

## Artículos invitados

# Cuantificación del carbono radicular de *Erythrina poeppigiana* de cuatro y diez años establecidos en callejones en Costa Rica<sup>1</sup>

Maren Oelbermann<sup>2</sup>; Paul Voroney<sup>3</sup>; Andrea Schlönvoigt<sup>4</sup>

**Palabras claves:** carbono del suelo; distribución radicular; materia orgánica; secuestro de carbono.

### RESUMEN

La producción primaria neta anual de las raíces puede ser una contribución importante a la dotación de carbón (C) orgánico del suelo, gracias a la exudación y renovación de raíces finas. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el C radicular y los incrementos anuales de C radicular en árboles de *Erythrina poeppigiana* de diez y cuatro años en un sistema de cultivo en callejones. El C total de las raíces gruesas (d >5 mm) de *E. poeppigiana*, hasta 60 cm de profundidad, fue de 4527 y 3667 kg ha<sup>-1</sup>, con la asignación del 9 y el 22% del C total del árbol al sistema radicular para árboles de diez y cuatro años, respectivamente. Los árboles de diez años tuvieron el mayor incremento de C en raíces (240 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) entre 0-20 cm; para los árboles de cuatro años fue entre 20-40 cm (510 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). La mayor proporción de C en raíces en los 0-20 cm superiores, en el caso de los árboles más viejos, podría deberse a que en el momento de su plantación el suelo era pobre en nutrientes, lo cual hizo que las raíces exploraran las capas superiores del suelo. Cuando se plantaron los árboles más jóvenes, el suelo ya no era tan pobre, debido a los aportes de residuos de podas de árboles y de los cultivos, permitiendo a las raíces la explotación de capas más profundas (20-40 cm). La competencia entre árboles ya establecidos y árboles nuevos también puede haber contribuido a esta diferencia.

**Quantification of carbon in roots of four and ten year old *Erythrina poeppigiana* in alley cropping in Costa Rica**

**Key words:** Carbon sequestration; organic matter; soil carbon; root distribution.

### ABSTRACT

Total structural root C (d >5 mm) of *Erythrina poeppigiana* in a Costa Rican alley cropping system, to 60 cm depth, was 4527 and 3667 kg ha<sup>-1</sup> with 9 and 22% of total tree C allocated to the root system for ten and four year old trees, respectively. Ten year old trees had the highest C increment in roots (240 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) in the top 20 cm of the soil while for four year old trees this occurred at depths of 20-40 cm (510 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). The larger proportion of root C in the top 20 cm, for the ten year old trees, may have occurred because at the time of tree planting, soils were nutrient poor, causing tree roots to explore upper soil horizons. At the time of planting younger trees, soils were more fertile because of the contributions of residues from tree pruning and from crops, allowing roots to exploit lower soil horizons (20-40 cm). Competition between roots of established trees with recently planted trees may also explain this result.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas radiculares constituyen la interfase entre la planta y el suelo. La producción primaria neta anual de las raíces puede ser una contribución importante a

la dotación de carbón (C) orgánico del suelo, gracias a la exudación y renovación de raíces finas (Balesdent y Balabane 1996). Yamoah *et al.* (1986), Schroth y

<sup>1</sup> Basado en: Oelbermann, M. 2002. Linking carbon inputs to sustainable agriculture in Canadian and Costa Rican Agroforestry Systems. Ph.D. Thesis, Department of Land Resource Science, University of Guelph, Canada. Traducido por Gabriela Gitli, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

<sup>2</sup> Ph.D. en Agroforestería Tropical. University of Waterloo, Waterloo, ON N2L 3G1. Correo electrónico: moelberm@sciborg.uwaterloo.ca (autora para correspondencia).

<sup>3</sup> Ph.D. Department of Land Resource Science. University of Guelph. Guelph, ON N1G 2W1 Correo electrónico: pvoroney@uoguelph.ca

<sup>4</sup> Ph.D. GFA Terra Systems, Latin America Division, Eulenkugstrasse 82, 22359 Hamburg, Germany. Correo electrónico: andrea\_schlonvoigt@yahoo.de

Lehmann (1995) y Gale *et al.* (2000) sugieren que el aporte del C de las raíces afecta la circulación del C y el N en el suelo. Aunque se ha reconocido la importancia de estudiar las raíces en los sistemas agroforestales (SAF), la cuantificación de su contribución a la biomasa y el C en el suelo ha sido limitada (Huxley 1999, Gray 2000). Por ejemplo, las raíces pueden contribuir de un 30 a un 70% del total de la producción de biomasa en bosques y plantaciones forestales (Fogel 1993), y de un 15 a un 30% en los SAF (Young 1997). Atkinson (1996) sugirió que la asignación debajo de la superficie puede alcanzar hasta 10 a 15 Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, pero que la ausencia de información sobre los sistemas radiculares impide el diseño óptimo de SAF.

