

SECUESTRO DE CARBONO POR SISTEMAS AGROFORESTALES EN VERACRUZ

D. CALLO-CONCHA A.*, I. RAJAGOPHAL B.**, L. KRISHNAMURTHY C.***

Los regímenes climáticos, hasta no hace mucho considerados regulares, determinan las actividades humanas a toda escala demográfica, las variaciones en su homeostasis son consideradas, por tanto, factores de riesgo. Sus patrones de conducta son función de la composición y propiedades físico-químicas de la atmósfera, al alterarse éstas se ve afectada su función principal: proteger y mantener la sostenibilidad de la biosfera.^{1,2}

Es esto, precisamente, lo que ha venido sucediendo (cambio climático), la acumulación de gases de efecto de invernadero (GEI) ha generado el llamado «calentamiento global», la temperatura media planetaria es mayor en 0,5°C a la media del siglo pasado, los años más calientes de la historia se han concentrado en los últimos 20, y los referentes históricos son cada vez más inútiles.^{3,4}

Justificación

¿Qué hacer? Esquemáticamente son sólo dos las medidas posibles: reducir las emisiones y recapturarlas. Dentro de lo primero, las negociaciones no han satisfecho expectativas, a siete años de su declaración, el Protocolo de Kyoto permanece sin ser ratificado; mientras que en lo segundo, el secuestro de carbono, sustentado en el intercambio gaseoso de los vegetales, emerge como una fuerte opción, aun cuando está claro que en algunos sistemas de mayor densidad –como los bosques húmedos y selvas tropicales– surge con mayor vigor.⁵

Los sistemas de uso de la tierra (SUT's), groseramente ganadero, agrícola y forestal, son recipientes de carbono al involucrar entre sus componentes a vegetales, pero difieren entre sí y de los demás por su orientación y gestión antropógena, lo mismo que en su grado de acumulación. La agroforestería, como paradigma tecno-productivo, versátil y polifuncional, que integra imprescindiblemente al componente leñoso -mayor recipiente potencial-, sería entonces una opción de uso de la tierra especialmente atractiva.^{6,3,7}

La idea de negociar cuotas de emisión a diversas escalas (mercados de carbono) es una propuesta de creciente aceptación y su formalización es inminente. Así pues, la etapa sucesiva corresponde a la nominación de los sistemas de producción más eficientes para secuestrar carbono y para la definición de métodos de cuantificación precisos.⁸

Objetivo

Durante un ciclo de producción, estimar los volúmenes, proporciones y dinámica de captura de carbono atmosférico por sistemas agroforestales (SAF's) locales.

* M.C. Investigador asistente. Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). dancacon@mail.com

** Estudiante de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.

*** Director del Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.

Metodología

Descrita por Woormer y Palm⁹ y modificada por Palm, Hariah y van Noordwijk,¹⁰ considera la medición de los mayores recipientes de carbono: biomasa y suelo, fragmentando el muestreo del primero en: arbóreo, arbustivo, herbáceo y hojarasca; y el segundo en cuatro estratos de hasta un metro de profundidad.

La biomasa arbórea se estimó por inferencia de sus principales medidas biométricas: altura (H) o largo (L), diámetro a la altura del pecho (DAP) y constantes específicas (a,b).¹¹ Se aplicó el modelo alométrico $BA = 0.1184 DAP^{2.53}$ para árboles vivos y muertos en pie,^{12, 13, 14, 15, 16, 17} para árboles caídos muertos el modelo: $BAC = 0.4 DAP^2 L 0.25 P$;^{16,17} y el modelo $BB = \{a + b(\ln H/H)^2\}^{1/2}$ para bananos.¹⁸ El cálculo de la biomasa arbustiva, herbácea y hojarasca se hizo por extrapolación simple de las superficies evaluadas (1 m² y 0.25 m²).¹⁷ En todos los casos el contenido de carbono es una función constante proporcional a la biomasa: 0.45.

