

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE UNA PLANTACIÓN JOVEN DE *PINUS GREGGII* Engelm.

CARBON STORAGE IN THE ABOVE-GROUND BIOMASS OF ONE YOUNG *PINUS GREGGII* Engelm. PLANTATION

Felicitas Clemencia Pacheco Escalona¹, Arnulfo Aldrete^{1*}, Armando Gómez Guerrero¹, Aurelio M. Fierros González¹, Víctor M. Cetina-Alcalá¹ y Humberto Vaquera Huerta²

¹Programa Forestal y ²Programa de Estadística, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

*Autor para correspondencia (aaldrete@colpos.mx)

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el potencial de *Pinus greggii* Engelm. para almacenar carbono en la biomasa aérea, se estimó la biomasa total aérea en una muestra de 20 árboles, los cuales se separaron en tallo, ramas y follaje. El estudio se llevó a cabo en una plantación de seis años de edad establecida en Cuaunepantla, Acaxochitlán, Estado de Hidalgo, México. La biomasa seca aérea promedio fue de 8.0 kg por árbol, de la cual 4.1 kg (51 %) se ubicó en tallo, 1.9 kg (24 %) en ramas y 2.0 kg (25 %) en follaje. La productividad primaria neta fue estimada en 5.8 t ha⁻¹ año⁻¹, para una densidad de 4425 árboles/ha. La concentración de carbono en tejido vegetal fue de 51 %. Una ecuación matemática sencilla ($y = 147x + 3288x^2$) para estimar la biomasa de carbono a partir de la variable combinada de diámetro y altura (D^2h) explicó 89 % de la variación. Estos resultados muestran que el potencial de almacenamiento de carbono en una plantación de seis años de *P. greggii* Engelm. es relativamente alto, con 17.9 t ha⁻¹, que representa una masa de dióxido de carbono equivalente de 65.8 t CO₂ ha⁻¹.

Palabras claves: *Pinus greggii*, plantación, biomasa, carbono secuestrado.

SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the potential of *Pinus greggii* Engelm. for storing carbon in above-ground biomass. Total above ground biomass was estimated throughout the evaluation of a sample of 20 trees, separated into stem, branches and foliage. This evaluation was carried out in a six-year old *Pinus greggii* Engelm. plantation established at Cuaunepantla, Acaxochitlán, in the state of Hidalgo, México. Average aerial dry biomass was 8.0 kg per tree, from which 4.1 kg (51 %) were in stem, 1.9 kg (24 %) in branches and 2.0 kg (25 %) in foliage. Net primary productivity was estimated at 5.8 t ha⁻¹ y⁻¹, considering a plantation density of 4425 trees/ha. Plant tissue carbon concentration was 51 %. A simple mathematic equation ($y = 147x + 3288x^2$) for estimating carbon biomass from the combined variable of diameter and height (D^2h) explained 89 % of the variation. Results showed that the potential for carbon storing in a six-year plantation of *Pinus greggii* Engelm. is relatively high with 17.9 t ha⁻¹, which represents a carbon dioxide equivalent mass of 65.8 t CO₂ ha⁻¹.

Index words: *Pinus greggii*, plantation, biomass, carbon sequestration.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de carbono en ecosistemas naturales, así como en las plantaciones forestales, se da mediante el proceso de la fotosíntesis. Durante este proceso el CO₂ se transfiere de la atmósfera al tejido vegetal. Si el tiempo medio de residencia del carbono en tejido vegetal es largo (60 años o más), se habla de un proceso biológico de captura de carbono, el cual contribuye a mitigar los efectos de calentamiento global (Schlesinger, 1997). El almacenamiento de carbono en plantaciones forestales es un proceso relevante a estudiar en México por diversas razones, entre las que destaca que nuestro país se ubica dentro de las 20 naciones con mayor emisión de CO₂ (Sheinbaum y Masera, 2000). Si bien México no tiene el compromiso directo, dentro de la Convención de Cambio Climático, de abatir sus emisiones de CO₂ a un nivel específico, sí tiene la posibilidad de acceder al cobro de créditos por captura de carbono a través de los Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto (Estrada, 2003). Desde el punto de vista biofísico y de recursos naturales, el país tiene un alto potencial para la venta de servicios ambientales por concepto de captura de carbono (Rosa *et al.*, 2004; Burstein *et al.*, 2002). Desafortunadamente la bibliografía sobre el potencial de almacenamiento de carbono en especies de pino es limitada.

