

Avances de Investigación

Disponibilidad de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de *Coffea arabica*¹

Martha Gutiérrez Castillo²; Jean-Michel Harmand³; Etienne Dambrine⁴

Palabras claves: biomasa; *Erythrina poeppigiana*; *Eucalyptus deglupta*; *Inga* spp.; mineralización de N; nitratos; *Terminalia* spp.; *Zea mays*.

RESUMEN

Se estudió la contribución de cinco especies de árboles de sombra —dos leguminosas (*Inga* spp. y *Erythrina poeppigiana*) y tres maderables (*Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia*) sobre la disponibilidad de N en la capa del suelo 0-10 cm en sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) en la zona Pacífico Sur de Pérez Zeledón, Costa Rica. Los suelos estudiados fueron recolectados en tres sitios: Verde Vigor (Ultisol), Santa Fe (Ultisol) y San Pedro (suelo aluvial). Se utilizó maíz (*Zea mays*) en condiciones de invernadero como especie indicadora de la contribución de N de las especies de sombra al suelo. Al final de la estación seca (marzo 2002), los suelos bajo las especies maderables presentaron menores contenidos de NO_3^- que las parcelas de café a pleno sol o asociadas con árboles leguminosos. Las tasas de mineralización de N del suelo en condiciones anaeróbicas (Npm) fueron superiores bajo leguminosas en comparación con las maderables y a pleno sol. Para el sitio aluvial arenoso, las mayores producciones de biomasa y extracción de N por el maíz fueron obtenidas con los suelos de parcelas de leguminosas. En este sitio, las variables influenciadas por los árboles de sombra (NO_3^- y Npm del suelo; contenido de N en las raíces de los árboles y N liberado por estas) fueron relacionadas positivamente con la producción de biomasa y la extracción de N por el maíz.

Nitrogen availability in the soil under woody and leguminous shade species used in *Coffea arabica* plantations

Key words: Biomass; *Erythrina poeppigiana*; *Eucalyptus deglupta*; *Inga* spp.; N mineralization; nitrates; *Terminalia* spp.; *Zea mays*.

ABSTRACT

The contribution of five shade tree species (leguminous: *Inga* spp. or *Erythrina poeppigiana*, and timber: *Eucalyptus deglupta*, *Terminalia ivorensis* or *Terminalia amazonia*) to N availability in the 0-10 cm soil layer was studied in coffee (*Coffea arabica*) agroforestry systems in the southern Pacific zone of Perez Zeledon, Costa Rica. The soils studied were collected from three sites: Verde Vigor (Ultisol), Santa Fe (Ultisol) and San Pedro (alluvial soil). Maize (*Zea mays*), cultivated in a greenhouse, was used as an indicator species of N contribution to the soil from each shade species. At the end of the dry season (March 2002), soils under the timber species had lower NO_3^- contents compared to coffee in full sun or associated with leguminous trees. Mineralisation rates of soil N in anaerobic conditions (Npm) were higher under leguminous trees than under timber trees or in full sun. For the alluvial sandy site, biomass production and N extraction by maize was greater with the soils from the plots with leguminous species. For this site, the parameters influenced by the shade species (soil NO_3^- and Npm; N content and N release from the tree roots) were positively related with biomass production and N extraction by the maize.

¹ Basado en: Gutiérrez C, M. 2002. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

² Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. Km 12,5 Carretera Norte. Apto. 453.

³ CIRAD-Forêt/CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correo electrónico: jean-michel.harmand@cirad.fr (autor para correspondencia).

⁴ INRA, Cycles biogeochimiques, Nancy, Francia. Correo electrónico: dambrine@nancy.inra.fr

INTRODUCCIÓN

Recientemente, en las zonas bajas (600 a 800 msnm) del sur de Costa Rica, se ha estado cultivando café (*Coffea arabica*) fuera de su área tradicional, y se han introducido árboles maderables de valor comercial y rápido crecimiento, como *Eucalyptus deglupta* y *Terminalia* spp., en sustitución de árboles leguminosos tradicionales de sombra, como *Erythrina poeppigiana* e *Inga* spp. (Morales y Beer 1987, Tavares *et al.* 1999). Si las especies leguminosas pudieran mejorar la disponibilidad de N en el suelo por medio de la fijación atmosférica y el reciclaje (Fassbender 1993), su sustitución por especies maderables no leguminosas podría reducir la disponibilidad de nutrientes como el N por falta de fijación, por absorción o, quizás, reduciendo la mineralización.