En el suelo se determinó a partir de la densidad aparente, la que se calculó usando cilindros Uhland y extrapolación simple. El contenido de carbono orgánico se evaluó usando el método de Nelson & Sommers, sostenido en la siguiente reacción: $2Cr_2O_7^{2-} + 3C^0 + 16H^+ = 4Cr^{3+} + 3CO_2 + 8H_2O$.¹⁹

La localidad correspondió a los municipios de

Martínez de la Torre y Tlapacoyan en Veracruz, por ser un espacio representativo de los sistemas agroforestales requeridos. Biofísicamente, se encuentra a una altura media de 1 200 m, con una temperatura media anual de 22°C y lluvias durante todo el año, el período invernal es superior en 10.2% al acumulado, que es de 1570 mm año.^{1,20, 21}

Los tratamientos, los sistemas agroforestales (SAF's) locales que involucren como componente principal o secundario árboles de especies citrícolas y satisfagan los criterios culturales, económicos y técnicos locales, además de sistemas parámetro, éstos fueron: a. Cítricos + plátano (Ci+Pl), b. Cítricos + café (Ci+Cf), c. Cítricos + café + plátano (Ci+Cf+Pl), d. Cítricos + pelibuey (Ci+Pe), e. Cítricos + cobertura (Ci+Co), f. Pastura (P).

Diseño experimental, BCR con control de repeticiones. Resultados y discusión

Carbono arbóreo.* La prueba de DMS define dos estratos fundamentales: el primero compuesto por Ci+Pe, Ci+Cf+Pl, Ci+Cf, Ci+Pl y Ci+Co por un lado, con cierta ventaja a favor de Ci+Pe y desmedro de Ci+Co; y el segundo estrato considera solamente al testigo P, por debajo de todos los demás (figura 1).

Tabla I. Carbono acumulado por sistema y fuente (t ha⁻¹)

| Componente | Sistemas de uso de la tierra evaluados ⁰ | | | | | | |
|------------|---|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | n | Sistemas agroforestales | | | | | Parámetro |
| | | Ci+Cf | Ci+Pl | Ci+Cf+Pl | Ci+Co | Ci+Pe | P |
| Arbóreo | Rango | 39.2-72.9 | 30.0-56.9 | 41.8-76.4 | 37.2-41.8 | 61.8-93.4 | 0.0-0.0 |
| CV=31.08 | s | 16.45 | 14.97 | 17.87 | 3.36 | 17.43 | 0.0 |
| DMS=26.26 | δ | 56.59ab | 47.26ab | 61.65ab | 39.74b | 73.38a | 0.0c |
| Herbáceo | Rango | 0.09-0.18 | 0.0-0.0 | 0.07-0.16 | 0.16-0.17 | 0.04-0.15 | 0.22-0.98 |
| CV=91.21 | s | 0.044 | 0 | 0.046 | 0.006 | 0.058 | 0.383 |
| DMS=0.305 | x | 0.144b | 0b | 0.115b | 0.161b | 0.109b | 0.571a |
| Hojarasca | Rango | 1.14-1.37 | 1.74-2.64 | 0.89-1.92 | 0.51-1.13 | 1.1-2.15 | 0.82-1.58 |
| CV=28.20 | s | 0.124 | 0.453 | 0.518 | 0.338 | 0.528 | 0.379 |
| DMS=0.71 | x | 1.223bc | 2.155a | 1.438bc | 0.739c | 1.603ab | 1.185bc |
| Total | Rango | 40.5-73.2 | 32.6-59.0 | 43.4-77.3 | 37.9-44.8 | 63.4-94.7 | 1.4-2.1 |
| CV=27.72 | s | 16.47 | 14.57 | 17.69 | 3.68 | 17.07 | 0.35 |
| DMS=29.75 | x | 57.96ab | 49.42ab | 63.2ab | 40.64b | 75.09a | 1.76c |

¶ Promedios seguidos de la misma letra en cada columna no son diferentes estadísticamente (DMS p > 0,05)

⁰ Sistemas evaluados: Ci+Cf = Cítricos + café, Ci+Pl = Cítricos + plátano, Ci+Cf+Pl = Cítricos + café + plátano, Ci+Pe = Cítricos + pelibuey, Ci+Co = Cítricos + cobertura, P = Pastura.

