

Avances de Investigación

Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la Zona Sur de Costa Rica¹

Hector Ávila²; Jean-Michel Harmand³; Etienne Dambrine⁴;
Francisco Jiménez⁵; John Beer⁵; Robert Oliver⁶

Palabras claves: adsorción de nitratos; agroforestería; café; escorrentía; lixiviación de N; Ultisol.

RESUMEN

En un Ultisol en la Zona Sur de Costa Rica (600 msnm y 2700 mm año⁻¹), en cafetales (*Coffea arabica*) a pleno sol y café bajo sombra de *Eucalyptus deglupta*, se evaluaron las tasas de mineralización y nitrificación del N del suelo, las pérdidas de N por escorrentía y lixiviación y el N mineral acumulado en el perfil del suelo. Las dos parcelas experimentales recibieron 180 kg N ha⁻¹ en el 2002 (año del estudio). *E. deglupta* no afectó la tasa de mineralización y nitrificación del N en la capa de suelo 0–20 cm. En pendientes menores al 11%, las pérdidas de N mineral por escorrentía no superan el 1% del fertilizante aplicado. *E. deglupta* incrementó la demanda evaporativa total del sistema y la absorción de nitratos durante la estación seca, dando como resultado una menor lixiviación de nitratos en este sistema. En los suelos de cafetales a pleno sol y bajo *E. deglupta*, la lixiviación de nitratos fue de 103 y 62 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ a 1,2 m y de 25 y 15 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ a 2 m de profundidad, respectivamente. Las concentraciones de N-NO₃ a 2 m de profundidad y en nacientes de microcuencas fueron muy similares y muy bajas (alrededor de 1,5 mg L⁻¹). La fuerte reducción en las concentraciones de N-NO₃ con la profundidad del suelo se debe a su adsorción por los coloides del suelo en las profundidades por debajo de 80 cm.

Nitrogen dynamics in a *Coffea arabica* - *Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica

Key words: Agroforestry; coffee; nitrate sorption; N leaching; N mineralisation; Ultisol.

ABSTRACT

Under full sun coffee (*Coffea arabica*) and coffee shaded with *Eucalyptus deglupta*, on an Ultisol in the southern zone of Costa Rica (600 masl and 2700 mm annual rainfall), soil N mineralisation and nitrification, N losses from the systems through run-off and leaching and soil NO₃ accumulation were evaluated. Both systems received 180 kg N ha⁻¹ as chemical fertilizer in 2002 (the study year). Soil N mineralization and nitrification in the 0-20 cm soil layer were not affected by *E. deglupta*. With gentle slopes (less than 11%), mineral N loss in surface runoff was very low (less than 1% of the fertilizer input). As a result of increased total evaporative demand and nitrate absorption by *E. deglupta* during the dry season, nitrate lixiviation was lower under coffee with *E. deglupta*. At 1.2 m soil depth, nitrate lixiviation was 103 and 62 kg N-NO₃ ha⁻¹ and at 2 m 25 and 15 kg N-NO₃ ha⁻¹ under full sun coffee and coffee with *E. deglupta*, respectively. NO₃-N concentrations in soil solution at 2 m soil depth and in spring water were similar and low (about 1.5 mg L⁻¹). The strong decrease in NO₃-N concentrations with depth in percolated water and the low N leaching were mainly attributed to nitrate adsorption in soil layers below 80 cm depth.

¹ Basado en Ávila Reyes, HE. 2002. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta*, en la zona sur de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

² M.Sc. en Agroforestería Tropical, CATIE. 2002. Correo electrónico: avilah2002@yahoo.com

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

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

⁵ Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correos electrónicos: fjimenez@catie.ac.cr; jbeer@catie.ac.cr

⁶ CIRAD, Montpellier, Francia. Correo electrónico: robert.oliver@cirad.fr

INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica*) es un cultivo de gran importancia económica en Costa Rica. Durante la década de los 70, el café se plantó en asocio con árboles de sombra. Sin embargo, en los años siguientes, con la introducción de cultivares de café más productivos (p. ej. Caturra), el uso de la sombra ha disminuido y el uso de fertilizantes químicos nitrogenados se ha incrementado (Babbar y Zak 1995). En zonas de baja altitud, donde la sombra es necesaria para tener condiciones micrometeorológicas apropiadas para el café, recientemente se ha impulsado la introducción de árboles maderables de valor comercial y de rápido crecimiento, como *Eucalyptus deglupta* (eucalipto), sustituyendo los árboles de sombra leguminosos de uso tradicional, como *Erythrina poeppigiana* (poró) e *Inga* spp. (guaba). Como árbol de sombra, *E. deglupta* puede competir con la planta de café por agua, especialmente en zonas con estación seca marcada (Kanten 2004) y por nutrientes, especialmente el N, por falta de fijación atmosférica, por absorción o, quizás, reduciendo la mineralización. Sin embargo, la inclusión de *E. deglupta* aumenta la producción de biomasa y la demanda evaporativa del sistema, lo que podría reducir las pérdidas de nitratos por lixiviación y la contaminación nitríca de los recursos hídricos (Renderos 2001). En este estudio, se compararon la tasa de mineralización del N del suelo, las pérdidas de N por escorrentía y lixiviación, la acumulación de nitratos en el perfil del suelo y la contaminación del agua freática por nitratos en cafetales a pleno sol y bajo *E. deglupta* en fincas comerciales de café, en una zona baja del sur de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El estudio se realizó en la finca Santa Fe, en el cantón de Pérez Zeledón (9°15' - 9°18'N, 83°31' - 83°36'O; 600 a 700 msnm; 2740 mm año⁻¹, 170 días de lluvia de abril a diciembre; temperatura media 23,5 °C; humedad relativa promedio de 87,5%). El suelo es un Ustic Palehumult de textura franco-arcillo-arenosa en las capas superficiales y arcillosa en las capas profundas (Renderos 2001). El contenido de C del suelo es de 6% y el pH varía entre 4,6 y 6,6. La finca mide 1000 ha y ocupa la parte alta de varias microcuencas.