El objetivo del presente estudio consistió en evaluar la influencia de las especies leguminosas *Inga* spp. y *E. poeppigiana*, así como de las maderables *E. deglupta*, *Terminalia ivorensis* y *Terminalia amazonia*, sobre la disponibilidad del N en el suelo en sistemas agroforestales con café en la zona Pacífico Sur de Costa Rica. Se midió el contenido de N mineral del suelo al final de la estación seca y el N potencialmente mineralizable del suelo; se identificaron los componentes del árbol de sombra (hojarasca, raíces) que influyen sobre la liberación de N y se estimó la producción de maíz (*Zea mays*) en condiciones de invernadero, como especie indicadora de la fertilidad del suelo obtenido de las diferentes asociaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en tres fincas cafetaleras (Verde Vigor, Santa Fé y CoopeAgri R.L.-San Pedro) ubicadas al sur de la ciudad de San Isidro del General, en el cantón de Pérez Zeledón, de la Provincia de San José, Costa Rica. Las fincas se encuentran entre las coordenadas 9°15'-9°18'N y 83°31'-83°36'O, con altitudes de entre 600 y 700 msnm. La zona de vida según Holdridge es Bosque Pluvial Montano Bajo. La precipitación anual varía entre 2740 mm (Santa Fe) y 3520 mm (Verde Vigor). Hay una estación seca acentuada entre enero y marzo. La temperatura media es de 23,5 °C y la humedad relativa de 87,5%. Los suelos se clasifican como ultisoles (Verde Vigor y Santa Fe) y aluviales (San Pedro).

Sistemas de cultivo estudiados

El estudio se llevó a cabo en el 2002, en diferentes sistemas de producción de *C. arabica* (Cuadro 1). En la finca Verde

Vigor, se estableció en 1998 un diseño experimental con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones, pero en este estudio solo fueron utilizadas tres repeticiones, por la pérdida de la cuarta. El factor principal fue la especie de sombra y un testigo sin árboles. En la finca Santa Fe, se escogieron dos plantaciones comerciales adyacentes, con la misma historia y el mismo manejo (café con *E. deglupta* y café a pleno sol), en las cuales el café fue establecido en 1988. En la parcela con sombra, los árboles de *E. deglupta* fueron plantados en 1995. El ensayo de San Pedro fue establecido por el Instituto Costarricense del Café (ICAFE) en 1996. Se establecieron cinco parcelas (una a continuación de la otra sin replicación), cada una con una especie diferente de sombra. El sistema de café bajo sombra de *E. deglupta* fue el único sistema presente en todos los sitios.

En el año anterior al del estudio, las fincas recibieron 120 kg ha⁻¹ de fertilizante nitrogenado en Verde Vigor y Santa Fe, y 200 kg ha⁻¹ en San Pedro, aplicado en forma localizada cerca de cada tallo de café. Durante el presente estudio no hubo fertilización con N.

Toma de muestras de suelos

Se tomaron muestras de suelo a 0-10 cm de profundidad antes de las primeras lluvias (el 18 de marzo del 2002), con tres muestras compuestas en cada parcela en Santa Fe y San Pedro, y una muestra compuesta por parcela en Verde Vigor, donde hubo tres repeticiones. Para el muestreo, se seleccionaron al azar cuatro árboles de sombra en cada parcela (Verde Vigor) o subparcela (Santa Fe y San Pedro). Cada muestra de suelo compuesta estaba conformada por ocho submuestras (dos por árbol), tomadas a 1,5 m del árbol, entre dos hileras de café, en el centro de la calle. Simultáneamente, de los mismos puntos y profundidad (0-10 cm) se extrajeron muestras de suelo (2 kg) para establecer el experimento de producción de maíz en invernadero.

Se llevaron los suelos al laboratorio del CATIE, donde se determinó el C orgánico, N total, pH y N mineral. Para evaluar el N potencialmente mineralizable en condiciones de laboratorio, se utilizaron dos métodos de incubación: aeróbica de suelos a 28 °C en humedad fijada, y anaeróbica a 40 °C. Con el método de incubación aeróbica, se utilizaron los suelos humedecidos a dos niveles de humedad: el primero estuvo cerca de la capacidad de campo (42% en el suelo arenoso y 53% en los ultisoles), y el segundo fue de 27% en suelo arenoso y 36% en los ultisoles. Se midió el contenido de nitratos y amonio del suelo a los 0, 7, 21 y 35 días de incubación.