El almacenamiento de carbono depende de la productividad primaria neta de cada sistema, al asegurar una concentración de carbono en el tejido vegetal promedio de alrededor de 50 % (Brown, 1997; Schlesinger, 1997). El carbono almacenado se incorpora en los compartimentos del

suelo y a la vegetación, pero con mayores tasas de acumulación en este último (Brown y Lugo, 1982). Las reservas de carbono en una plantación pueden evaluarse en una muestra de árboles, que además permitan desarrollar funciones para la predicción del contenido de carbono con base en un mínimo de variables medidas (Joosten *et al.*, 2004). El potencial de almacenamiento de carbono en sistemas sometidos a manejos es mayor cuando las plantaciones son jóvenes, dado que su crecimiento no ha alcanzado el punto máximo (Schlesinger, 1997).

Este trabajo presenta información específica del potencial de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea en una plantación de *Pinus greggii* de seis años de edad, la cual se considera una de las especies más comunes usadas para la reforestación (Dvorak *et al.*, 2000), por su alta productividad y adaptabilidad a diversas condiciones biofísicas (García *et al.*, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

La plantación se localiza en la comunidad de Cuaunpantla, Municipio de Acaxochitlán, en el Estado de Hidalgo, 20° 09' 52" LN y 98° 13' 31" LO, y una altitud de 2200 m. El terreno tiene una pendiente promedio de 2 %. Su clima es templado frío, con una temperatura media anual de 16 °C y una precipitación media anual de 800 a 1000 mm (Barajas *et al.*, 2004). De acuerdo con la clasificación FAO (1988), el suelo es un Cambisol Éutrico caracterizado por un horizonte superficial delgado con contenidos de materia orgánica que van de 3.2 a 4.4 % en los 20 cm superiores y con porcentaje de saturación de bases menor de 50 %.

La plantación se estableció en julio de 1999, en una superficie de 400 m², con plántulas de *Pinus greggii* producidas en vivero en un periodo de diez meses. La distribución de la plantación fue en marco real con un espaciamiento inicial de 1 x 1 m (Barajas *et al.*, 2004), el cual se ajustó al tercer año a 2 x 1 m (5000 árboles/ha), al eliminar una de cada dos hileras en 2003. Este ajuste de espaciamiento se hizo para minimizar efectos de competencia y favorecer el crecimiento de los árboles. Al momento de la evaluación se tenía un total de 175 árboles en la plantación.

Para la cuantificación de biomasa se seleccionaron 20 árboles en forma aleatoria. En cada árbol se midió el diámetro a la base del tallo, el diámetro a 1.30 m y la altura total. Posteriormente, los árboles se derribaron y se separaron en componentes de tallo, ramas y follaje. Cada componente se pesó en fresco y se obtuvo una muestra para la determinación del contenido de humedad en laboratorio. De la parte media del tallo se extrajo una rodaja de 10 cm de ancho. Experiencias previas con trabajos similares de campo sugieren que es suficiente la colecta de una muestra de la parte media del fuste en arbolado joven (Losi *et al.*, 2003). Para el caso de ramas y follaje se colectó una rama que derivara di-

rectamente del fuste y que representara al menos cuatro ciclos de crecimiento. Los componentes de follaje se secaron a 70 °C y los de ramas y fuste (madera) a 80 °C, hasta alcanzar peso constante.

Con los contenidos de humedad de cada componente, se corrigieron los pesos frescos determinados en campo. Para estimar el contenido de carbono en cada componente se seleccionaron tres muestras compuestas de los 20 árboles muestreados. De las muestras de ramas y fuste se obtuvo aserrín mediante el aserrado de piezas. Las muestras de follaje y madera se pasaron por un molino con motor de 0.25 HP (Thomas Scientific 800-345-2100. Mod. 3383-L10. GE Motors Industrial Systems) con tamiz 0.425 mm. La determinación de carbono orgánico se hizo por el método de combustión seca en un analizador automático de Carbono Shimadzu TOC 5000-A.

Una vez determinada la biomasa y el contenido de carbono por árbol, se convirtieron a t ha⁻¹ a partir de los parámetros del árbol medio, como lo indica Lieth (1975). Se consideró una densidad de 4425 árboles/ha, por lo que las cantidades reportadas corresponden al potencial de crecimiento si no se presentan factores adversos como plagas, enfermedades o deficiencias nutrimentales.