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CV = Coeficiente de Varianza; s = Desviación estándar; n = Media aritmética.

* Incorporamos dentro del concepto "biomasa arbórea" la que corresponde a los bananos, esta decisión se debe más a la función que desempeña en el sistema que a sus características estructurales.

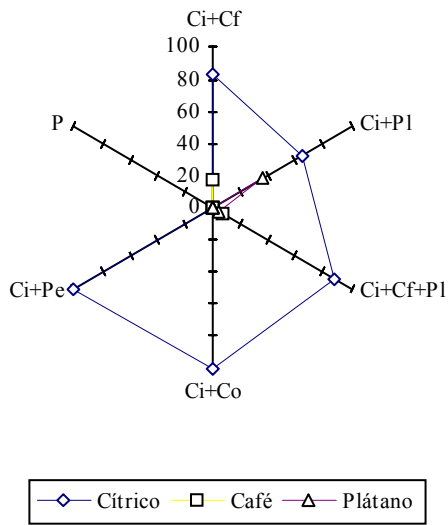


Fig. 1. Porcentaje de aporte de carbono arbóreo por cítricos.

La metodología de estimación considera como individuos a los tallos (troncos) y no los individuos completos (más ramas, hojas, raíces, etc.), lo que se valida por la alta correlación entre la biomasa total y tallos entre 79 y 99%, en comparación a la de biomasa e individuos: de 53 a 90%. En consecuencia, para el establecimiento de la línea base (momento cero de mediciones) en SAF's, debe tomarse en cuenta, además de la fecha de instalación y densidad de plantación, las actividades de gestión: raleo, poda y desahije (frecuencia y presión).

En los sistemas evaluados que involucran la participación de varios componentes perennes, entre el 65 y el 88% del carbono arbóreo corresponde a los

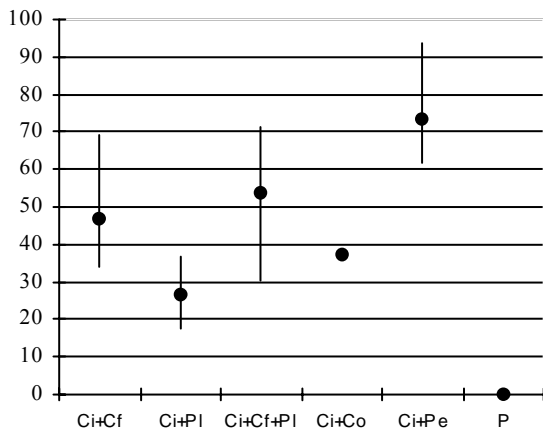


Fig. 2. Rango de aporte de carbono arbóreo por cítricos (t/ha)

cítricos (tabla I), luego existe una variación de los aportes por sistema y dentro de cada sistema (figura 2), lo que además incrementa la varianza en los volúmenes finales de carbono de cada sistema.

En el contenido de biomasa es importante también la densidad del tejido vegetal; en los sistemas que involucran bananos, a pesar de tener un alto grado de interceptación solar e hídrica, e índices de conversión elevados, su valor ponderado tiende a disminuir en función al número de componentes y complejidad del sistema.

El ajuste entre la edad de los árboles y la biomasa acumulada es más determinante que entre la biomasa y la densidad de la plantación. De ahí que las silvopasturas dentro de la racionalidad de uso del suelo, suelen ser la última etapa –o residual inclusive- de los sistemas intensivos, además de que los árboles deben alcanzar cierta madurez para tolerar el maltrato por el ganado. Es por ello que el carbono arbóreo, no siendo denso, se aporta relevantemente por la edad y biomasa de los árboles.

