

Avances de Investigación

Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica de fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua¹

Alfredo Ruiz²; Muhammad Ibrahim³; Bruno Locatelli³; Hernán J. Andrade⁴; John Beer³

Palabras claves: árboles dispersos; costo de oportunidad; mano de obra; pastos mejorados; pastos nativos; servicios ambientales.

RESUMEN

Se evaluó el almacenamiento de carbono (C) en pastos tradicionales (*Hyparrhenia rufa*, *Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum*) y pastos mejorados (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*), con árboles dispersos y sin ellos (más de 15 especies), y en áreas de regeneración natural (tacotales; edades entre 5-20 años), en el municipio de Matiguás, Nicaragua. El C total almacenado en los tacotales (201 tC ha⁻¹) fue superior al almacenado en pastos con (164-170 tC ha⁻¹) árboles y sin ellos (151-159 tC ha⁻¹). Los sistemas de pasturas mejoradas con árboles maximizan el ingreso (óptimo económico) del productor. El tacotal es el que más C almacena (óptimo ecológico), pero genera bajos ingresos al agricultor. La conversión de la mitad de la finca a un sistema silvopastoril con pasturas mejoradas, y la otra mitad a bosque secundario, puede incrementar el ingreso actual en un 43% y aumentar el almacenamiento de C en 15 tC ha⁻¹. El costo de oportunidad de incrementar el secuestro de C por el desarrollo de las áreas boscosas en las fincas ganaderas osciló entre 3,2 y 26,4 US\$ tC⁻¹. Un cambio de uso del suelo de ganadería extensiva a bosques secundarios puede tener un fuerte impacto negativo en el empleo (-47%). En cambio, transformar los sistemas actuales a pastos mejorados con árboles, con algunas áreas en tacotales, puede tener un impacto positivo en la demanda de trabajo (+74%).

Carbon fixation and storage in silvopastoral systems, and economic competitiveness, in livestock farms in Matiguas, Nicaragua

Key words: dispersed trees; opportunity cost; labour; improved pastures; native pastures; environmental services.

ABSTRACT

Carbon (C) storage was evaluated in traditional pastures (*Hyparrhenia rufa*, *Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum*) and improved pastures (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*), with and without dispersed trees (over 15 species), and in natural regeneration (secondary forest; 5-20 years of age) in the district of Matiguas, Nicaragua. Carbon storage in the secondary forest (201 tC ha⁻¹) was greater than in pasture systems with (164-170 tC ha⁻¹) or without trees (151-159 tC ha⁻¹). The improved pasture system with trees maximizes farmers' revenues (economic optimum), while secondary forests store more C (ecological optimum) but with less revenue to the farmers. Converting 50% of a farm to silvopastoral systems with improved grasses, and the other 50% to secondary forest, could increase actual revenues by up to 43% and at the same time increase C storage by 15 tC ha⁻¹. The opportunity cost of increasing C sequestration by increasing forest areas in livestock farms is between 3.2 and 26.4 US\$ tC⁻¹. A land use change from extensive cattle rising to secondary forests could have a negative impact on employment (-47%). On the other hand, a change to systems with improved grasses and trees, with some areas in natural regeneration, could increase labour demand (+74%).

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas que más contribuye al calentamiento global (IPCC 2001). Se puede mitigar sus efectos almacenándolo en la biomasa vegetal (mediante la fotosíntesis) y en la materia orgánica del suelo derivada de esta fitomasa. Comparados con las pasturas puras, los

sistemas silvopastoriles (SSP) pueden aumentar la fijación de C, y son una alternativa de producción ecológicamente sostenible para las fincas ganaderas (Albrecht y Kandji 2003, Beer *et al.* 2003), ya que ayudan a revertir procesos de degradación muy evidentes en más del 50% de las pasturas

¹ Basado en: Ruiz G, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical. CATIE, Sede Central. Correo electrónico: yuri@ns.uca.edu.ni (autor para correspondencia).

