de forma (cf) de 0,775					
EDAD	carbono almacenado´ (kg/arb)	carbono almacenado´ (Mg/ha)	carbono almacenado <sub>y</sub> ´ (kg/arb)	carbono almacenado <sub>y</sub> ´ (Mg/ha)	Diferencia porcentual
5	10,93	1,70	11,12	1,73	1,71%
7	23,65	3,69	23,61	3,68	0,16%
10	38,64	6,03	39,85	6,22	3,02%
11	52,77	7,81	53,38	7,90	1,15%
15	70,44	10,43	70,48	10,43	0,05%
16	84,09	12,45	84,52	12,51	0,51%

Carbono almacenado´ estimado a partir de (2) y Carbono almacenado y´ estimado a partir de (4)

## Conclusión

Los valores de DAP para los 16 años de edad presentan un valor mínimo de 8 cm, un valor máximo de 27,5cm y un valor medio de 16,71cm. En cuanto a la altura total el valor medio a los 16 años es de 9,99 m mientras que la mínima es 7m y la máxima es 13,10 m.

La estimación de biomasa y almacenamiento de carbono, considerando un coeficiente de forma de 0,5, para la edad de 16 años es de 108,61 kilogramos en fuste y 54,25 kilogramos de carbono por fuste. Realizando la estimación, considerando un coeficiente de forma de 0,775, para la edad de 16 años se estimó una biomasa de 168,18 kilogramos por fuste y 84,09 kilogramos de carbono por fuste.

Es necesario generar información sobre el comportamiento *Tabebuia heptaphylla* en otras áreas y determinar mediante el trozado los valores reales de densidad, porcentaje de carbono y biomasa en todo el volumen arbóreo.

## Bibliografía

ALVAREZ, G., 2008. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA ESCUELA DE POSGRADO Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Turrialba, Costa Rica,

CALDWELL, V.W.; MACLARENA, J.M.; CHENA, W.M.; JUA, S.; ZHOUB, Y.; YINC, A.; BOLANDA. 2006. An integrated assessment model of carbon sequestration benefits: A case study of Liping county, China *Journal of Environmental Management* 85 (2007) 757–773 Received 5 March 2006; received in revised form 24 April 2006; accepted 9 August 2006 Available online 18 December 2006

LÓPEZ, J.A.; LITTLE, E.; RITZ, G.; ROMBOLD, J.; HAHN, W. 1987. Wikipedia. Árboles comunes del Paraguay: Ñande yvyra mata kuera. Paraguay, Cuerpo de Paz, 425 pp.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry system. *Agroforestry Systems* 61:281-295.

MONTAGNINI, F. 2005. Environmental Services of Agroforestry Systems. Perface.

MONTERO, M.; MONTAGNINI, F. 2005. Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*/no. 45:112-119

PEARCE, D.; PUTZ, F.E.; VANCLAY, J.K. 2001. Sustainable forestry in the tropics: panacea or folly?

REDONDO-BRENES, A.; MONTAGNINI, F. 2006. Forest Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica, *Ecology and Management* 232 (2006) 168–178

REDONDO-BRENES, A. 2005. A review of the Agroforestry Systems of Costa Rica. *Environmental Services of Agroforestry Systems*. Editor: Montagnini, F, p, 98

SUIREZS, T. M. 2007. Apunte de cátedra, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones. Descripción de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

SUIREZ, T. 2009. Apunte de cátedra. Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Facultad de Ciencias Forestales Universidad Nacional de Misiones.

THOMAS, S.C.; MALCZEWSKI, G.; SARPRUNOFF, M. 2007. Assessing the potential of native tree species for carbon sequestration forestry in Northeast China. *Journal of Environmental Management* 85 (2007) 663–671