Con el fin de desarrollar una función de aplicación práctica en campo, se generaron ecuaciones de predicción de biomasa y carbono a través de la relación de la variable combinada de diámetro y altura (D²h), como lo sugieren Hakkila (1989) y Joosten *et al.* (2004). Para simplificar el modelo y facilitar su interpretación, se estimaron ecuaciones que pasaran por el origen. El modelo seleccionado correspondió a una ecuación polinomial de segundo orden.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El promedio de biomasa aérea por árbol fue de 8.0 kg distribuidos como sigue: 4.1 kg en fuste, 2.0 kg en follaje y 1.9 kg en ramas (Figura 1). El estimado de biomasa aérea total en el área de la plantación fue de 1.4 t, lo que equivale a 35.2 t ha⁻¹. En la Figura 2 se muestran las ecuaciones obtenidas para la predicción de biomasa y de carbono. Además, el peso de la biomasa y carbono en función del diámetro y altura (D²h) mostró una alta correlación (R² = 0.89).

Este resultado muestra la importancia del diámetro normal y la altura total como variables predictoras de la masa de carbono en una plantación joven de *Pinus greggii*. Por tanto, ante la falta de información para plantaciones jóvenes de esta especie y bajo condiciones similares, sería suficiente conocer los valores medios de diámetro y altura para hacer una estimación del carbono almacenado en la parte aérea, mediante la ecuación encontrada en este trabajo. Sin embargo, se debe tener precaución de no aplicar la ecuación en intervalos fuera de los explorados en este estudio.

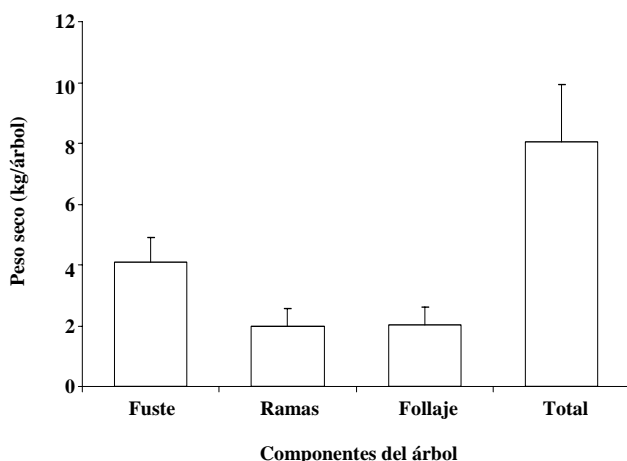


Figura 1. Distribución de biomasa aérea promedio por componente del árbol una plantación de *Pinus greggii* de seis años de edad. Las líneas en barras indican los errores estándar.

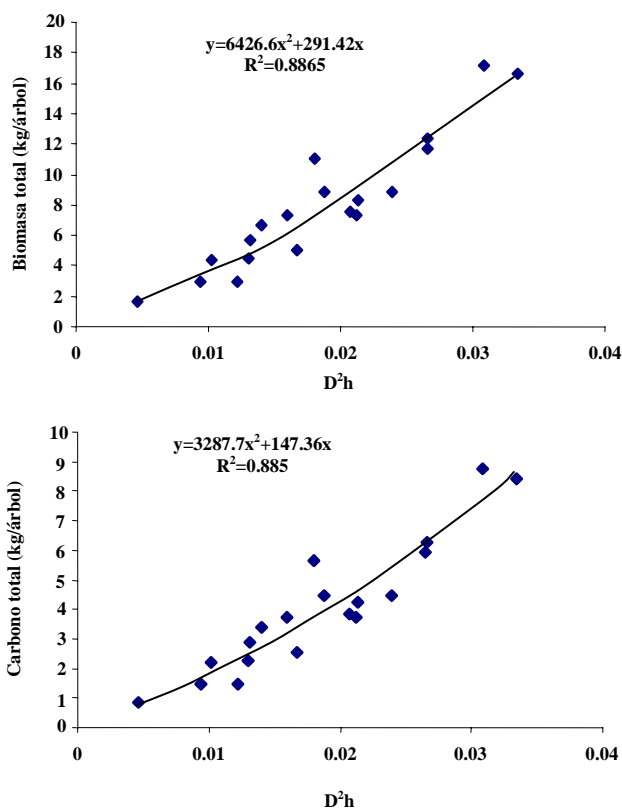


Figura 2. Relación entre biomasa (A) y carbono total (B) con la variable combinada de diámetro y altura (D^2h), para una plantación de *Pinus greggii* de seis años de edad

Las determinaciones de laboratorio indicaron que el contenido de carbono promedio en fuste, ramas y follaje fue de 51 %, el cual es un dato frecuente que se reporta en la literatura (Schlesinger, 1997; Brown, 2002; Joosten *et al.*, 2004).