Se escogieron dos plantaciones comerciales adyacentes (café con *E. deglupta* y café a pleno sol) con el café establecido en 1988 y la misma historia y manejo. *E. deglupta* fue plantado en 1995. En ambas plantaciones se escogió una parcela experimental de 1 ha. Dado que no había otro par de parcelas con las mismas condicio-

nes, no fue posible tener repeticiones. Desde el establecimiento del café en 1988 hasta el año 2000, se aplicaron 260 kg N ha⁻¹ año⁻¹, distribuidos en tres aplicaciones. En el 2001, se aplicaron 124 kg N ha⁻¹, distribuidos en dos aplicaciones. En el 2002, la fertilización en las parcelas experimentales fue de 180 kg N ha⁻¹ (Nutrán: 16,5% de N-NO₃ y 16,5% de N-NH₄) y 135 kg ha⁻¹ de KCl, distribuidos en dos aplicaciones.

Metodología de toma de datos

La lluvia diaria se midió con un pluviómetro instalado a campo abierto entre las parcelas de café a pleno sol y café con *E. deglupta*. Para medir la escorrentía superficial se establecieron en cada parcela experimental, las cuales tienen pendientes de menos de 7%, tres subparcelas de escorrentía (1 m de ancho, 1 m de largo y 15 cm de altura). Las láminas metálicas para delimitar estas subparcelas se enterraron a 7,6 cm de profundidad. En la parte inferior de cada subparcela se instaló un recipiente de 30 litros de capacidad, para recolectar el agua de escorrentía después de cada lluvia. Además, se instalaron en otra parcela de café con *E. deglupta*, con pendientes de 33 a 50%, otras tres subparcelas de escorrentía, similares a las antes mencionadas (en esta última parcela, únicamente se midió escorrentía y pérdidas de N en la escorrentía).



Parcelas de escorrentía de 1 m² para medir pérdidas de N mineral por escorrentía superficial en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe de la Zona Sur de Costa Rica (foto: Héctor Ávila).



Lisímetros para medir lixiviación de nitratos a 30, 60, 120 y 200 cm de profundidad en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe de la Zona Sur de Costa Rica (foto: Jean Michel Harmand).



Tubos de incubación para medir la mineralización del N *in situ* en cafetales (*Coffea arabica*) en la finca Santa Fe en la Zona Sur de Costa Rica (foto: Héctor Ávila).

En las dos parcelas principales se tomaron muestras de suelo, compuestas por tres submuestras, cada 10 cm hasta 200 cm de profundidad, para determinar su contenido de humedad. Se midió la humedad gravimétrica y la densidad aparente para convertir la humedad gravimétrica en humedad volumétrica. Se calculó el drenaje diario del suelo de abril a noviembre del 2002, utilizando la ecuación general del balance hídrico (Maraux y Rapidel 1990) descrita por el modelo siguiente (todas las variables tienen que ser expresadas en la misma unidad; p. ej., mm):

$$\text{Lluvia} = \text{ETR} + \text{Escorrentía} + \text{Drenaje} + \Delta S$$

Donde:

ETR = evapotranspiración.

Escorrentía = cantidad de agua que se perdió por escorrentía superficial.

Drenaje = lámina de agua que se perdió de una determinada profundidad del perfil del suelo, por percolación, cuando la humedad sobrepasa la capacidad del campo.

ΔS = variación del contenido de humedad del suelo entre dos fechas.

La capacidad de campo se determinó como la lámina de agua presente en el suelo el 29 de mayo (los días previos hubo suficiente lluvia). La ETR en el sistema café con *E. deglupta* se evaluó para el período del 2 de abril al 21 de mayo, utilizando la variación de humedad de suelo entre estas fechas y asumiendo una ausencia de drenaje, debido a que no cambió la humedad en las capas profundas (180-200 cm). Ese valor de ETR (4,4 mm día⁻¹) se utilizó para calcular el drenaje diario durante el período de estudio; se usó el mismo valor de ETR para ambos sistemas porque la plantación a pleno sol nunca cumplió con estos criterios en ningún período (siempre

hubo cambios temporales en la humedad del suelo en la capa 180-200 cm).

La mineralización se evaluó incubando muestras de suelo en condiciones de campo durante períodos de cuatro semanas, desde marzo hasta octubre del 2002. En cada sistema, se sacaron con un barreno cilíndrico de 8 cm de diámetro 24 muestras de suelo de manera aleatoria, en la capa 0-20 cm (seis pares dentro de las hileras y seis pares entre hileras de café) a 40 cm de las plantas de café y de 1,5 – 2,5 m de los árboles. Las muestras se tomaron en pares, a 30 cm de distancia entre cada una. Una de ellas se conservó en hieleras hasta su traslado al laboratorio para determinar el contenido inicial de N-NO₃ y N-NH₄ en el suelo. La otra muestra de cada par fue introducida cuidadosamente, para su incubación en el campo, en tubos PVC de 30 cm de largo y 8 cm de diámetro. El extremo inferior de los tubos fue sellado por una malla metálica de 100 μm, para impedir el acceso de las raíces a la muestra, pero sí permitir un equilibrio de la humedad entre el suelo y la muestra. Los tubos de incubación fueron enterrados en el mismo punto de muestreo, a la misma profundidad (0-20 cm). Quedaron 10 cm del tubo proyectados sobre la superficie del suelo; previamente, esta parte fue perforada en su costado con cuatro agujeros de 1 cm de diámetro para permitir la entrada de aire, necesario para la actividad de bacterias aeróbicas. El extremo superior de cada tubo se cubrió con un tapón de plástico para proteger la muestra del efecto de la lixiviación por lluvias.