³ Departamento de Agricultura y Agroforestería. CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: mibrahim@catie.ac.cr; bruno.locatelli@cirad.fr (CIRAD-CATIE); jbeer@catie.ac.cr

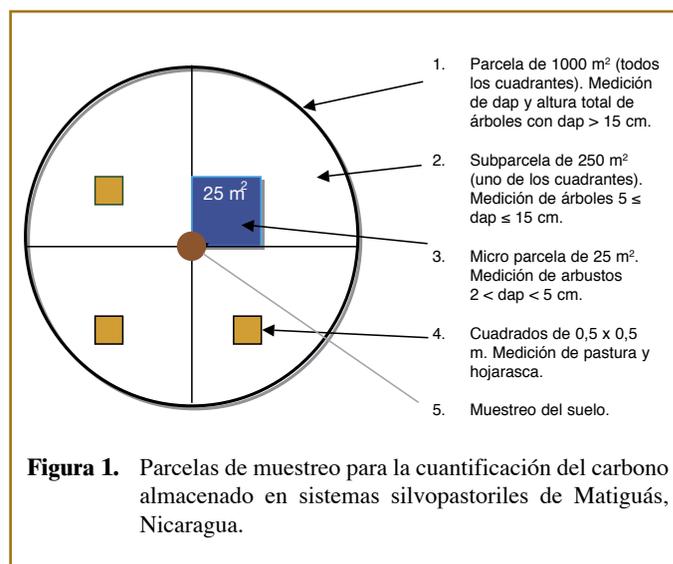
⁴ Candidato doctorado en Agroforestería. CATIE-Universidad de Gales (Bangor). Correo electrónico: handrade@catie.ac.cr

de América Central (Szott *et al.* 2000). Con la ratificación del protocolo de Kyoto (UNFCC 2005), las posibilidades de recibir pagos por servicios ambientales, en este caso por secuestro de carbono, han aumentado y, por ende, la adopción de SSP puede mejorar la competitividad económica de las fincas ganaderas. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad socioeconómica y la capacidad de almacenamiento de C en la biomasa y el suelo de pasturas nativas, pasturas mejoradas, sistemas silvopastoriles y tacotales (regeneración secundaria) en Matiguás, Nicaragua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó entre febrero y agosto del 2002 en 34 fincas privadas, de 10 a 200 ha, en las partes bajas (200-400 msnm) de la microcuenca del Río Bul-Bul, en el municipio de Matiguás, Nicaragua (85°27'N y 12°50'O). Las precipitaciones en la zona oscilan entre 1200 y 1800 mm año⁻¹, con una estación seca entre febrero y abril. La temperatura media anual es de 27 °C.

Se seleccionaron aleatoriamente 34 de 46 fincas ganaderas de la microcuenca, de una base de datos del proyecto GEF-silvopastoril (CATIE-GEF-Banco Mundial; Cuadro 1). En cada finca se identificó, utilizando imágenes de satélite y verificación en el campo, las áreas con pasto natural en monocultivo, pasto mejorado en monocultivo, pasto natural con árboles, pasto mejorado con árboles, y tacotal (regeneración natural; edad entre 5 y 20 años). Para cada sistema de uso del suelo se seleccionó 10 áreas, la mitad con pendiente del terreno < 20% y la otra mitad con > 20% (en total 50 áreas en 35 fincas). En estas áreas, se evaluó la biomasa y el C almacenado en la biomasa arbórea aérea, biomasa de pasturas, C orgánico de suelos y la hojarasca. En los SSP, se emplearon parcelas temporales de muestreo de 1000 m² (Fig. 1). En los tacotales, las parcelas principales fueron de 400 m².



La biomasa arbórea aérea (por encima del suelo) se cuantificó con base en un modelo de biomasa desarrollado en este estudio y en mediciones de árboles en pie en las parcelas de muestreo. El modelo de biomasa se derivó de una base de datos de un muestreo destructivo de 53 árboles, de las mismas parcelas, con dap entre 5 y 85 cm, clasificados en tres grupos (<10, 10-30 y >30 cm). Se seleccionó el mejor modelo (entre 29) usando la altura total (ht) y/o dap como variables independientes. Las especies arbóreas incluidas en este muestreo fueron *Cassia grandis*, *Platymiscium pleiostachyum*, *Albizia saman*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea*. La biomasa de pasturas y de hojarasca se estimó en cuadrantes de 50 x 50 cm (Fig. 1). En pasturas en monocultivo, se muestreó cada 10 m en transectos de 50 m. El C orgánico del suelo se calculó con base en el contenido de materia orgánica y la densidad aparente (MacDicken 1997) en tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60 cm; Ecuación 1). La materia orgánica se estimó mediante al técnica de Walkley y Black (1938) con muestras compuestas, mientras

Cuadro 1. Características básicas de las fincas ganaderas en Matiguás, Nicaragua

Tipo de productores	Número de fincas	Área (ha finca ⁻¹)	Valor de la tierra (US\$ finca ⁻¹)	Capital (US\$ ha ⁻¹)	No. de vacas (animales finca ⁻¹)
Pequeño	21	19±6	4468	61±35	14±9
Mediano	15	60±26	13027	174±184	32±22
Grande	10	128±52	42883	214±210	64±35
Total	46	57±51	15858	133±158	31±28

Fuente: CATIE-Nitlapan, proyecto GEF-silvopastoril (datos sin publicar).

que la densidad aparente se calculó por medio del método del cilindro en el centro de la parcela.