Cuadro 1. Características de los sistemas agroforestales con café (*Coffea arabica*) estudiados en la Zona Sur de Costa Rica

| Sistema de café: a pleno sol o con árboles de sombra | Tipo de suelo | Parcelas estudiadas (no.) | Tamaño de las parcelas (m x m) | Edad en el 2002 (años) | | Densidad (unidad ha ⁻¹) | |
|--|---------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------|--|---------|
| | | | | Árboles | Cafetos | Árboles | Cafetos |
| <u>Finca Santa Fé</u> | | Ultisol | | | | | |
| Café a pleno sol | | 1 | 70 x 70 | — | 14 | — | 5819 |
| <i>Eucalyptus deglupta</i> | | 1 | 70 x 70 | 7 | 14 | 110 | 6035 |
| <u>Finca Verde Vigor</u> | | Ultisol | | | | | |
| Café a pleno sol | | 3 | 40 x 40 | — | 4 | — | 4720 |
| <i>E. deglupta</i> | | 3 | 48 x 42 | 4 | 4 | 250 | 4720 |
| <i>Terminalia ivorensis</i> | | 3 | 48 x 42 | 4 | 4 | 250 | 4720 |
| <i>Erythrina poeppigiana</i> | | 3 | 48 x 40 | 4 | 4 | 156 | 4720 |
| <u>Finca San Pedro</u> | | Aluvial | | | | | |
| <i>E. deglupta</i> | | 1 | 50 x 100 | 6 | 6 | 70 | 4900 |
| <i>T. ivorensis</i> | | 1 | 50 x 100 | 6 | 6 | 270 | 4900 |
| <i>Terminalia amazonia</i> | | 1 | 50 x 100 | 6 | 6 | 270 | 4900 |
| <i>E. poeppigiana</i> | | 1 | 50 x 100 | 6 | 6 | 270 | 4900 |
| <i>Inga</i> spp. | | 1 | 50 x 100 | 6 | 6 | 270 | 4900 |

En condiciones anaeróbicas, el suelo mezclado con agua en exceso fue incubado a 40 °C por siete días y se midió la producción de amonio durante este tiempo.

Toma de residuos de árboles de sombra e incubación de esos residuos en mezcla con suelo

En septiembre del 2002, se recolectaron residuos vegetales de las especies de sombra (hojas verdes de *E. poeppigiana* después de una poda, hojarasca de las otras especies y raíces finas de diámetro < 2mm) en la finca San Pedro. Se mezclaron estos residuos con suelo para incubarlos en el laboratorio y así medir su liberación de N. Con base en pesos secos, el 2% de la mezcla fue la materia vegetal adicionada; esta proporción correspondió a una cantidad de 0,77 a 2,24 g de material fresco por 60 g de suelo fresco. El suelo utilizado fue un inceptisol (0-10 cm), proveniente de un cafetal manejado orgánicamente, con pocos insumos, desde hace cuatro años en la finca experimental del CATIE. Dicho suelo tenía un pH de 4 en agua, con un contenido de C orgánico de 3,07%, de N total de 0,31% y humedad gravimétrica de 55%.

Se evaluaron 10 tratamientos correspondientes a los residuos de las especies en estudio, más un testigo sin

residuos, los cuales fueron replicados cuatro veces. Las muestras se incubaron a 28 °C en contenedores cubiertos con un plástico semipermeable, permitiendo el intercambio gaseoso. Se midió el contenido de N mineral de las muestras después de 24 horas y también a los siete días después de estar en el incubador. La liberación del N por los residuos se obtuvo por diferencias entre los valores de N acumulado en las mezclas de suelos con residuos y en el suelo solo.

Experimento de producción de maíz en invernadero

Utilizando el suelo procedente de cada parcela (Cuadro 1), se llenaron macetas de 2 dm³, en las cuales se estableció el maíz. Se replicó cada tratamiento en cuatro macetas, obteniéndose la cuarta a partir de una mezcla de las tres muestras tomadas en el campo. Se sembraron cuatro semillas de maíz por maceta, dejando dos plantas en cada una de ellas por medio del raleo realizado 10 días después de la germinación (ddg). Para compensar la deficiencia de P en los suelos, se aplicó semanalmente súper fosfato triple. Las plantas fueron cosechadas a los 45 ddg. Por separado, se pesaron las partes aérea y radical de cada planta (dos por maceta), después de secarlas al horno a 60 °C hasta peso constante. Posteriormente, se determinó el contenido de N de cada parte.