Los sistemas radiculares de los árboles pueden influir positivamente en los suelos agrícolas y los cultivos, porque interceptan la lixiviación de nutrientes, promueven una mejora física de las capas compactas del suelo y crean macroporos que conducen a una mejor infiltración del agua (Schroth y Lehmann 1995, Schroth *et al.* 1996, Schroth 1996, 1999). Los árboles con raíces profundas pueden alcanzar los recursos que yacen en capas más profundas del suelo, que no están disponibles para los cultivos (Schroth 1999). Las raíces arbóreas estabilizan el suelo, reduciendo también la pérdida de nutrientes por la erosión (Young 1997).

Sin embargo, existen también efectos competitivos entre las raíces de árboles y cultivos. Se han observado rendimientos disminuidos de las cosechas —particularmente cerca de los árboles—, los cuales han sido atribuidos a la competencia por la luz disponible encima de la superficie (van Noordwijk *et al.* 1996, Young 1997) y la competencia por nutrientes y agua debajo de ella (van Noordwijk *et al.* 1995, 1996, Jose *et al.* 2000). Las características de las raíces de los árboles deberían ser uno de los criterios para tomar en cuenta al seleccionar las especies arbóreas para el establecimiento de SAF (Schroth 1995).

Gran parte de la investigación agroforestal relacionada con las raíces comenzó apenas en los años 90 (Schroth 1995, Atkinson 1996, van Noordwijk *et al.* 1996), sin duda debido a las complejidades del *continuum* raíz-suelo. En la actualidad, ningún estudio ha cuantificado la biomasa radicular y la dinámica del C en las raíces, o el potencial que estas tienen para acumular C en el largo plazo, en cultivos en callejones que utilizan árboles de *Erythrina poeppigiana*. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el C radicular y los incrementos anuales de C radicular

en árboles de *E. poeppigiana* de diez y cuatro años en un sistema de cultivo en callejones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del estudio

El estudio se llevó a cabo en La Montaña, CATIE, Turrialba, Costa Rica (9°53'N, 88°38'O; 602 msnm). La zona tiene una temperatura promedio anual de 21,7 °C y una precipitación promedio anual de 2648 mm, con 246 días de lluvia al año. Los suelos de La Montaña son isohipertérmicos Eutric Cambisoles, con una textura arcillosa-limosa (25% arena, 34% limo, 41% arcilla) (Kass *et al.* 1995).

El experimento de cultivos en callejones se estableció en 1991, para evaluar la agroeconomía de rotaciones maíz-frijol intercalados con *E. poeppigiana* (clon CATIE 2708, reproducido a partir de estacas) (Chesney 2000). Los árboles originales fueron plantados con un espaciamiento de 6 m entre filas y 2 m dentro de ellas; es decir, con una densidad de 833 árboles ha<sup>-1</sup>. En 1997, el enfoque de la investigación cambió de solo granos básicos a una rotación de maíz-tomate, donde *E. poeppigiana* proveyó el soporte físico para los tomates. Esto condujo a ajustes del diseño experimental; se redujo el ancho del callejón a 3 m mediante la plantación de estacas adicionales de *E. poeppigiana* entre las ya existentes, lo cual resultó en una densidad total de 1667 árboles ha<sup>-1</sup> (833 árboles ha<sup>-1</sup>, tanto de cuatro como de diez años, en el momento de este estudio).

La poda total de brotes de *E. poeppigiana* comenzó a principios de 1992 y se hizo cada dos años hasta 1995; sin embargo, en 1996 y 1997 los árboles se podaron anualmente. Entre 1995 y 1997, las raíces de los árboles originales se podaron con un arado de disco hasta una profundidad de 25 cm, a una distancia de 50 cm de la fila de los árboles. Entre enero de 1999 y mayo del 2000, se podaron los árboles y las ramas tres veces al año, con dos podas completas y una parcial, utilizando los árboles como estacas vivas para dos cosechas de tomate por año (Chesney 2000). No se aplicaron fertilizantes minerales a partir de 1991 y los rastrojos de las podas se han utilizado como cobertura y abono verde.