Ecuación 1

$$COS = CO \times da \times P_s$$

Donde:

COS: C orgánico del suelo (t ha⁻¹)

CO: C orgánico en suelo (%; Walkley y Black 1938)

da: Densidad aparente (g cm⁻³)

P_s: Profundidad del suelo (cm)

Se evaluaron los indicadores técnicos productivos (rendimiento de leche, carga animal, precios de la leche) y variables económicas (costos de producción, ingresos netos, costo de oportunidad de incrementar el C en las fincas, impacto de los cambios de uso del suelo en el empleo y el ingreso) de las fincas. El efecto de cada uso del suelo en la economía familiar se calculó con base en un modelo de regresión lineal múltiple, donde las áreas dedicadas a cada uso del suelo son las variables independientes. Se simuló el ingreso esperado y la acumulación de C en nueve escenarios de uso del suelo. El servicio ambiental de almacenamiento de C se valoró mediante el costo de oportunidad de cambios de uso del suelo entre los escenarios estudiados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Almacenamiento de carbono

El C total almacenado en los tacotales (201 tC ha⁻¹) fue mayor que el almacenado en los pastos en monocultivo y en SSP (151-159 y 164-170 tC ha⁻¹, respectivamente; Cuadro 2). Las pasturas mejoradas (*Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum*, *Cynodon dactylon*) no almacenaron más C que los pastos tradicionales (*Hyparrhenia rufa*,

Paspalum notatum y *Paspalum virgatum*). Lo contrario ha sido reportado en las sabanas de América del Sur (Fisher *et al.* 1994, Fisher y Trujillo 1999). López (1998) encontró que el pasto guinea (*P. maximum*) puro almacena más C en el suelo que en asociación con *Cordia alliodora*, debido posiblemente a diferencias de fertilidad del suelo en los distintos sitios comparados (el suelo en pasturas puras presentó mayores contenidos de N). Mora (2001) encontró que los suelos bajo *Cynodon nlemfuensis* almacenan más C que bajo *Pennisetum clandestinum*, y que se almacena más C en suelos bajo pastos a pleno sol que en los casos de asocio con árboles.

Los tacotales almacenaron más C total, debido a la mayor cantidad de C en el mantillo. Más del 80% del total del C almacenado en todos los sistemas se encuentra en los suelos, confirmando los resultados de López (1998), quien encontró el 86% del C del sistema *P. maximum* con *C. alliodora* en el suelo. En contraste, en un bosque o una plantación, la mitad del C del ecosistema se encuentra en la parte aérea (Dixon *et al.* 1995).

Evaluación económica y valoración de servicios ambientales por almacenamiento de carbono

Los sistemas de pasturas mejoradas con árboles constituyen la opción que maximiza el ingreso (óptimo económico). El tacotal es el sistema que más C almacena (óptimo ecológico), pero generó bajos ingresos al productor (Cuadro 3). Al manejar pasturas mejoradas con árboles en toda la finca, se duplica el ingreso esperado respecto a la situación actual, manteniendo el mismo almacenamiento de C. Las pasturas tradicionales con árboles arrojan pérdidas a los ganaderos de la zona de estudio.

Cuadro 2. Carbono (C) almacenado en el pasto, mantillo, árboles y suelos de cuatro sistemas de uso del suelo en Matiguás, Nicaragua

Sistemas	Almacenamiento de C (tC ha ⁻¹)			Total
	Pasto y mantillo	Árboles	Suelo	
PNSA ⁽²⁾	1,4 ± 0,2 c ⁽³⁾	—	150 ± 15 a	151 ± 16 b
PNCA	1,0 ± 0,2 d	8,2 ± 3,0 b	155 ± 13 a	164 ± 14 b
PMSA	1,6 ± 0,2 c	—	158 ± 15 a	159 ± 16 b
PMCA	2,5 ± 0,2 b	12,5 ± 3,5 b	155 ± 15 a	170 ± 16 b
Tacotal	15,6 ± 1,6 a ⁽³⁾	17,5 ± 3,6 a	168 ± 18 a	201 ± 19 a

⁽²⁾ PNSA: pasto nativo sin árboles; PNCA: pasto nativo con árboles; PMSA: pasto mejorado sin árboles; PMCA: pasto mejorado con árboles. ⁽³⁾ Medias en la misma columna seguidas por la misma letra indican que no hay diferencias significativas ($p < 0,05$). ⁽³⁾ Solamente mantillo.