Los tres factores cruciales que afectan las estimaciones finales del componente arbóreo son: los patrones de crecimiento, la dinámica de regeneración y la emergencia múltiple; en el caso de los cítricos el primero es el más importante, para el café el último y para los bananos el segundo.

Carbono herbáceo. Con una significancia estadística del 95% los tratamientos Ci+Cf, Ci+Pl, Ci+Cf+Pl, Ci+Co y Ci+Pe son iguales entre sí e inferiores al testigo P. Siendo el carbono acumulado función exclusiva del estrato herbáceo, el sistema pastura que se enfoca a éste, es superior a los demás tratamientos en el orden de tres a cinco veces.

En tres de los demás casos: Ci+Cf, Ci+Cf+Pl y Ci+Pe, se trata de remanentes controlados por actividades antrópicas, malezas o eventualmente, especies de aprovechamiento marginal. Para Ci+Co, si bien se promueve la presencia de *Arachis sp.*, su densidad y crecimiento son controladas por pastoreo, de ahí su elevada estabilidad ($S = 0.006 \text{ t ha}^{-1}$).

Como fuera, el aporte herbáceo al consolidado es marginal, de 0.15 al 0,39% descontando el testigo pastura (P) en el que alcanza el 34.22%; además es muy voluble y efímero, se pierde rápidamente por ciclos de pastoreo.

Carbono hojarasca. Se definen tres estratos de similitud estadística, el primero Ci+Pl y Ci+Pe, y el tercero Ci+Cf, Ci+Cf+Pl, Ci+Co y el testigo P, entre ambos, uno intermedio compuesto por Ci+Pe, Ci+Cf, Ci+Cf+Pl y Ci+Co.

Los SAF's que involucran plátanos son considerablemente más altos en su participación de hojarasca y menores en los de biomasa herbácea; esto es debido al control de la cobertura en los estratos: alto –por los patrones de crecimiento y morfología– y bajo –por la alta defoliación.

Carbono total. El patrón de acumulación y distribución para el carbono total reitera el del carbono arbóreo, lo que es ratificado por la alta correlación entre uno y otro ($r=0,99$). En consecuencia su significancia e interpretación estadística es similar.

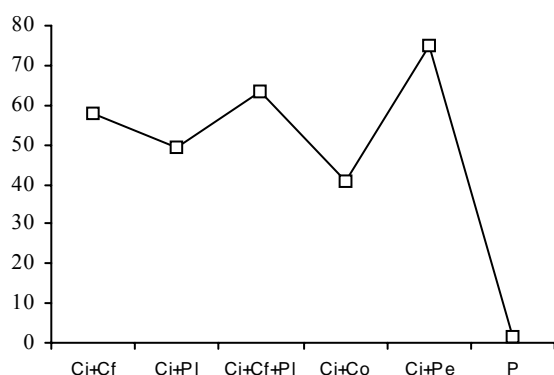


Fig. 3. Carbono total (t/ha).

Queda pendiente aún el asunto de la divergencia de salidas por los modelos alométricos empleados; a nivel de individuo, la generación y adecuación de modelos locales para el género de mayor peso relativo. Un avance también debe ser el ajuste de los modelos para bananos.²²

Por el carácter estático de esta investigación sólo es posible dar atisbos preliminares a la dinámica de variación del carbono en los sistemas evaluados (tasas de acumulación).²³

El mayor aporte de carbono total lo genera la biomasa arbórea. En cuatro de los cinco sistemas evaluados (exceptuando el testigo) su aporte varía entre 95.74 y 97.78%.

Correlaciones. Existe un ajuste del 99% entre el carbono arbóreo y el total, lo cual subraya la dependencia del segundo ante el primero. Hay también una proporcionalidad inversa de alrededor del 65% entre los volúmenes de carbono herbáceo vs. los arbóreos y el total, los cuales se justifican por la competencia principalmente por luz. En todos los demás casos la correlación es no significativa.