Se midió la concentración de nitratos en la solución del suelo mediante cápsulas porosas lisimétricas. En cada parcela principal (café a pleno sol y café con *E. deglupta*), se instalaron las cápsulas a 30, 60 y 120 cm de profundidad, con seis repeticiones por parcela, y a 200 cm de profundidad con cuatro repeticiones por parcela. Esos lisímetros se colocaron de forma paralela a las hileras de café, entre 40 y 50 cm de los cafetos, con una distancia entre ellos de 30 a 40 cm, y en el caso de la parcela con *E. deglupta*, a una distancia entre 1,5 y 2,5 m de los árboles. Las extracciones del agua de lixiviación se realizaron cada 10 días, entre el 6 mayo y el 28 de noviembre del 2002. Para determinar las pérdidas de nitratos, se multiplicó su concentración en la solución del suelo por el drenaje calculado durante el mismo período. Asimismo, se realizaron 13 muestreos de agua durante el período de marzo a septiembre del 2002, en ocho nacientes alrededor de las parcelas estudiadas, en seguimiento a muestreos hechos por Renderos (2001). La determinación de N-NH₄ y N-NO₃ en muestras de

agua provenientes de nacientes y lisímetros se realizó mediante colorimetría.

La densidad aparente se consideró para evaluar la acumulación de nitratos en el perfil del suelo al final de la estación seca (02/04/2002). En cada parcela principal, se tomaron tres muestras de suelo a profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y luego cada 20 cm hasta los 200 cm. Cada muestra estaba compuesta por tres submuestras, identificando un punto aleatorio para la primera submuestra y tomando las siguientes a 50 cm de distancia una de la otra. Este muestreo se hizo a 40 cm de la línea de café y, en el caso de la parcela con *E. deglupta*, a 1,5 m de un árbol.

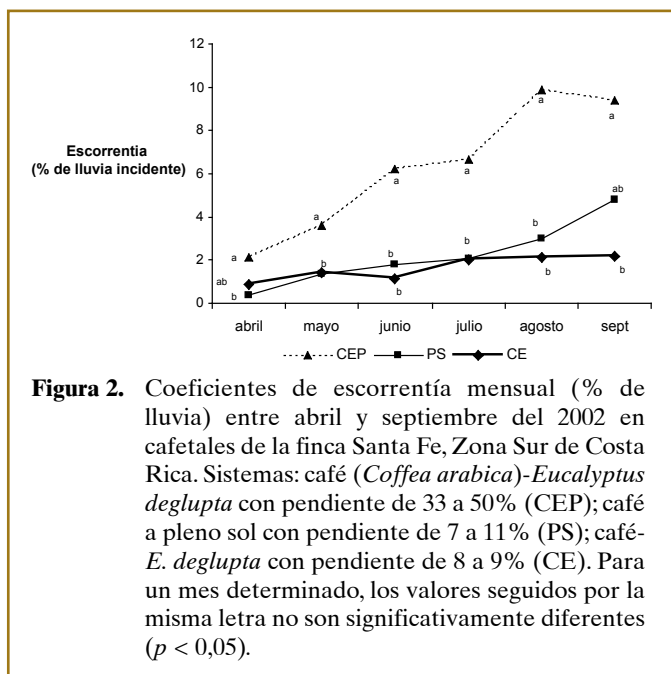
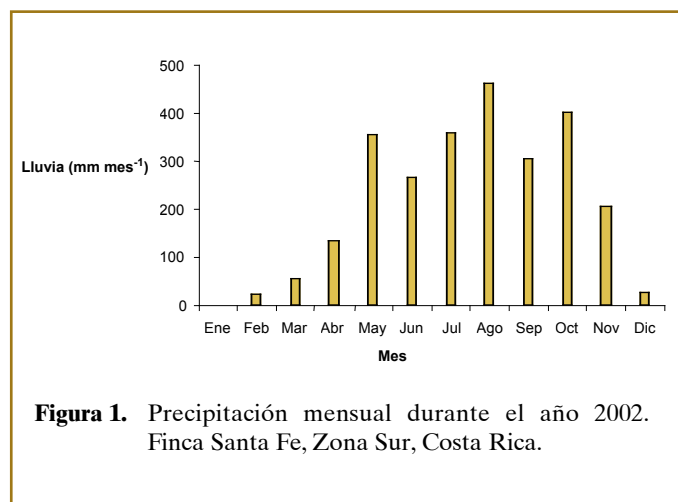
Para la extracción de las formas inorgánicas de N del perfil del suelo, se utilizó el K_2SO_4 2N. La determinación de $N-NH_4$ y $N-NO_3$ se realizó por destilación, en extractos de suelo, utilizando MgO como base débil y aleación Devarda como agente reductor. También se midió el pH y el contenido de Cl^- de los suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujos de agua

Lluvia y escorrentía

Durante el período de estudio, la precipitación inició en febrero y fue muy baja hasta el mes de abril. Entre mayo y noviembre, la precipitación varió entre 200 y 460 mm mes^{-1} (Fig. 1). Los coeficientes de escorrentía (% de lluvia) fueron bajos al inicio de las lluvias y se incrementaron con el progreso de la época lluviosa (Fig. 2), como fue observado por Vahrson y Palacios (1993).