Cuadro 3. Ingreso esperado y C almacenado en fincas ganaderas con diferente distribución de uso del suelo en Matiguás, Nicaragua

Escenarios de uso del suelo	Uso del suelo (% del área total)					Ingreso esperado ⁽⁹⁾ (US\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	C almacenado (tC ha ⁻¹)
	PNSA ⁽²⁾	PNCA	PMSA	PMCA	Tacotal		
1	100					225	151
2		100				-166	164
3			100			222	159
4				100		270	170
5					100	133	201
Situación actual ^(x)	25	17	14	17	27	141	171
Óptimo económico				100		270	170
Óptimo ecológico					100	133	201
Combinación PMSA y tacotal				50	50	201	186

⁽²⁾ PNSA: pasto nativo sin árboles; PNCA: pasto nativo con árboles; PMSA: pasto mejorado sin árboles; PMCA: pasto mejorado con árboles. ⁽⁹⁾ En estos casos, el valor de C no está incluido en los cálculos de ingreso esperado. ^(x) Uso promedio del suelo (%) en las 34 fincas estudiadas.

El costo de oportunidad de incrementar el secuestro de C en una finca en la zona varía según el tipo de productor. Esto se refleja en los niveles de ingresos por tipo, ya que cuanto mayor es el ingreso de una finca, mayor es el costo de oportunidad de cambiar a un sistema que almacene mucho C pero que genera pocos ingresos para el productor. El costo de oportunidad de pasar de la situación actual a otra con más carbono se visualiza como la pendiente entre estos dos puntos (Fig. 2). Si los ingresos de la nueva situación son mucho más bajos que los de la situación actual, hay un costo de oportunidad alto, como en el caso del cambio 5.

A partir del uso del suelo promedio actual, se puede almacenar más carbono con cambios hacia una finca bajo

tacotal (Cambio 1; Fig. 2) con un costo de oportunidad de 0,26 US\$ tC⁻¹ año⁻¹. Ese costo sería diferente si partimos de una situación inicial de pasto mejorado sin árboles, pasto natural sin árboles y pasto mejorado con árboles (2,1; 1,8 y 4,4 US\$ tC⁻¹ año⁻¹, respectivamente). Un cambio de la situación actual a una finca con 50% de tacotal y 50% de pasto mejorado con árboles es una situación “ganar-ganar”, ya que se incrementan al mismo tiempo los ingresos (43%) y el carbono almacenado (9%; Cuadro 3), y el ingreso adicional por carbono sería de 4,2 US\$ tC⁻¹ año⁻¹.

El secuestro de C en tacotales a partir de la situación actual tiene un costo de oportunidad de 0,26 US\$ tC⁻¹ año⁻¹, lo cual equivale a 3,2 US\$ tC⁻¹ por un tiempo infinito, con

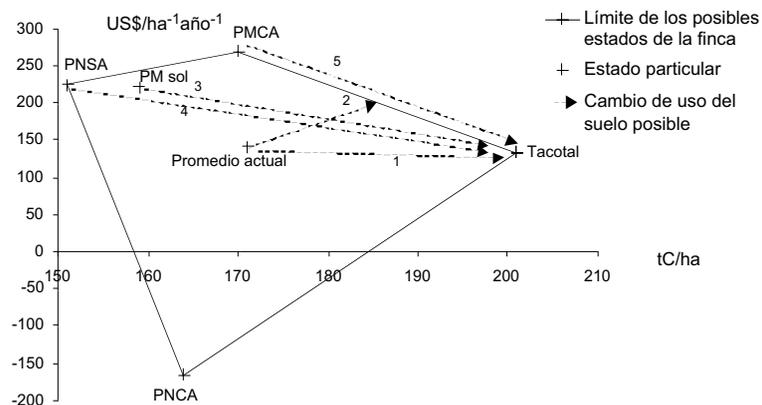


Figura 2. Ingresos esperados y C almacenado en diferentes escenarios de uso del suelo en fincas ganaderas de Matiguás, Nicaragua. PNSA: pasto nativo sin árboles; PNCA: pasto nativo con árboles; PMSA: pasto mejorado sin árboles; PMCA: pasto mejorado con árboles.