Con base en la edad de la plantación y la biomasa aérea se estimó un incremento en materia seca de $5.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Este dato es conservador, debido a que no se consideraron las plantas retiradas durante un aclareo en el año 2003.

Con respecto a su potencial de acumulación de carbono, éste resultó ser de 17.9 t ha^{-1} a los seis años de edad. Este último dato se calculó con la biomasa aérea y el contenido de carbono determinado en laboratorio. Al considerar el factor para convertir a dióxido de carbono equivalente (CO_2e ; $44/12=3.67$), la acumulación resultante fue de $65.8 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$. Lo anterior significa que si en los próximos años la plantación lograra capturar una cantidad neta en fuste de $65.8 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$, los créditos por carbono ascenderían a $5000 \text{ pesos ha}^{-1}$, si se aplica un precio conservador de mercado de 80 pesos t^{-1} de CO_2e (Lecocq, 2004).

El peso seco promedio estimado por árbol para *Pinus greggii* resulta moderadamente alto si se compara con el reportado por Castellanos *et al.* (1996), quienes cuantificaron biomasa en una plantación de *Pinus patula* de 15 años de edad; de acuerdo con su ecuación de biomasa, para este experimento se esperaría una biomasa de 8.5 kg/árbol , lo que implica 0.5 kg/árbol más en relación con los datos de este estudio. Sin embargo, *P. patula* es una especie de mayor crecimiento y el trabajo de esos autores se realizó en un ambiente muy favorable para dicha especie.

La biomasa foliar fue ligeramente mayor a la biomasa de ramas, y ambos componentes aportaron de 24 a 25 % de la biomasa total, proporción que es consistente con estudios hechos en plantaciones jóvenes; por ejemplo, Xiao y Ceuleman (2004) registraron proporciones similares para *P. sylvestris* de 10 años de edad. La mayor cantidad de biomasa aérea se concentró en el fuste, como ocurre en plantaciones jóvenes (Helmisaari *et al.*, 2002; Red y Tomé 1998).

La biomasa aérea total fue superior a la de otros estudios. Gayoso *et al.* (2002) reportaron 30.70 y 30.04 t ha^{-1} para *Pinus radiata* y *Pinus ponderosa* de 7 y 8 años de edad, respectivamente; Oleksyn *et al.* (1999) encontraron 33.2 t ha^{-1} para *Pinus sylvestris* de 12 años de edad y 9.4 t ha^{-1} para *Pinus contorta* de 13 años (Litton *et al.*, 2003). Estos datos indican una productividad relativamente alta de *P. greggii*, comparada con otras especies de pino. Según Lieth (1975) y Schlesinger (1997), los bosques más productivos alcanzan valores de $30\,000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, valor inferior al obtenido en esta plantación, de $58\,000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

El contenido de carbono aéreo de esta plantación resultó ser similar a la proporción de 50 % que se maneja en lo general como concentración de carbono en el tejido vegetal (Brown, 1997; Schlesinger, 1997). La cantidad de carbono retenido en la parte aérea, aunque calculado en forma conservadora, refleja un alto potencial de carbono acumulado y, por tanto, una transferencia importante del CO_2 atmosférico.

Lo anterior coincide con el planteamiento de Harmon *et al.* (2000) en el sentido de que las plantaciones jóvenes presentan tasas altas de crecimiento y por ello tienen mayor potencial para la captura de carbono.

En cuanto a la relación entre el contenido de carbono y la biomasa acumulada en los distintos componentes de la planta, los resultados obtenidos sugieren que las altas tasas de crecimiento y fijación de carbono aéreo registradas en esta plantación de *Pinus greggii* mostraron una adecuada combinación entre la producción de madera y celulosa en comparación con otras especies, lo que es útil para la implementación de proyectos de reforestación y secuestro de CO₂ (Gamarra, 2001).

CONCLUSIONES

En seis años, la plantación de *Pinus greggii* acumuló una biomasa aérea de 35.2 t ha⁻¹, que corresponde a una productividad primaria neta de 5.8 t ha⁻¹año⁻¹. Se encontró un modelo matemático de uso práctico que puede predecir la masa de carbono en función de las variables diámetro y altura (D²h), ecuación que tiene un alto grado de ajuste (R² = 0.89).

El potencial de almacenamiento de carbono durante los seis primeros años de la plantación es de 17.9 t ha⁻¹, que corresponde a una acumulación de dióxido de carbono equivalente a 65.8 t ha⁻¹ de CO₂. Las estimaciones de biomasa y carbono mostraron que esta especie puede considerarse una alternativa para el programa de pago por servicios ambientales por captura de carbono y para proyectos de desarrollo limpio en climas templados de México.