Considerando todo el período de abril a septiembre, la escorrentía fue de 2,5 y 1,7% del total de la lluvia en café a pleno sol y bajo *E. deglupta*, respectivamente (con pendientes menores al 11%). Este coeficiente aumentó significativamente al 6,8% en el sistema café-*E. deglupta* con pendiente entre 33 y 51%. Una mayor intercepción de lluvia y capa de mantillo en el sistema con *E. deglupta* puede explicar la mayor escorrentía en cafetales sin árboles en parcelas con la misma pendiente. Se observó una relación lineal positiva entre la pendiente del terreno y el coeficiente de escorrentía en el sistema café-*E. deglupta* ($r^2 = 0,92$ y $p = 0,002$). Lal (1989) encontró coeficientes de escorrentía de 2,4 a 4,9% en cultivos en callejones de maíz con *Leucaena* spp. y *Gliricidia sepium*, con pendiente del 7%. Romero (1991) encontró valores de 3,7 y 5,4% en parcelas de café con obras de conservación de suelos, mientras que Tineo (1993) y Lebeuf (1993) encontraron coeficientes de escorrentía menores al 1% en parcelas con cultivos en callejones (15% de pendiente).

Variación en la humedad del suelo

El contenido de agua en la capa de suelo (0-120 cm) al final de la estación seca fue significativamente mayor en el sistema de café a pleno sol que bajo sombra de *E. deglupta* (Fig. 3). Sin embargo, la humedad del suelo fue muy similar en ambos sistemas aproximadamente un mes después del inicio de las lluvias (21/05/02). Durante la estación lluviosa (muestreos del 22 de agosto y 29 de septiembre), se marcó una tendencia consistente de mayor humedad bajo el sistema café con *E. deglupta*

en todo el perfil del suelo (aunque no se presentaron diferencias significativas). La reducción de la humedad del suelo en el sistema café bajo sombra de *E. deglupta* durante la estación seca pudo haberse debido a incrementos en la evapotranspiración por los árboles (Kanten *et al.* 2004). En cambio, la situación se invirtió en la estación lluviosa, posiblemente debido a una mayor infiltración a través de las raíces de los árboles, por la presencia de más mantillo y por la menor densidad existente en los horizontes profundos del suelo en el sistema café-*E. deglupta*, lo cual permite una mayor capacidad de retención de agua.

Drenaje interno del suelo

Las pérdidas de agua pluvial por percolación durante el año 2002 fueron estimadas en 1265 mm en café-*E. deglupta* y en 1331 mm en café a pleno sol. La diferencia entre los dos sistemas se debe principalmente a la escorrentía y la recarga de la reserva de agua del suelo. En todo caso, hay que tener presente que se utilizó el mismo valor de ETR para ambos sistemas y para todo el período evaluado, lo que podría sobrestimar o subestimar el valor diario real de ETR y, con ello, el resultado del balance hídrico. Sin embargo, estos valores son pequeños y su precisión no afecta el total de drenaje acumulado durante el período de estudio.

Dinámica del nitrógeno

Mineralización del N del suelo

No se presentaron diferencias significativas de mineralización entre cafetales a pleno sol y café con *E. deglupta* (133 y 147 kg N ha⁻¹, respectivamente; Fig. 4). Al final de la estación seca e inicio de la estación lluviosa (primer período de incubación, marzo-abril), la tasa neta de mineralización fue negativa o nula (Fig. 4b). Eso concordó con una disminución de nitratos en el suelo (Fig. 4a). Durante este período se humectó el suelo en los tubos de incubación, pero con un contenido inicial de N-NO₃ de entre 10 y 25 mg kg⁻¹ de suelo, pudieron ocurrir pérdidas en forma de N₂O por desnitrificación (Gutiérrez 2002) y, posiblemente, inmovilización del N mineral. En contraste, Bertsch (1995) y Reynolds-Vargas *et al.* (1994) encontraron mineralización al inicio de las lluvias. Las diferencias entre sistemas en la concentración de nitratos del suelo (Fig. 4a) al final de la estación seca e inicio de la lluviosa se atribuyen a una mayor absorción de nitratos por el sistema café-*E. deglupta*, descartando la posibilidad de que existiera un efecto inhibitorio por los árboles de *E. deglupta* sobre la mineralización del N del suelo (Fig. 4b).