Análisis estadístico

Se analizaron las variables de caracterización de los suelos —pH, C orgánico, N total, C:N, N mineral y Npm (N mineralizado en condiciones anaeróbicas en el laboratorio)— bajo el modelo de un diseño completamente al azar en arreglo factorial con efecto anidado (especies dentro del sitio). A las variables biomasa y N total del maíz, así como N mineral liberado de los residuos de árboles, se les aplicó el diseño de bloques completamente al azar con distribución unifactorial. Se calculó la correlación lineal de los datos del maíz con las variables de caracterización del suelo y N liberado por los residuos de árboles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los suelos

El suelo ultisol de Verde Vigor era más arcilloso y de una coloración más roja que el suelo de Santa Fe, y el suelo franco arenoso de San Pedro estaba conformado por aluviones ricos en arena (Cuadro 2). El suelo de Verde Vigor presentó un contenido de N y C orgánico total (0,25 y 4,19%, respectivamente) más bajo que los suelos de Santa Fe (0,40 y 6,06%) y San Pedro (0,44 y 4,82%) (Cuadro 3). Comparando los sistemas de café con eucalipto, el suelo de Santa Fe tuvo un pH casi neutro (6,5), mientras que los suelos de San Pedro y Verde Vigor mostraron pH similares y ligeramente ácidos (5,4 y 5,6 respectivamente). El potencial de mineralización del suelo de Santa Fe (9,4 mg N kg⁻¹ d⁻¹) era más alto (3,8 y 4,8 en Verde Vigor y San Pedro, respectivamente), lo que resultó en un mayor contenido de N mineral del suelo en Santa Fe al final de la estación seca (Cuadro 3).

Sin embargo, cuando se compararon los tratamientos (tipo de sombra) dentro de cada sitio (Cuadro 3), solamente los contenidos de N-NH₄⁺ y/o N-NO₃⁻ del suelo en San Pedro y Santa Fe mostraron diferencias claras entre los tipos de sombra. En Santa Fe, el suelo

bajo café a pleno sol tuvo un contenido de nitratos mucho más alto que bajo sombra de *E. deglupta*. Esto puede atribuirse a una mayor absorción de nitratos por el sistema café-*E. deglupta*, al menos durante la estación seca, dado que no se encontró ningún efecto de los árboles de *E. deglupta* sobre la mineralización del N orgánico del suelo, así como en el estudio hecho *in situ* en el mismo lugar y al mismo tiempo por Ávila *et al.* (2004). En San Pedro, el suelo bajo *Inga* spp. presentó contenidos de nitratos más elevados que bajo los árboles maderables como *Terminalia* spp. y *E. deglupta*, mientras que *E. poeppigiana* se ubicó en una posición intermedia, indicando el efecto favorable de las especies leguminosas sobre el contenido de N mineral en el suelo. Puesto que los nitratos representan una gran proporción del N mineral total en San Pedro y Santa Fe (de 70 a 98%), los contenidos de N mineral siguen la misma tendencia que el nitrato. Aunque el contenido de N total del suelo puede ser menor bajo una leguminosa (*E. poeppigiana*) que bajo un maderable (*T. ivorensis*), como en el caso de San Pedro, la leguminosa siempre tiene niveles más altos de N mineral en el suelo, confirmando el efecto positivo de la leguminosa sobre este parámetro.

En todos los sitios se observó una mineralización aeróbica negativa, con una pérdida de 80 a 95% del N mineral inicial durante un lapso de 35 días (ver resultados en Gutiérrez 2002). Esto significa que el método clásico de medición de la mineralización aeróbica de N en laboratorio, con niveles fijos de temperatura y agua, no se adaptó para esos tipos de condiciones de campo. Por el contrario, se obtuvieron valores positivos de tasas de Npm tanto en condiciones aeróbicas en el mismo campo de estudio (Ávila *et al.* 2004) como en condiciones anaeróbicas en el laboratorio en el presente estudio (Cuadro 3). Esos últimos valores no mostraron ninguna diferencia significativa entre tipos de sombra; sin embargo, muestran una tendencia consistente a

Cuadro 2. Propiedades físicas de la capa 0-10 cm del suelo de los tres sitios bajo el sistema *Coffea arabica-Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica

| Variable | Sitio | | |
|---------------|------------------------------|------------------|------------------|
| | Verde Vigor | Santa Fe | San Pedro |
| Textura | Franco arcilloso o arcilloso | Franco arcilloso | Franco arenoso |
| Arena (%) | 40 | 55 | 72 |
| Limo (%) | 23 | 22 | 22 |
| Arcilla (%) | 37 | 23 | 6 |
| Color-Munsell | Rojizo 5 YR | Pardo 7,5 YR | Gris pardo 10 YR |