Conclusión

Los stocks de carbono no varían significativamente

en los sistemas de uso de la tierra evaluados; el estrato en el que debe concentrarse la gestión es el arbóreo y dentro de éste el de cítricos, de mayor aporte relativo, mayor dinámica de variación y mayor factibilidad de gestión antropógena.

Las consideraciones para entender los SAF's como sumideros deben reformularse en el marco de LULUCF (uso actual, cambio de uso de la tierra y silvicultura), para ello deben satisfacerse algunas cuestiones: recabar datos sobre el establecimiento (línea base), dinámica de acumulación, actividades de gestión (frecuencia y presión) para salvar el requisito de "adicionalidad". Debemos subrayar que estos estudios en las primeras etapas y en su retroalimentación en tres niveles de estimación: individuo, sistema y paisaje son imprescindibles para lograr confiabilidad.

Resumen

En la zona citrícola de Veracruz comparamos la capacidad de secuestro de carbono de tres sumideros: arbóreo, herbáceo y hojarasca, de los sistemas agroforestales de mayor importancia biofísica y socioeconómica: Cítricos+plátano, cítricos + café + plátano, cítricos+café, Cítricos+pelibuey, Cítricos+cobertura y el control pastura. Usamos un BCR con control de repeticiones.

Sume más carbono arbóreo Ci+Pe con 73.38 t C ha⁻¹ y menos P con 0.0, no existe diferencia estadística ($p<0.05$) entre los demás sistemas. Como sumidero herbáceo, P es superior ($p<0.05$). Y más hojarasca Ci+PI y Ci+Pe ($p<0.05$). Existe un ajuste del 99% entre la sumatoria de aportes y el arbóreo. Y los aportes de los sumideros inferiores, a excepción de P, oscilan entre 2 y 5%.

Palabras clave: Sistemas agroforestales, Sistemas de uso de la tierra, Secuestro de carbono, Cítricos.

Abstract

In the citrus zone production of Veracruz we compared the ability for sequester carbon in three strata drains (trees, shrubs and litter), of the most important agroforestry systems: Citrus+banana, Citrus+coffee, Citrus+coffee+banana, Citrus+goat, Citrus+covering, and the control Pasture. The design used was a Completely Randomized Blocks with control of repetitions.

Capture more arboreal carbon Ci+Goat: 73.38

tCha⁻¹, and less P with 0.0, does not exist statistical difference ($p < 0.05$) among the other systems. Like herbaceous drain, P is superior ($p < 0.05$), and in litter Ci+Banana and Ci+Goat ($p < 0.05$). Exist an adjustment of 99% in the sum of contributions and the arboreal. The contributions of the inferior drains, with the exception of P, oscillate between 2 and 5%.

Keywords: Agroforestry systems, Land use systems, Carbon sequestration, Citrus.