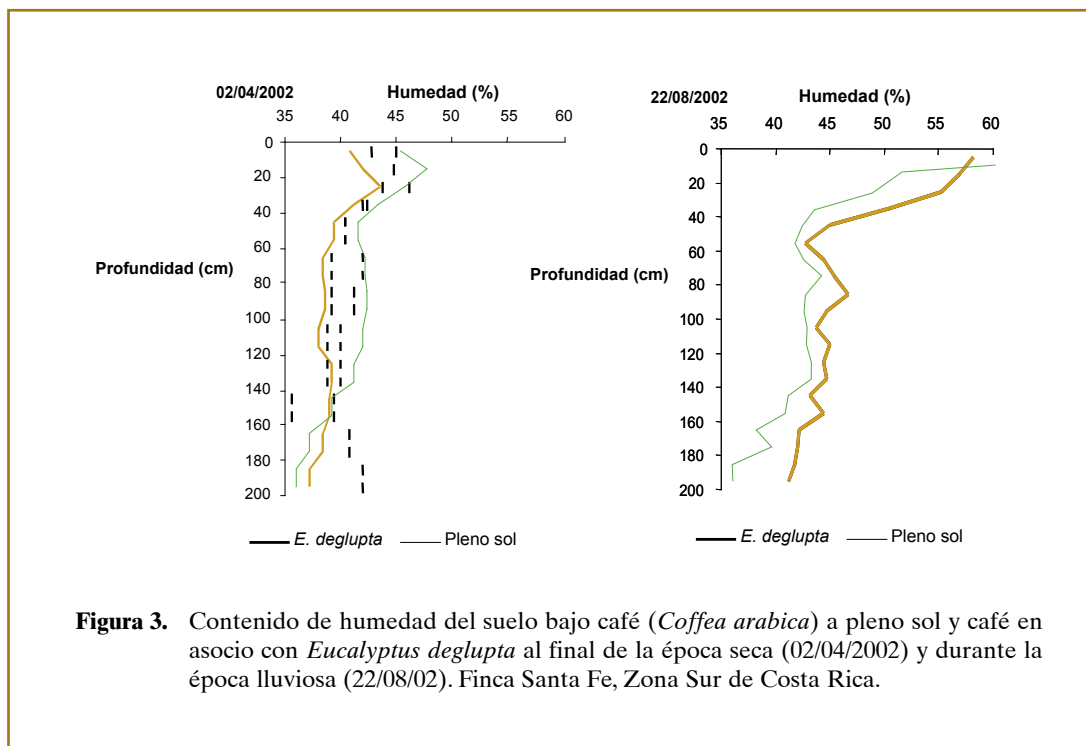
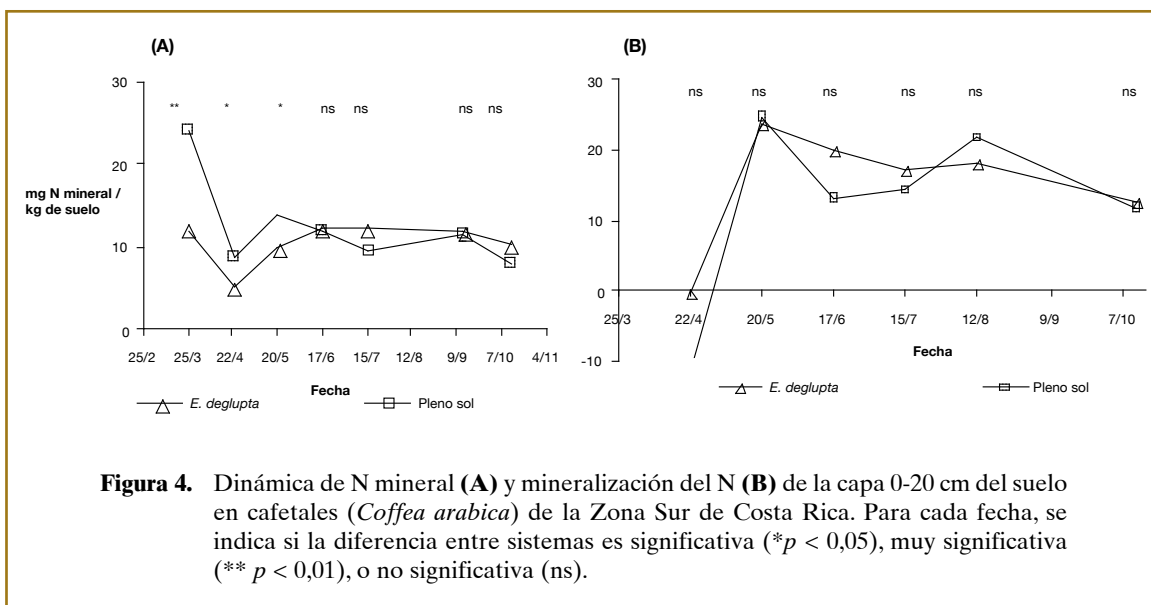


Figura 3. Contenido de humedad del suelo bajo café (*Coffea arabica*) a pleno sol y café en asocio con *Eucalyptus deglupta* al final de la época seca (02/04/2002) y durante la época lluviosa (22/08/02). Finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica.



Pérdidas de N mineral por escorrentía

Las pérdidas de N mineral en el agua de escorrentía fueron bajas con relación al aporte del fertilizante (Cuadro 1). Las pérdidas en el sistema café-*E. deglupta* con mayor pendiente (33-51%) fueron significativamente mayores que a pleno sol y bajo *E. deglupta* con pendientes de 8 a 9%. El efecto de la fertilización en el aumento de la concentración de N mineral en el agua de escorrentía superficial ocurrió en los primeros ocho días subsiguientes a la aplicación (Ávila 2002).

Lindau *et al.* (1996) encontraron que alrededor del 3-4% del N aplicado en campos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Inceptisoles fue removido por la escorrentía superficial. Estrada *et al.* (2001) encontraron pérdidas del 3% en cultivos de hortalizas en Vertisoles. En general, las pérdidas de N del suelo por escorrentía son pequeñas, excepto cuando esta se produce poco después de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados (Ramos y Ocio 1992).