Cuadro 3. Propiedades químicas de la capa del suelo 0-10 cm bajo los diferentes tipos de sombra de café (*Coffea arabica*) dentro de cada sitio en la Zona Sur de Costa Rica

| Tipo de sombra | C org. (%) | N total (%) | C:N | pH H ₂ O | N-NH ₄ ⁺ N-NO ₃ ⁻ Nmin | | | Npm ⁽²⁾ (mg N kg suelo ⁻¹ d ⁻¹) |
|------------------------------|---------------|----------------|------|------------------------|--|--------|-------|---|
| | | | | | (mg N kg suelo ⁻¹) | | | |
| <u>Finca Verde Vigor</u> | | | | | | | | |
| <i>Eucalyptus deglupta</i> | 4,2a | 0,25a | 16a | 5,6a | 1,8b | 6,0a | 7,8a | 3,8a ⁽³⁾ |
| <i>Erythrina poeppigiana</i> | 4,6a | 0,27a | 16a | 5,6a | 2,1b | 9,6a | 11,7a | 3,9a |
| <i>Terminalia ivorensis</i> | 3,6a | 0,22a | 15a | 5,6a | 4,5ab | 5,1a | 9,7a | 2,7a |
| Café a pleno sol | 4,1a | 0,25a | 16a | 5,6a | 7,6a | 7,5a | 15,2a | 3,7a |
| p ⁽³⁾ | 0,82 | 0,79 | 0,92 | 0,98 | 0,05 | 0,13 | 0,21 | 0,65 |
| <u>Finca Santa Fe</u> | | | | | | | | |
| <i>E. deglupta</i> | 6,1a | 0,40a | 15a | 6,6a | 1,7a | 16,3b | 18b | 9,4a |
| Café a pleno sol | 5,7a | 0,40a | 14a | 6,9a | 0,6a | 41,7a | 42,2a | 9,2a |
| p ⁽³⁾ | 0,18 | 0,78 | 0,17 | 0,05 | 0,061 | 0,01 | 0,01 | 0,87 |
| <u>Finca San Pedro</u> | | | | | | | | |
| <i>E. deglupta</i> | 4,8b | 0,44b | 11a | 5,4a | 0,9ab | 10,0b | 10,9a | 4,8a |
| <i>E. poeppigiana</i> | 4,8b | 0,45b | 11a | 5,4a | 1,7ab | 15,3ab | 17,0a | 5,5a |
| <i>Inga</i> spp. | 5,7ab | 0,50ab | 11a | 5,4a | 2,0a | 18,0a | 20,0a | 5,3a |
| <i>T. ivorensis</i> | 6,1a | 0,57a | 10a | 5,5a | 0,1b | 9,6b | 9,7a | 4,9a |
| <i>T. amazonia</i> | 5,3ab | 0,50ab | 10a | 5,4a | 4,2a | 9,7b | 13,9a | 4,7a |
| p ⁽³⁾ | 0,03 | 0,03 | 0,28 | 0,96 | 0,03 | 0,02 | 0,06 | 0,93 |

⁽²⁾ Npm (N potencialmente mineralizable: N mineralizado en condiciones anaeróbicas en el laboratorio).

⁽³⁾ Dentro de cada sitio y para cada variable del suelo, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

⁽³⁾ Probabilidad de que exista diferencia significativa entre especies en el mismo sitio.

que las leguminosas tuvieran un nivel superior a las maderables y a pleno sol. Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Mogollón *et al.* (1997), quienes encontraron valores de Npm significativamente más altos en suelos de plantación de café bajo *Inga* spp. que en los suelos de plantaciones de café manejados con sombra de cítricos.

Liberación de N de las hojas, hojarasca y raíces de los árboles de sombra

Las hojas verdes de *E. poeppigiana* (que son el producto de la poda) presentan la concentración de N más alta de todos los residuos (Cuadro 4). La hojarasca de *Inga* spp. tuvo una concentración de N similar a la de los maderables. Para ambos tipos de residuos (hojarasca y raíces), *E. deglupta* presenta las concentraciones de N más bajas de todas las especies. En las raíces, que son menos ricas en N que la hojarasca, *E. poeppigiana* tiene la concentración de N más alta, mientras que *Inga* spp. posee una concentración intermedia entre *E. poeppigiana* y los maderables.