BIBLIOGRAFÍA

- Barajas R J E, A Aldrete, J J Vargas H, J López U (2004) La poda química en vivero incrementa la densidad de raíces en árboles jóvenes de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38:545-553.
- Brown S (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a Primer. FAO Forestry Paper 134. 49 p.
- Brown S (2002) Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Env. Poll.* 116:363-372.
- Brown S, A E Lugo (1982) The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14:161-187.
- Burstein J, G Chapela, M J Aguilar, E de León (2002) Informe sobre la propuesta de Pago por Servicios Ambientales en México. Pago por Servicios Ambientales en las Américas. H Rosa, S Kandel (coords). Fundaciones FORD y PRISMA. 102 p.
- Castellanos J F, A Velázquez, J Vargas, C Rodríguez, A M Fierros (1996) Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30:123-128.
- Dvorak W S, J E Kietzka, J K Donahue, G R Hodge, T K Stanger (2000) *Pinus greggii*-overview. In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative. College of Natural Resources, NCSU, Raleigh, NC. USA. pp:53-72.
- Estrada M (2003) Consideraciones sobre el Mecanismo de Desarrollo Limpio en México. Dirección de Cambio Climático. SEMARNAT. 19 p.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (1988) Soil map of the world. Revised legend. World Resources Report 60. Rome, Italy. 138 p.
- Gayoso J, J Guerra, D Alarcón (2002) Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Inventario de biomasa y contabilidad de carbono. FONDEF-Universidad Austral de Chile-INFOR. Valdivia, Chile. 127 p.
- Gamarra J (2001) Estimación de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* LABILL., en Junin, Perú. In: Simposio Internacional "Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales". 18-20 de octubre, 2001. Valdivia, Chile. 21 p.
- García G R, A Gómez G, J López U, J J Vargas H, R Horwath (2004) Tree growth and δ¹³C among population of *Pinus greggii* Engelm. at two contrasting sites in central México. *For. Ecol. Manage.* 198:237-247.
- Hakkila P (1989) Utilization of residual forest biomass. Springer Series in Wood Science. Berlin Heidelberg, New York, Springer-Verlag. 568 p.
- Harmon M E, W K Ferrell, M Heiman (2000) Managing forests after Kyoto. *Science* 289:2058-2059.
- Helmisaari H S, K Mälkonen, S Kellomäki, E Valtonen, E Mälkonen (2002) Below – and –aboveground biomass, production and nitrogen use in scots pine stands in eastern Finland. *For. Ecol. Manage.* 165:317-326.
- Joosten R, J Schumacher, Ch Wirth, A Schulte (2004) Evaluate tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in Western Germany. *For. Ecol. Manage.* 189:87-96
- Lecocq F (2004) State and trends of the Carbon market 2004. A Carbon Finance Product of the World Bank. 38 p.
- Lieth H F H (1975) Primary production of the major vegetation units of the world. In: Primary Productivity of the Biosphere. H Lieth, R H Whittaker (eds). Ecological Studies 14. Springer-Verlag, New York and Berlin. pp:203-215.
- Litton C M, M G Ryan, D B Tinker, D H Knight (2003) Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Can. J. For. Res.* 33:351-363.
- Losi J C, T G Siccamo, R Condit, J E Morales (2003) Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *For. Ecol. Manage.* 184:355-368.
- Oleksyn J, P B Reich, W Chalupka, M G Tjoelker (1999) Differential above- and below-ground biomass accumulation of european *Pinus sylvestris* populations in a 12-year-old provenance experiment. *Scand. J. For. Res.* 14:7-17.
- Red D, M Tomé (1998) Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *For. Ecol. Manage.* 103:21-23.
- Rosa H, S Kandel, L Dimas (2004) Compensación por Servicios Ambientales y Comunidades Rurales. Lecciones de las Américas y Temas Críticos para Fortalecer Estrategias Comunitarias. INESEMARNAT. PRISMA. CCMSS. México. 125 p.
- Schlesinger W H (1997) Biogeochemistry: an Analysis of Global Change. Academic Press, San Diego, CA. USA. 588 p.
- Sheinbaum C, O Maser (2000) Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities: The case of México. *Climatic Change* 47:259-282.
- Xiao Ch W, R Ceuleman (2004) Allometric relationships for below- and aboveground biomass of young Scots pines. *For. Ecol. Manage.* 203:177-186.