Referencias

1. UNEP, GEMS. 1992. Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). Sánchez-Vélez A. y Gerón D., X. Traductores. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 41 p.
2. IUCC, PNUMA. 1995. Para comprender el cambio climático: guía elemental de la Convención Marco de las Naciones Unidas. Oficina de Información sobre el Cambio Climático. Oficina Suiza del Medio Ambiente de Bosques y Paisajes. Chatelaine, Suiza. 20 p.
3. IPCC. 1995. Segunda evaluación, Cambio Climático 1995. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Organización Mundial de Meteorología. 71 p.
4. IPCC, Julio 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/pub.spm22-01.pdf>
5. Callo-Concha, D. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. Tesis de Maestría. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 72 p.
6. Nair, P.K.R. 1997. Agroforestería. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 543 p.
7. Krishnamurthy, L. y M. Avila. 1999. Agroforestería Básica. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México DF., México. pp: 29-36.
8. Callo-Concha, D. y L. Krishnamurthy. Abril 2002. Agroforestería y Secuestro de Carbono Estado de arte. Memorias V Congreso Nacional Agronómico: Gestión de Sistemas Agrícolas Sostenibles. Departamento de Fitotecnia y Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp. 71-79.
9. Woomer, P.L. and C.A. Palm. 1993. Shifting Cultivation Effects on Tropical Soil Organic Matter. Experimental Protocol prepared for the Global Initiative for Alternatives to Slash and Burn Agriculture. Tropical Soil Biology and Fertility Programme. Nairobi, Kenya. Mimeografiado 35 p.
10. Palm, C.A., K. Hariah y M. van Noordwijk. 1999. Muestreo revisado de carbono para ASB. Mimeografiado. Documento de trabajo. 7 p.
11. CIFOR, CATIE, BID, EMBRAPA, UCA. 1998. Protocolo de Levantamiento de vegetación en bosques secundarios. Proyecto de investigación, Manejo de bosques secundarios en América Tropical. 16 p.
12. Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO Forestry paper, 134. Food and Agriculture Organization. Caracalla, Rome, Italy. pp: 1-18.
13. Fujisaka, S., C. Castilla, G. Escobar, V. Rodrigues, E. Veneklaas, R. Thomas, M. Fisher. 1997. Impacts of forest conversion: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. Centro Internacional de Agricultura Tropical, International Centre for Research in Agroforestry, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria. 22 p.
14. Barbarán G., J. 1998. Determinación de biomasa y carbono en los principales sistema de uso del suelo en la zona de Campo Verde. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. 54 p.
15. Palm, C.A., P.L. Woomer, J. Alegre, L. Arévalo, C. Castilla, D.G. Cordeiro, B. Feigl, K. Hairiah, J. Kotto-Same, A. Mendes, A. Moukam, D. Murdiyarso, R. Njomganag, W.J. Parton, A. Ricse, V. Rodrigues, S.M. Sitompul, and M. van Noordwijk. 1999. Carbon Sequestration and Trace Emissions in Slash and Burn and alternative Land Uses in the Humid Tropics. ASB Climate Change working group report, Final report, Phase 2. 27 p.
16. Ceijas T., E. 1999. Almacenamiento de carbono en bosques tropicales secundarios de la zona

- de Alexander Von Humboldt–Pucallpa. Proyecto de tesis, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. pp: 4-15.
17. Palm, C.A., L. Arévalo. Sept 9. 2000. Comunicación electrónica. Carbon Stock Pucallpa. 1 p.
 18. Márquez, L. (Editora). 2000. Elementos Técnicos para Inventarios de Carbono en Uso del Suelo. Fundación Solar. Guatemala. 35 p.
 19. Anderson, J.M., and J.S.I. Ingram. 1993. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. CAB International. Wallingford, Oxon, England.
 20. Brown, S. 2001. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18-20 de octubre. Facultad de Ciencias Forestales; Universidad Austral de Chile; Fondo de fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico; Fundación para la Innovación Agraria. CD-ROM. Valdivia, Chile.
 21. Escobar, R. H. 1999. Diseño y manejo de una tecnología silvopastoril (producción de conejo con forrajes de leguminosas) para pequeños productores en el trópico. Tesis de Maestría. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 154 p.
 22. Guadarrama, A. A. 2000. Diseño de tecnología silvopastoril asociando ovinos de pelo a plantaciones cítricas en Veracruz. Tesis de Maestría. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 72 p.
 23. Van Noordwijk, M. And Mulia, Rachmat. 2000. Functional Branch Analysis as tool for scaling above and belowground trees and their litterfall (in press). 14 p.
 24. C.A. Palm *et al.* s/f. Carbon Sequestration and Trace Gas Emissions in Slash and Burn Alternative Land Uses in the Humid Tropics. ASB Climate Change Working Group Report, Final Report, Phase 2. (Working document).