Después de un día de incubación en mezcla con suelo, todos los residuos vegetales mostraron liberación de N, excepto la hojarasca de *E. deglupta*, que inmovilizó el N (Cuadro 4). Las hojas de *E. poeppigiana* tuvieron la mayor producción de N mineral, consistente con su alta concentración inicial en N (3,8%). La hojarasca de *Inga* spp. se mineralizó más lentamente que la hojarasca de *T. ivorensis* y *T. amazonia*. En el caso de las raíces, las leguminosas se mostraron superiores en la liberación de N, e *Inga* spp. presentó la tasa de liberación más alta (cuando se calculó como porcentaje de la cantidad inicial a los siete días), lo que amerita estudios complementarios. En el caso de *E. poeppigiana*, la tasa de liberación de N de las hojas se incrementó de uno a siete días de incubación, mientras que las raíces no liberaron más N. Las raíces de *Inga* spp. no liberaron más N, mientras que su hojarasca mostró una fuerte inmovilización de N a los siete días. Los maderables presentaron una inmovilización de N en los residuos durante este período.

Cuadro 4. Concentración de N en los residuos vegetales y N mineral liberado por esos residuos en mezcla con suelo después de un día y siete días de incubación aeróbica en laboratorio

| Tipo de residuo | Especie | Concentración en N de los residuos (%) | N liberado después de un día | | N liberado después de siete días | |
|-----------------|------------------------------|--|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|
| | | | (mg N kg suelo ⁻¹) | (% del N vegetal) | (mg N kg suelo ⁻¹) | (% del N vegetal) |
| Hoja verde | <i>Erythrina poeppigiana</i> | 3,80 | 139,2a | 6,7a | 618,2a | 29,7a |
| Hojarasca | <i>Inga</i> spp. | 1,72 | 6,1c | 1,5c | -13,6d | — |
| | <i>Terminalia ivorensis</i> | 1,62 | 22,0b | 4,1b | -8,0cd | — |
| | <i>Terminalia amazonia</i> | 1,73 | 26,5b | 4,8b | 4,0c | 0,7b |
| | <i>Eucalyptus deglupta</i> | 1,53 | -7,0d | — | -30,8e | — |
| Raíz | <i>E. poeppigiana</i> | 2,19 | 25,2b | 1,0c | 20,6b | 0,8b |
| | <i>Inga</i> spp. | 1,38 | 22,8b | 8,4a | 19,6b | 7,2a |
| | <i>T. ivorensis</i> | 0,68 | 4,3c | 13,0c | -15,3de | — |
| | <i>T. amazonia</i> | 0,79 | 0,9c | 0,3d | -16,3de | — |
| | <i>E. deglupta</i> | 0,52 | 1,9c | 0,7cd | -13,9d | — |

Valores seguidos por la misma letra en la misma columna no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Estos resultados confirman el efecto positivo de las leguminosas sobre la liberación de N en el suelo, pero también demuestran el comportamiento variable de estas; por ejemplo, se confirmó la velocidad baja de descomposición de la hojarasca de *Inga* spp. en relación con la baja concentración de N (1,72%). Palm y Sánchez (1991) obtuvieron resultados similares, confirmando que no todas las hojas de leguminosas se descomponen y mineralizan rápidamente el N. Dichos autores reportaron que la mineralización neta del N ocurre si la concentración de N de las mismas es superior a 2%; si la concentración es inferior a esta cifra, se produce la inmovilización. Estos resultados demuestran también que la introducción de maderables como *E. deglupta* podría conllevar a una reducción, por lo menos temporal, en la disponibilidad de N para los cafetos.

Producción de biomasa y extracción de N por el maíz en invernadero

La biomasa total y la extracción de N por el maíz en condiciones de invernadero (Fig. 1) confirman los resultados obtenidos en la caracterización de los suelos. Los suelos de Verde Vigor produjeron la menor biomasa de maíz con la menor extracción de N, acompañada de la más baja concentración de N en la biomasa (0,82%), lo cual podría estar relacionado con el menor contenido de

N mineral y el menor potencial de mineralización del N del suelo en Verde Vigor. Por el contrario, los suelos de Santa Fe produjeron la biomasa de maíz con la mayor concentración de N (1,07%), en conformidad con el mayor contenido de N mineral inicial y el mayor potencial de mineralización del N del suelo en Santa Fe.

Tanto en la producción de biomasa como en la extracción de N por el maíz, solamente los suelos provenientes del sitio San Pedro mostraron diferencias significativas entre los tipos de sombra (Fig. 1). El suelo bajo *E. poeppigiana* produjo una mayor biomasa total de maíz que los suelos bajo maderables. La biomasa producida con el suelo proveniente de la parcela con *Inga* spp. marcó una producción intermedia; no obstante, obtuvo el nivel máximo de extracción de N.