Cuadro 4. Empleos generados por el cambio de uso de suelo a pastos mejorados con árboles y tacotales en Matiguás, Nicaragua

Tipo	Familias (no.)	Tamaño de finca (ha)	Tierra total (ha)	Empleos generados por el cambio de uso del suelo (no. de jornales)		
				Actual ⁽²⁾	Árboles con pastos mejorados ⁽³⁾	Tacotal o bosque ⁽³⁾
Asalariados	1000	0	0	0	0	0
Campeños pobres	900	10-30	25000	3124	5000	1785
Campeños agricultores	500	30-70	25000	1250	2500	625
Medianos	200	70-250	32000	773	1454	400
Total	2600		82000	5135	8954	2810

Fuente: Proyecto GEF-silvopastoril.

⁽²⁾ Empleos estimados a partir de una encuesta con productores; ⁽³⁾ estimados con base en el uso de mano de obra en 1 ha de pasto mejorado con árboles;

⁽³⁾ estimados con base en el uso de mano de obra en 1 ha de bosque con fines ambientales.

una tasa de descuento de 8%. Estos costos de secuestro de C son muy inferiores a los precios actuales del servicio de secuestro de carbono, los cuales varían entre 11 y 22 US\$ tC⁻¹ (Lecocq 2004). Igualmente, los costos de secuestro de C en Matiguás resultan muy inferiores a los encontrados en otras valoraciones en bosques tropicales (18,3 - 43,5 US\$ tC⁻¹; Segura 1999).

El cambio de uso del suelo de ganadería extensiva a tacotal puede reducir la demanda de mano de obra en un 47%. Por otro lado, un cambio o mejora de los sistemas actuales hacia uno más intensivo con pastos mejorados y árboles (árboles dispersos en potreros, cercas vivas, tacotales, etc.) representa una situación “ganar-ganar” para el finquero y el ambiente global y puede incrementar la demanda de mano de obra en un 74% (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

Los tacotales almacenaron más C que las pasturas en monocultivo o en sistemas silvopastoriles, debido a mayores reservas de C en el mantillo y el suelo. Sin embargo, los tacotales no son una opción competitiva para los agricultores, por los bajos niveles de ingresos que producen y la pérdida de empleos. Como alternativa, se puede elevar el ingreso en un 43% y almacenar 15 t C ha⁻¹ más si se libera el 50% de la finca para tacotales, al mismo tiempo que se convierte el otro 50% en pastos mejorados con árboles (pastoreo y corte). Este cambio permite alcanzar el doble objetivo del modelo de desarrollo limpio: la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible con beneficios significativos para los productores y para la comunidad. El costo de oportunidad de incrementar el secuestro de C en las



Finca Ganadera con árboles en Matiguás, Nicaragua (foto: A. Ruiz)

fincas ganaderas de Matiguás varió entre 3,2 y 26,4 US\$ t C⁻¹. Este sería el costo para los productores de hacer un cambio desde ganadería extensiva (pasto natural o mejorado sin árboles) a un sistema que maximice el secuestro de carbono manejando la cobertura arbórea. Estos costos se encuentran en el rango de precios actuales del servicio ambiental de secuestro de carbono en el mercado internacional.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Albrecht, A; Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3):15-27.
- Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38): 80-87.
- Dixon, J; Carpenter, R; Fallón, L; Sherman, P. 1995. Economic analysis of the environmental impacts of development projects. London, UK, Asian Development Bank. 210 p.
- Fischer, MJ; Rao, IM; Ayarza, MA; Lascano, CE; Saenz, JI; Thomas, JR; Vara, RR. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American Savannas. *Nature* 371:236-238.
- _____; Trujillo, W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. *In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales.* (1999, Turrialba, Costa Rica). Turrialba, CR, FAO - CATIE, SIDE. p.115 -135.
- IPCC. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 881 p.
- López, A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 50 p.
- Lecocq, F. 2004. *State and Trends of the Carbon Market 2004.* World Bank, Carbon Finance Business Team, Washington DC, 31 p.
- MacDicken, K. 1997. *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects.* Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- Mora, V. 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 92 p.
- Segura, M. 1999. Valoración del servicio de almacenamiento y fijación de carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 119 p.
- Szott, L; Ibrahim, M; Beer, J. 2000. The hamburger connection hang-over: cattle, pasture land degradation and alternative land use in Central America. Turrialba, CR, CATIE. 71 p. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 313).
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2005. Status of ratification of Kyoto Protocol (en línea). Disponible en http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php.
- Walkley, A; Black, CA. 1938. An examination of the Degtajareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38.