Concentración de nitratos en nacientes de microcuencas

Las concentraciones de N-NO₃ en las nacientes fue muy estable durante el período de marzo del 2001 (Renderos 2001) a septiembre del 2002, con un valor promedio de 1,5 mg L⁻¹, excepto en dos fechas (mayo del 2001 y agosto del 2002), cuando se presentaron valores de 2,5 y 5,7 mg L⁻¹, respectivamente. Todos estos valores son inferiores a los indicados como críticos para el agua de consumo humano, según lo estipulado por la Organización Mundial de la Salud.

Concentraciones de nitratos en la solución del suelo

Las mayores concentraciones de nitratos en la solución del suelo se presentaron en ambos sistemas a los 30 y 60 cm de profundidad (Fig. 5), una zona explorable por las raíces del café y de los árboles. A las profundidades de 120 cm, y especialmente 200 cm, las concentraciones fueron muy bajas. Esto indica que existen mecanismos de retención de nitratos en estos suelos que impiden su rápida lixiviación y explicaría las bajas concentraciones de nitratos encontradas en aguas de las nacientes de la finca.

Cuadro 1. Aporte de fertilizante nitrogenado y pérdidas de N mineral por escorrentía superficial, en cafetales (*Coffea arabica*) con y sin *Eucalyptus deglupta* en la finca Santa Fe, Zona Sur, Costa Rica (abril-septiembre, 2002)

Sistema	Pendiente del terreno (%)	Aporte de (kg N ha ⁻¹) ^(a)	Pérdida	
			(kg N ha ⁻¹)	% del aporte
Café- <i>E. deglupta</i>	33 a 51	233	4,70	2,0 a ^(v)
Café- <i>E. deglupta</i>	8-9	233	0,76	0,3 b
Café a pleno sol	7-11	233	0,71	0,3 b

^(a) Aporte restringido a las parcelitas de escorrentía.

^(v) Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

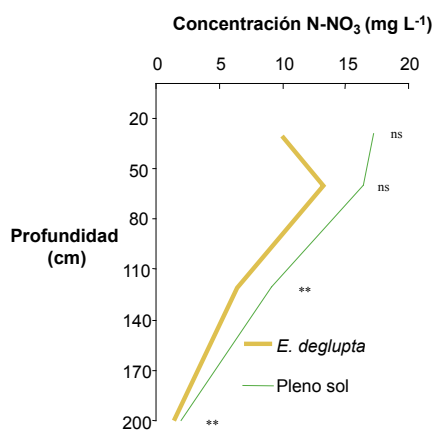


Figura 5. Concentraciones medias de nitratos en la solución del suelo en cafetales (*Coffea arabica*) con y sin *Eucalyptus deglupta* de la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica, entre 06/06/2002 y 28/11/2002. ns = no significativo; ** = $p \leq 0,01$.

Pérdidas de nitratos del suelo por lixiviación

Las pérdidas de nitratos por lixiviación fueron mayores en el sistema de café a pleno sol que con *E. deglupta* (Cuadro 2). Esta diferencia resulta de la concentración de nitratos en el agua de lixiviación, que fue un poco más alta en el sistema café a pleno sol (lo que podría resultar de una menor absorción por este sistema).

A la profundidad de 60 cm del suelo se estimó una lixiviación anual de nitratos superior al aporte anual de fertilizante. A los 120 cm ocurrió una lixiviación del 57% del aporte anual del fertilizante en el café a pleno sol y 34% bajo sombra de *E. deglupta*. La reducción en el flujo de nitratos de 120 a 200 cm se atribuye más a adsorción por los coloides del suelo que a la extracción por las plantas.

Acumulación de N mineral en el suelo

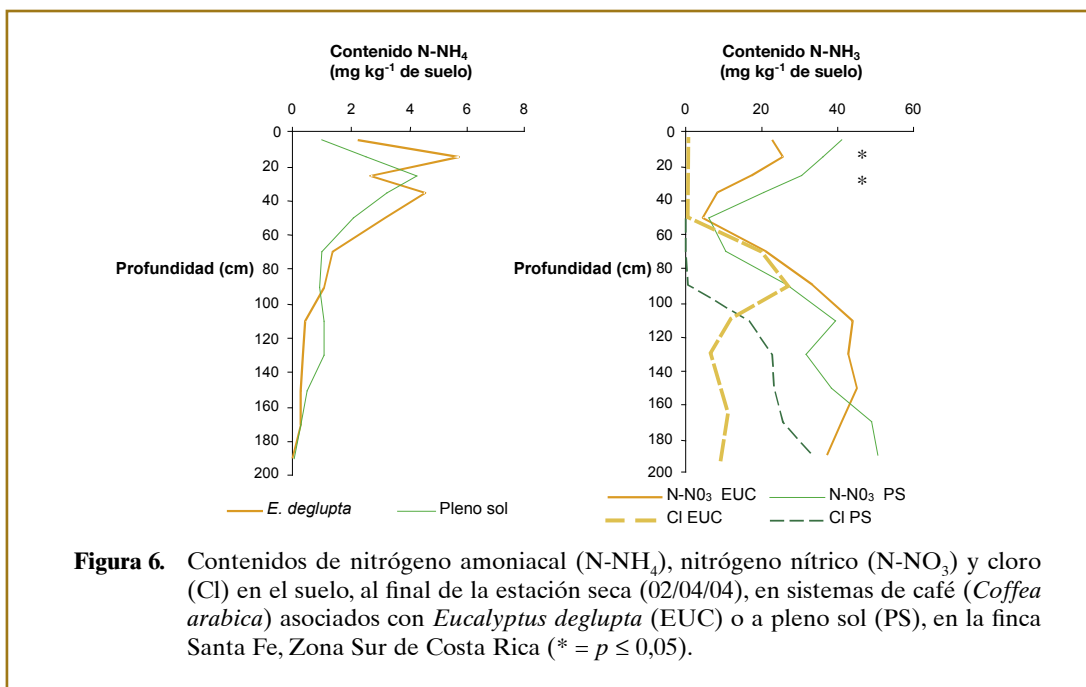
Al fin de la estación seca no hubo diferencias significativas en los contenidos de amonio del suelo entre los dos sistemas (Fig. 6). El amonio se acumuló (hasta 6 mg de N-NH₄ kg⁻¹ de suelo) en los primeros 50 cm del suelo. En las capas inferiores, las concentraciones fueron muy bajas (< 0,22 mg N kg⁻¹ de suelo). Se observó una acumulación de nitratos en la capa superficial del suelo (0-40 cm) con valores para café a pleno sol significativamente mayores que bajo *E. deglupta*. Los contenidos disminuyeron hasta 50 cm de profundidad en ambos sistemas. Por debajo de 120 cm, los valores se mantuvieron altos (promedios de 50 mg N kg⁻¹ de suelo), sin diferencias significativas entre los sistemas. Los altos contenidos de cloruros en el suelo, por debajo de 60 cm de profundidad en el caso de café con *E. deglupta* y por debajo de 90 cm en café en pleno sol, corresponden a los aportes de KCl en la fertilización de los años anteriores.