Aunque las especies leguminosas —especialmente *E. poeppigiana*—, mostraron un efecto positivo y significativo en la producción de maíz en San Pedro, el efecto parece ser mínimo en Verde Vigor. Es posible que este comportamiento se deba a la diferencia de edad entre las parcelas y a su manejo anterior. Las parcelas de Verde Vigor tienen solamente cuatro años de establecidas, mientras que las parcelas de San Pedro tienen seis años; además, *E. poeppigiana* estaba mejor establecido en San Pedro y había tenido un mayor

desarrollo foliar, durante un período más largo. Por lo tanto, *E. poeppigiana* en San Pedro ha podido contribuir más que en Verde Vigor al reciclaje de nutrientes, materia orgánica del suelo y fijación de nutrientes, entre otros.

Considerando solamente el sitio San Pedro, la producción de biomasa del maíz tuvo buenas correlaciones con las variables de calidad de los residuos de árboles de sombra, en particular con la concentración y liberación

de N en las raíces (Cuadro 5). Hubo poca correlación con las características de las hojas, debido probablemente al comportamiento de *Inga* spp., que liberó más N de los residuos de raíces que a partir de la hojarasca. La extracción de N por el maíz estuvo relacionada con el N liberado por las raíces de árboles y con dos variables del suelo influenciadas por las especies arbóreas: el contenido inicial de NO_3^- y el N potencialmente mineralizable (Cuadro 5).

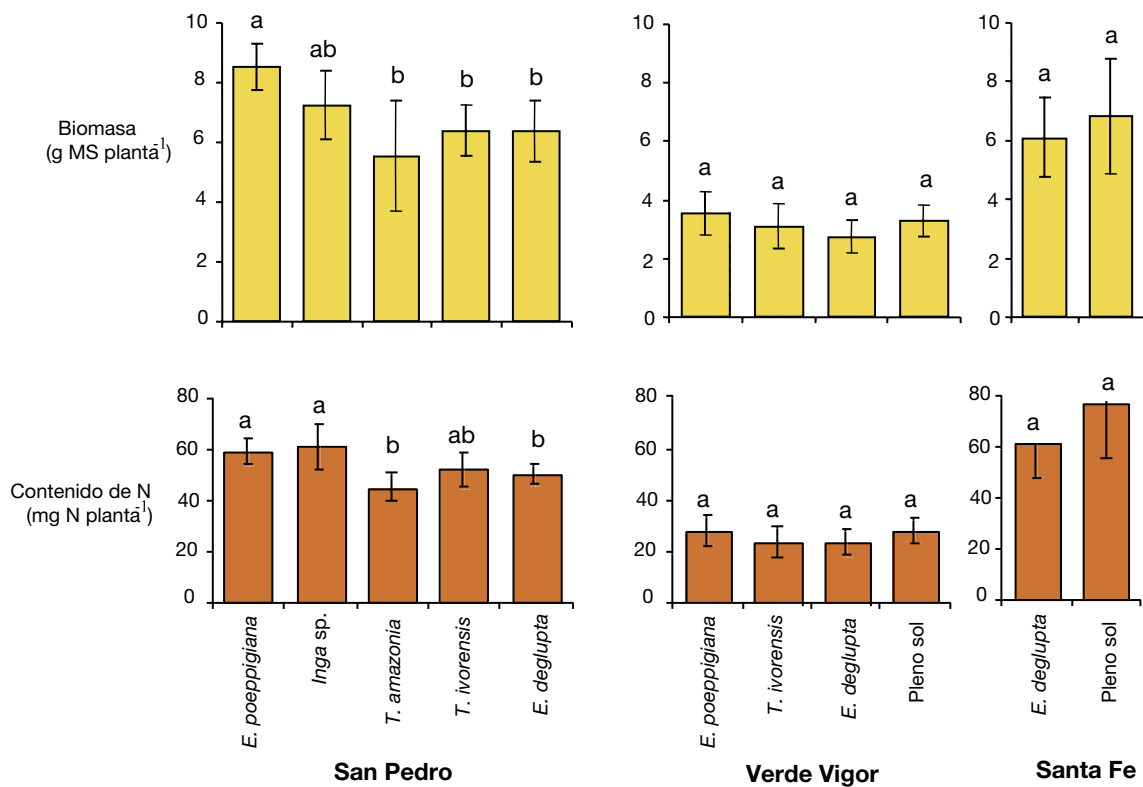


Figura 1. Producción de biomasa (g MS planta⁻¹) y contenido de nitrógeno (mg N planta⁻¹) de maíz (*Zea mays*) cultivado en condiciones de invernadero durante 45 días, en suelos provenientes de distintas plantaciones de *Coffea arabica*, con diferentes tipos de sombra. Para cada gráfico, los valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Cuadro 5. Correlaciones lineales entre la biomasa y el contenido de N del maíz (*Zea mays*) con la calidad de los residuos de árboles como las características químicas del suelo provenientes de San Pedro, Zona Sur de Costa Rica