### Métodos de muestreo de raíces

En mayo de 2001, se muestrearon las raíces gruesas de tres árboles de *E. poeppigiana* de diez y tres de cuatro años de edad (un árbol en cada parcela de tres repeticiones). Para evitar los efectos de borde, se muestrearon destructivamente solo árboles del centro de las parcelas

(parcelas de 24 x 16 m). Las raíces se muestrearon en un área seleccionada al azar alrededor del árbol, que representaba un cuarto del área correspondiente a cada árbol; es decir, un área de muestreo de 1,5 m<sup>2</sup> (1,5 m hacia el callejón de cultivo y 1,0 m en la hilera de árboles), hasta 60 cm de profundidad. Los resultados fueron multiplicados por cuatro para determinar la biomasa radicular estructural total por árbol, asumiendo una distribución radicular homogénea.



Las raíces de los árboles de *Erythrina poeppigiana* se muestrearon en un área seleccionada al azar alrededor del árbol, representativa de un cuarto del área correspondiente a cada árbol (foto: Maren Oelbermann).

La biomasa arbórea sobre el nivel del suelo se removió primero mediante la separación de los componentes arbóreos en tronco, ramas y hojas. Previo a la excavación de raíces, se cavó una zanja de 0,3 de ancho y 0,7 m de profundidad alrededor del área de 1,5 m<sup>2</sup> (Böhm 1979). Las capas del suelo a 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad se excavaron por separado y tamizaron con una malla de 5 mm. Se lavaron las raíces para eliminar la tierra y se secaron al sol para remover cualquier exceso de agua acumulado durante el proceso de lavado, y se determinó su peso.

Se secaron las submuestras ( $n = 9$ ; es decir, tres árboles en cada una de las tres parcelas) de 500 g de cada com-

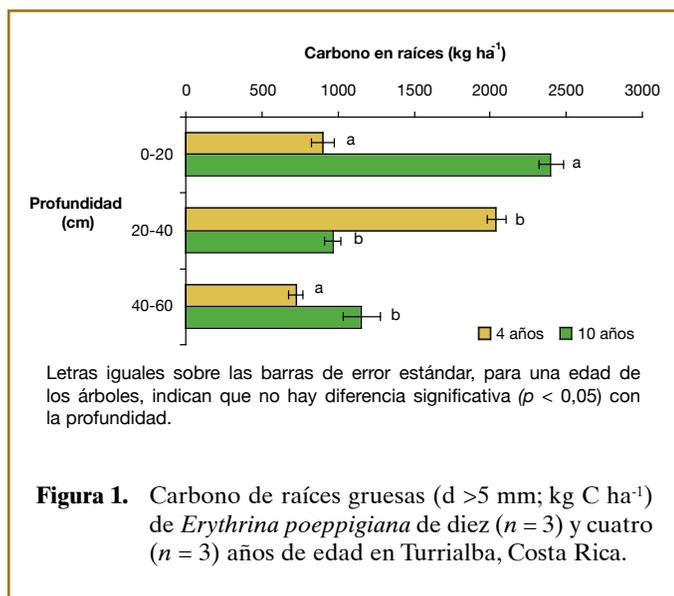
ponente a 70 °C por 48 horas, molidas en un molino Wiley con un tamiz de 1 mm, para evaluar su contenido de C utilizando el método de combustión en seco en una estufa Leco (Leco Corporation 1987). Se calculó el C radicular y el de los componentes aéreos para cada árbol, multiplicando la concentración de C (%) por la cantidad de biomasa encontrada, expresada en kg ha<sup>-1</sup>, usando una densidad de 833 árboles ha<sup>-1</sup> para cada edad (cuatro y diez años). Se estimaron los incrementos anuales de C radicular para cada profundidad, dividiendo el total de C radicular entre la edad respectiva de cada árbol.