Los contenidos de nitratos y de cloruro se incrementan al mismo tiempo por debajo de los 60 cm. Eso significa que la acumulación de nitratos proviene, al menos en parte, de la fertilización nitrogenada. La acumulación de nitratos arriba de los 50 cm sería más un resultado de la mineralización del N orgánico del suelo, que ocurrió al final de la estación lluviosa y durante la estación seca.

En la capa de suelo 0 a 60 cm en café a pleno sol se acumularon cerca de 50 kg de N ha⁻¹ más que bajo *E. deglupta* (Cuadro 3). En la capa de 120 a 200 cm se acumularon más de 330 kg N ha⁻¹ en ambos sistemas, lo que representa 4 y 7 veces la diferencia de flujo anual de nitratos entre las profundidades de 120 y 200 cm en café a pleno sol (78 kg N ha⁻¹ año⁻¹) y bajo *E. deglupta* (46 kg N ha⁻¹ año⁻¹), respectivamente.

Cuadro 2. Flujos de nitratos a diferentes profundidades en el suelo en cafetales (*Coffea arabica*) con y sin *Eucalyptus deglupta* en la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica (2002)

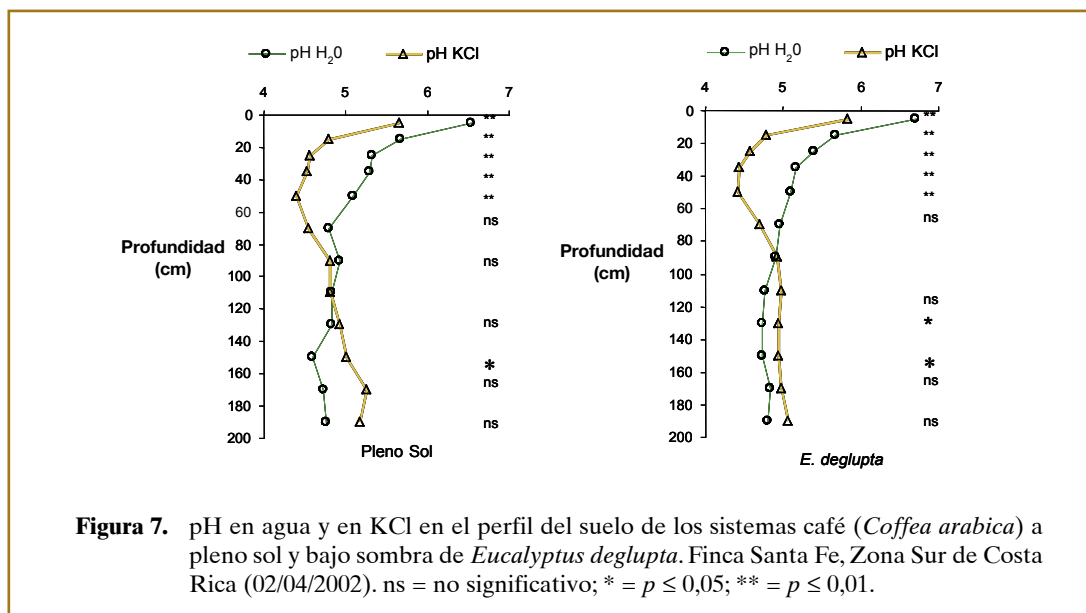
Profundidad (cm)	kg N-NO ₃ ha ⁻¹ año ⁻¹		% del N aplicado	
	Café a pleno sol	Café- <i>E. deglupta</i>	Café a pleno sol	Café- <i>E. deglupta</i>
60	250	186	139	103
120	103	62	57	34
200	25	15	14	8



En la Fig. 7 se muestran los valores de pH en el suelo en extracciones con agua y con KCl. Se observa que el pH en agua disminuye de 6,7 en la superficie hasta 4,8 a la profundidad de 200 cm. A la profundidad de 100 cm, se llegó al punto de carga cero (PCC); es decir, el valor por encima del cual el complejo coloidal del suelo tiene un valor negativo (pH KCl < pH agua). Por debajo de esta profundidad, el complejo coloidal tiene valor positivo (pH KCl > pH agua), razón por la cual puede retener aniones intercambiables (Fassbender y Bornemisza 1987).