| Variable | Materia seca del maíz (g planta ⁻¹) | | | Contenido de nitrógeno del maíz (mg N planta ⁻¹) | | |
|--|--|--------|-------|---|-------|-------|
| | Tallo | Raíz | Total | Tallo | Raíz | Total |
| N en hojas de árboles (%) | -ns- | 0,95* | -ns- | -ns- | -ns- | -ns- |
| N en raíces de árboles (%) | 0,95* | 0,99** | 0,93* | -ns- | -ns- | -ns- |
| N mineral liberado por hojas u hojarasca de árboles (mg N kg suelo ⁻¹) | -ns- | 0,90* | -ns- | -ns- | -ns- | -ns- |
| N mineral liberado por raíces de árboles (mg N kg suelo ⁻¹) | 0,93* | -ns- | 0,92* | 0,89* | 0,95* | 0,94* |
| N-NO ₃ ⁻ del suelo (mg N kg suelo ⁻¹) | -ns- | -ns- | -ns- | 0,87* | 0,93* | 0,91* |
| N mineral del suelo (mg N kg suelo ⁻¹) | -ns- | -ns- | -ns- | -ns- | -ns- | -ns- |
| N potencialmente mineralizable del suelo (mg N kg suelo ⁻¹ d ⁻¹) | -ns- | 0,95* | -ns- | 0,87* | 0,93* | 0,91* |

Nivel de significación de la correlación: *= $p < 0,05$; **= $p < 0,01$; ns =no significativo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Comparadas con los maderables *T. ivorensis*, *T. amazonia* y *E. deglupta*, las leguminosas *Inga* spp. y *E. poeppigiana* presentaron tasas más altas de liberación de N por sus raíces y hojas, e influenciaron positivamente el contenido de nitratos del suelo y el N potencialmente disponible del suelo, así como la producción de biomasa y la extracción de N por el maíz utilizado como indicador de fertilidad.
- La extracción de N por las plantas de maíz cultivadas en invernadero con suelos arenosos provenientes de sistemas de café con sombra estuvo positivamente correlacionada con las variables del suelo influenciadas por las especies arbóreas de sombra: NO₃⁻ inicial y N potencialmente mineralizable.
- Aunque la liberación de N por la hojarasca de *Inga* spp. no fue más alta que la de los maderables, sus raíces arrojaron la tasa de liberación de N más alta de todas las especies, inclusive comparada con *E. poeppigiana*. Esto enfatiza la necesidad de estudios complementarios sobre el ciclo del N en sistemas con *Inga* spp.
- La producción de biomasa y la extracción de N por el maíz cultivado en invernadero, así como el N potencialmente mineralizable, pueden ser utilizadas como indicadores del efecto de la especie de sombra sobre la disponibilidad de N en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CASCA (Sistemas Agroforestales de Café en América Central), INCO-DEV: ICA-CT-2001-10071, que cuenta con financiamiento de la Unión Europea a través del programa INCO.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Ávila, H; Harmand, JM; Dambrine, E; Jiménez, F; Beer, J; Oliver, R. 2004. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la zona sur de Costa Rica. Agroforestería en las Américas 41/42: 83-91.
- Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2 ed. Turrialba, CR, CATIE. 491 p. (Serie de materiales de enseñanza no. 29).
- Gutiérrez C, M. 2002. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.
- Mogollón, JP; Miragaya, GJ; Sánchez, LF; Chacón, NY; Araujo, J. 1997. Nitrógeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes árboles de sombra. Agronomía Tropical 47 (1): 87-102.
- Morales, E; Beer, J. 1987. Distribución de raíces finas de *Coffea arabica* y *Eucalyptus deglupta* en cafetales del Valle Central de Costa Rica. Agroforestería en las Américas 5(15-18): 44-48.
- Palm, CA; Sánchez, PA. 1991. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. Soil Biology and Biochemistry 23(1): 83-88.
- Tavares, CF; Beer, J; Jiménez, F; Schroth, G; Fonseca, C. 1999. Experiencia de agricultores de Costa Rica con la introducción de árboles maderables en plantaciones de café. Agroforestería en las Américas 6(23): 17-20.