Los datos del C de las raíces se examinaron para la homogeneidad de varianzas y normalidad utilizando el SPSS (SPSS Science Inc. 1989). Los datos se analizaron con la prueba de  $t$  para determinar las diferencias significativas en el C de árboles de cuatro y diez años. Se utilizó un análisis de varianza de un factor para determinar las diferencias con la profundidad. A partir de los análisis de varianza, se analizaron las diferencias significativas utilizando la prueba de comparación múltiple de Tukey (Steel *et al.* 1997).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El C radicular total ( $d > 5$  mm) hasta 60 cm de profundidad fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) para los árboles de diez años (4527 kg C ha<sup>-1</sup>) que para los de cuatro (3667 kg C ha<sup>-1</sup>). Para árboles de diez años, la cantidad de C fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) a 0-20 cm de profundidad que a profundidades de 20-40 y 40-60 cm (Fig. 1). Para árboles más jóvenes, se presentó una cantidad significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) de C para 20-40 cm de profundidad, en comparación con profundidades de 0-20 y 40-60 cm. Por lo tanto, los mayores incrementos de C en raíces de árboles de diez años (240 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) ocurrieron entre los 0 y 20 cm (53% del total de C radicular), mientras que para árboles de cuatro años fueron entre los 20 y 40 cm de profundidad (510 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; 56% del total de C radicular).

Estudios de otras especies arbóreas en SAF han mostrado que la mayor proporción de sus raíces se encuentra en los 30 cm superiores del suelo. Por ejemplo, Dhyani y Tripathi (2000) determinaron que el 70% de toda la biomasa radicular (incluyendo raíces finas y gruesas) de un sistema de cultivo en callejones en el noreste de la India se encontraba en los 20 cm superiores. Estos autores sugirieron que el desarrollo de las raíces en la superficie ayuda a los árboles a establecerse en suelos pobres en nutrientes, favoreciendo el proceso de circulación y explotación de nutrientes limitados.



Las necesidades de explotación de nutrientes podrían explicar los distintos patrones verticales de las raíces de los árboles de cuatro y diez años de este estudio. La mayor cantidad de C en los 0-20 cm de profundidad en los árboles de diez años podría ser consecuencia de un suelo pobre en nutrientes en el momento del establecimiento del árbol. Además, a lo largo de los primeros seis años, se ha añadido biomasa al suelo con podas arbóreas y residuos de cultivos, lo cual resulta en la acumulación de materia orgánica del suelo y una consecuente mejora en sus propiedades físicas y químicas. Cuando se plantaron los árboles más jóvenes, sus raíces explotaron horizontes más profundos del suelo (20-60), posiblemente debido a las condiciones mejoradas del suelo y/o la competencia con los árboles ya establecidos (de seis años en este momento) y con los cultivos en crecimiento. Schroth (1999) y Dhyani y Tripathi (2000) notaron que la aplicación de fertilizantes o el uso de podas como *mulch* influyen en la profundidad del enraizamiento. Estos autores sugieren que dichas enmiendas tornan los horizontes superiores del suelo más atractivos para la producción de sistemas radiculares superficiales. Otro factor para tomar en cuenta es que tanto los árboles de cuatro años como los de diez se establecieron a partir de estacas, las cuales tienden a desarrollar sistemas radiculares más superficiales que los árboles derivados de semillas<sup>5</sup>.

En este estudio, la presencia de una capa rocosa a profundidades mayores de 40 cm también pudo haber evitado un enraizamiento más profundo. Rao *et al.* (1993) observaron un patrón similar, en el cual las

profundidades alcanzadas por las raíces de *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* fueron limitadas a profundidades menores por la presencia de una capa rocosa. No obstante, otros estudios han determinado que las mayores biomásas radiculares ocurrieron a mayores profundidades (hasta 60 cm). Por ejemplo, Livesley *et al.* (2000) estudiaron *Grevillea robusta* y *Senna spectabilis* en un SAF de tres años en las tierras altas y subhúmedas de Kenya, donde encontraron una mayor concentración de C radicular en los primeros 60 cm y circunscrito a los 3 m del árbol, de 345 y 390 kg C ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Torquebiau y Kwesiga (1996) determinaron que el C radicular hasta 25 cm de profundidad era de 304 kg C ha<sup>-1</sup>, comparado con 126 kg C ha<sup>-1</sup> entre 25-50 cm, en un SAF con *Sesbania sesban* de dos años, en el este de Zambia. Schroth *et al.* (1996) encontraron que el C radicular hasta 60 cm de profundidad era de 220 y 416 kg C ha<sup>-1</sup> para *G. sepium* y *L. leucocephala*, respectivamente. Alegre *et al.* (2000) determinaron que el C de un SAF de *Bactris gasipaes* de 16 años de antigüedad en Perú era de 7490 kg C ha<sup>-1</sup> a profundidades de 0-20 cm, y un SAF de estratos múltiples con *B. gasipaes*, *Eugenia stipitata*, *Inga edulis*, *Colubrina glanduloso* y *Coffea arabica* presentó 2630 kg C ha<sup>-1</sup> para 0-20 cm (Alegre *et al.* 2000).