Cuadro 3. Acumulación de N-NO₃ en el perfil del suelo de cafetales (*Coffea arabica*), con y sin *Eucalyptus deglupta*, al final de la estación seca en la finca Santa Fe, Zona Sur de Costa Rica (02/04/02)

Profundidad (cm)	Café a pleno sol (kg N-NO ₃ ha ⁻¹)	Café- <i>E. Deglupta</i> (kg N-NO ₃ ha ⁻¹)
0-60	115	68
60-120	164	200
120-200	331	330
Total	610	598



CONCLUSIONES

En pendientes menores ($\leq 11\%$), las pérdidas de agua por escorrentía fueron similares en sistemas de café a pleno sol y bajo *E. deglupta* ($\approx 2\%$). El contenido de agua en el suelo al final de la estación seca fue mayor en el cafetal a pleno sol, probablemente debido a que *E. deglupta* incrementó la demanda evaporativa total del sistema. Por el contrario, la humedad del suelo fue mayor en el sistema café con *E. deglupta* en medio de la estación lluviosa. La presencia de *E. deglupta* (siete años de edad) como árbol de sombra en plantaciones de café no afectó la tasa de mineralización y nitrificación del N del suelo. La concentración de nitratos en la solución del suelo tendió a ser menor en café con *E. deglupta*, lo que indica que los árboles reducen la disponibilidad de N para el café, pero también reduce la contaminación de aguas freáticas por lixiviación. La lixiviación de nitratos a 1,2 m de profundidad fue de 103 y 62 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ en café a pleno sol y bajo *E. deglupta*, respectivamente, y de 25 y 15 kg N-NO₃ ha⁻¹ año⁻¹ a 2 m de profundidad. La diferencia de flujos (lixiviación de nitratos) entre esas profundidades es atribuida a procesos de adsorción por los coloides del suelo, reduciendo con ello la contaminación de los recursos hídricos. Entre 1,2 y 2,0 m de profundidad del suelo, se encontró una acumulación de N mineral mayor a los 300 kg ha⁻¹, que es equivalente al flujo de nitratos (acumulado) de cuatro a siete años.

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 R, HE. 2002. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deglupta* en la zona sur de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 87 p.
- Babbar, LI; Zak, DR. 1995. Nitrogen loss from coffee agroecosystem in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *Journal of Environmental Quality* 24 (2): 227-233.
- Bertsch, F. 1995. Fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR, Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo. 45 p.
- Estrada B, MA; Nikolskii, GI; Reyes, FG; Etchevers B, JD; Palacios V, OL. 2001. Balance del nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo. *Terra* 20: 189-198.
- Fassbender, HW; Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA. 420 p. (Colección de Libros y Materiales Educativos no. 81).
- Gutiérrez, CM. 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. 62 p.
- Kanten van, RF; Beer, J; Schroth, Göt; Vaast, P. 2004. Interacciones competitivas entre *Coffea arabica* y árboles maderables de rápido crecimiento en Pérez Zeledón, Turrialba. *Agroforestería en las Américas* 11(41-42). *Este volumen*.
- Lal, R. 1989. Agroforestry system and soil surface management of a Tropical Alfisol. *Agroforestry Systems* 8: 97-111.
- Lebeuf, LTI. 1993. Sistema agroforestal con *Erythrina fusca* Lour. en tierras de ladera: efectos en la pérdida de suelo, escorrentía superficial y producción de cultivos anuales. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 112 p.
- Lindau, CW; Delaune, RD; Alford, DP. 1997. Monitoring nitrogen pollution from sugarcane runoff using ¹⁵N analysis. *Water, Air and Soil Pollution* 89: 389-399.
- Maraux, F; Rapidel, B. 1990. La simulación del balance hídrico: aplicación para la determinación de fechas de siembra. Proyecto Regional de Agrometeorología, CATIE-CIRAD-ORSTOM. Turrialba, CR, CATIE. 31 p.
- Ramos, MC; Ocio, JA. 1992. La agricultura y la contaminación de las aguas por nitrato. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, ES. 32 p. (Hojas divulgadoras no. 7/92).
- Renders V, 2001. Efectos residuales de nitratos de suelos agrícolas sobre la contaminación del agua en microcuencas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 51 p.
- Reynolds-Vargas, JS; Ritcher, DD; Bornemisza, E. 1994. Environmental impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized Andisols in the Valle Central of Costa Rica. *Soil Science* 157(52): 289-299.
- Romero Del Valle, EG. 1991. Evaluación de las medidas demostrativas de conservación de suelo en la finca "La Selva", Cuenca del Río Tuis, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 106 p.
- Tineo, AL. 1993. Erosión hídrica, lixiviación y balance de N, P, K, Ca, y Mg, en una rotación frijol-maíz con prácticas agronómicas de conservación de suelos, en tierras de ladera, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 134 p.
- Vahrson, WG, Palacios, G. 1993. Datos complementarios de erosión, escorrentía y pérdidas de nutrientes en Cerbatana de Puriscal: resultados 1991. *Agronomía Costarricense* 17(2): 95-98.