Los cambios en la concentración de C en las raíces gruesas en diferentes profundidades no fueron significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ) en los árboles de cuatro y diez años. La concentración promedio de C para los árboles de cuatro años fue de 34% ( $\pm 1,0$ ), y de 36% ( $\pm 0,8$ ) para los de diez años. Sommer *et al.* (2000) tampoco encontraron diferencias significativas en la concentración de C respecto a la profundidad, pero reportaron una concentración promedio del 45%. Torquebiau y Kwesiga (1996) determinaron que la concentración de C radicular de *S. sesban* en Zambia era de 35%, muy semejante al resultado del presente estudio.

Los árboles de diez años de edad asignaron un 9% del C total del árbol al sistema radicular (sin tomar en cuenta raíces finas) y los de cuatro años asignaron un 22% (Cuadro 1). Mekonnen *et al.* (1997) encontraron que un 36% del C total de *S. sesban* estaba asignado al sistema radicular. Sin embargo, Nair (1993) reporta que algunos autores han informado acerca de valores de producción del 15% bajo la superficie de bosques tropicales, o de hasta 50% en SAF. Es probable que el porcentaje bajo en el presente estudio haya resultado de las podas drásticas y frecuentes de los árboles.

<sup>5</sup> Jaysundara. 2002. Department of Land Resource Science, University of Guelph. Reino Unido (comunicación personal).

**Cuadro 1.** Distribución de carbono entre los componentes aéreos y subterráneos de árboles de *Erythrina poeppigiana*, de diez y cuatro años de edad, en Turrialba, Costa Rica

Componentes	Edad de los árboles	
	10 años	4 años
Hojas <sup>(2)</sup> (kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2653	2001
Ramas <sup>(2)</sup> (kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	1650	1068
Tallo <sup>(3)</sup> (kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	434	253
Raíces <sup>(3)</sup> (kg C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	453	917
C asignado a raíces (% del total en el árbol)	9	22

<sup>(2)</sup> Totales para tres podas en un año ( $n = 9$ ).

<sup>(3)</sup>  $n = 3$

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los árboles de mayor edad de *E. poeppigiana* tuvieron más C en la biomasa radicular que los más jóvenes. El mayor incremento anual ocurrió entre 0 y 20 cm para los árboles de diez años, y a los 20-40 cm para los de cuatro años. Esta diferencia podría deberse a niveles menores de nutrientes y materia orgánica en el suelo en el momento del establecimiento del experimento agroforestal, factores que motivaron la asignación inicial de la mayor parte del C a las raíces en los niveles superiores del horizonte del suelo. También podría ser resultado de competencia radicular que afectó los árboles establecidos posteriormente.
- El C total de las raíces y el contenido de C en la materia orgánica de los mismos (%) fueron similares a los de estudios previos que utilizaron especies forestales multipropósito en diversas regiones geográficas. La asignación de C al sistema radicular (9 y 22% del total en los árboles) en este estudio fue baja comparada con estudios anteriores en SAF, probablemente debido a las podas fuertes y frecuentes. Además, la diferencia entre los resultados publicados y los reportados aquí puede estar en función de la productividad del sitio y los métodos de muestreo.
- Se recomienda llevar a cabo más estudios que utilicen árboles agroforestales multipropósito para cuantificar la biomasa radicular y el almacenamiento de nutrientes en ellos, para lograr una mejor comprensión de la captura de nutrientes y secuestro de C bajo la superficie en el largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Natural Sciences and Engineering Research Council de Canadá (NSERC) y al Instituto Interamericano de Cooperación para

la Agricultura (IICA-Canadá) el apoyo financiero brindado para esta investigación. Asimismo, agradecen a Francisco Núñez, Joaquín Soto y Marvin Saborío por su asistencia en el campo, y a Alexis Pérez por su apoyo técnico.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alegre, J; Arévalo, L; Ricse, A. 2000. Reservas de carbono con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía Peruana. ICRAF-Perú. AgroFor2-L. 9 p.
- Atkinson, D. 1996. Why study roots? Agroforestry Forum 7: 2-4.
- Balesdent, J; Balabane, M. 1996. Major contributions of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. Soil Biology and Biochemistry 28: 1261-1263.
- Böhm, W. 1979. Methods of Studying Root Systems. Berlín, Springer Verlag. 188 p.
- Chesney, PEK. 2000. Pruning effects on roots of nitrogen fixing trees in the humid tropics. Ph.D. Thesis. Turrialba, CR, CATIE. 222 p.
- Dhyani, SK; Tripathi, RS. 2000. Biomass and production of fine and coarse roots of trees under agrosilvicultural practices in north-east India. Agroforestry Systems 50: 107-121.
- Fogel, R. 1983. Root turnover and productivity in coniferous forests. Plant and Soil 71: 75-86.
- Gale, WJ; Cambardella, CA; Bailey, TB. 2000. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. Soil Science Society of America Journal 64: 20-207.
- Gray, GRA. 2000. Root distribution of hybrid poplar in a temperate agroforestry intercropping system. M.Sc. Thesis. Department of Environmental Biology, University of Guelph. 114 p.
- Huxley, P. 1999. Tropical Agroforestry. Oxford, UK, Blackwell Science. 371 p.
- Jose, S; Gillespie, AR; Seifert, AR; Mengel, DB; Pope, PE. 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the Midwestern USA: 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. Agroforestry Systems 48: 61-79.
- Kass, DCL; Jiménez, M; Kaufnam, HH; Heredia, C. 1995. Reference Soils of the Turrialba Valley and Slopes of the Irazú Volcano. Soil Brief Costa Rica No. 2. Turrialba, CR, CATIE - International Soil Reference Center. 26 p.
- Leco Corporation. 1987. Instruction manual for the CR-12 Carbon System 781-600. St. Joseph, MI, US, Leco. 129 p.
- Livesley, SJ; Gregory, PJ; Buresh, RJ. 2000. Competition in tree row agroforestry systems. 1. Distribution and dynamics of fine root length and biomass. Plant and Soil 227: 149-161.
- Mekonnen, K; Buresh, KJ; Jama, B. 1997. Root and inorganic nitrogen distributions in *Sesbania* fallow, natural fallow and maize fields. Plant and Soil 188: 319-327.
- Nair, PKR. 1993. An introduction of Agroforestry. Dordrecht, NL, Kluwer Academic Publishers. 499 p.
- Rao, MR; Muraya, P; Huxley, PA. 1993. Observations of some tree root systems in agroforestry intercrop situations, and their graphical representation. Experimental Agriculture 29: 183-194.
- Schroth, G. 1995. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. Agroforestry Systems 30: 125-143.
- \_\_\_\_\_. 1996. Current needs in root research for agroforestry. Agroforestry Forum 7: 10-11.

- \_\_\_\_\_. 1999. A review of belowground interactions in agroforestry, focusing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems* 42: 5-24.
- \_\_\_\_\_; Lehmann, J. 1995. Contrasting effects of roots and mulch from three agroforestry tree species on yield of alley cropped maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 54: 89-101.
- \_\_\_\_\_; Kolbe, D; Pity, B; Zech, W. 1996. Root system characteristics with agroforestry relevance of nine leguminous tree species and a spontaneous fallow in a semi-deciduous rainforest area of West Africa. *Forest Ecology and Management* 84: 199-208.
- Sommer, R; Denich, M; Vlek, PLG. 2000. Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region, Brazil. *Plant and Soil* 219: 231-341.
- SPSS Science Inc. 1989. *SPSS for Windows User's Guide*, Version 10.0. Chicago, IL, US, SPSS Science. 354 p.
- Steel, GD; Torrie, JH; Dickey, DA. 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York, NY, US, McGraw-Hill. 633 p.
- Torquebiau, EF; Kwesiga, F. 1996. Root development in a *Sesbania sesban* fallow-maize system in Eastern Zambia. *Agroforestry Systems* 34: 193-211.
- Van Noordwijk, M; Spek, LY; Purnomisidhi, P. 1995. Quantifying shallow roots. *Agroforestry Today* 6: 9-11.
- \_\_\_\_\_; Lawson, M; Soumare, G; Groot, JHR; Hairiah, K. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. *In* Ong, CK; Huxley, PA. eds. *Tree-Crop Interactions: a Physiological Approach*. Wallingford, UK, CAB International. 421 p.
- Yamoah, CF; Agboola, AA; Wilson, GF; Mulongou, K. 1986. Soil properties as affected by the use of leguminous shrubs for alley cropping with maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 18: 167-177.
- Young, A. 1997. *Agroforestry for Soil Management*. Wallingford, UK, CAB International. 214 p.