

Destino del nitrógeno aplicado en un cultivo de sésamo (*Sesamum indicum* L.) en un suelo degradado de Paraguay

Fate of nitrogen applied to a sesame crop (*Sesamum indicum* L.) in a degraded soil of Paraguay

Alba Liz González y Héctor Javier Causarano Medina*

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay. Facultad de Ciencias Agrarias. *Autor para correspondencia: hector.causarano@agr.una.py

Rec.: 24.02.2014 Acep.: 19.05.2014

Resumen

En Paraguay el cultivo de sésamo (*Sesamum indicum* L.) es cada vez menos productivo debido a la degradación de la fertilidad de los suelos. La fertilización nitrogenada eleva los rendimientos en suelos pobres en este nutriente, pero su eficiencia aún no es bien conocida. En el estudio se utilizó la técnica isotópica para determinar el destino del N aplicado a un cultivo de sésamo. En el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, en un diseño experimental de bloques completos al azar se estudió la eficiencia en la aplicación de N como fertilizante y abono verde (lupino + avena negra) con y sin laboreo del suelo. El N fue aplicado como urea-¹⁵N (5% enriquecimiento) a razón de 50 kg/ha. Los resultados mostraron contenidos (kg/ha) de N en granos (84), materia seca (104) y suelo hasta 15 cm (938). El 20% del N aplicado fue absorbido por la planta, 42% permaneció en el suelo y 38% no pudo contabilizarse y posiblemente se perdió por lixiviación y volatilización. La técnica de dilución isotópica fue útil para determinar el destino del N aplicado, pero sobreestimó el aporte de los abonos verdes en el contenido de N en el suelo.

Palabras clave: *Sesamum indicum*, técnicas isotópicas, ¹⁵N

Abstract

In Paraguay sesame (*Sesamum indicum* L.) is becoming less productive due to degradation of soil fertility. Nitrogen fertilization increases yields in soils poor in this nutrient, but little is known about its efficiency. In the study the isotopic technique was used to determine the fate of N applied to a crop of sesame. In the experimental field of the Facultad de Ciencias Agrarias of the Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, in a randomized complete block experimental design, it was studied the efficiency in the application of N fertilizer and green manure (lupine + black oat) with and without tillage. Nitrogen was applied as urea-¹⁵N (5% enrichment) at 50 kg/ha. The results showed content (kg/ha) of N in grains (84), dry matter (104) and soil to 15 cm (938). The plant absorbed 20% of the applied N, 42% remained in the soil and 38% could not be accounted for and possibly it was lost by leaching and volatilization. The isotope dilution technique was useful in determining the fate of applied N, but overestimated the contribution of green manures on the soil N content.

Key words: *Sesamum indicum*, isotopic technique, ¹⁵N

Introducción

En Paraguay existen aproximadamente 268,000 pequeñas fincas, de menos de 20 ha que ocupan 1.7 millones de hectáreas, representan 14% de la superficie agrícola del país y generan el 35% del valor total de la producción agrícola. El nivel tecnológico de estas fincas es bajo y se caracteriza por el empleo de herramientas manuales y equipos de tracción animal, con uso de fertilizantes y cultivares mejorados. En estos sistemas los principales cultivos son maíz, algodón, mandioca o yuca, poroto o frijol y sésamo que crecen durante el ciclo estival, permaneciendo el suelo en barbecho durante el invierno (MAG, 2010).

El sésamo (*Sesamum indicum* L.) es el principal cultivo económico en las pequeñas fincas, con aproximadamente 110,000 ha sembradas. Su productividad ha disminuido en los últimos años, alcanzando rendimientos, promedio, de 700 kg/ha (MAG, 2011), debido principalmente a problemas de fertilidad en el suelo, como consecuencia de la degradación, laboreos excesivos, altas tasas de erosión y falta de suministro de nutrientes (González y Causarano, 2012). Se estima que solamente el 2% de la superficie ocupada por pequeñas fincas utilizan buenas prácticas de manejo de suelo, que incluyen la siembra directa con rotación de cultivos y aplicación de abonos verdes, no obstante, el uso de fertilizantes químicos es aún muy limitado debido a las dificultades económicas de los agricultores y al relativo alto costo de los fertilizantes.

La fertilización en el cultivo de sésamo muestra resultados diversos, en algunos casos son positivos en determinados sitios y con diferentes variedades y negativos en otras situaciones, lo que muestra la complejidad y la dificultad para entender las relaciones suelo-planta en el cultivo de esta pedaliaceae (Silva, 2005). Atta y Van Cleemput (1988) en suelos arenosos con la aplicación de 238 kg/ha de N en forma de fertilizante químico, encontraron que las plantas de sésamo sólo recuperaron 12% del N aplicado, 13% permaneció en el suelo y el 75% restante se perdió por lixiviación, denitrificación y volatilización.

Los estudios con fertilizantes nitrogenados enriquecidos con el isótopo estable ^{15}N

muestran que entre 20% y 87% del N aplicado es recuperado en la primera cosecha, entre 10% y 35% es retenido en el suelo y entre 1% y 35% se pierde por diferentes medios (Kumar y Goh, 2000; Urquiaga, 2000). Las variaciones en estos rangos son debidas a las diferentes fuentes y niveles de fertilización, variaciones del clima, prácticas de manejo y tipo de cultivo (Kumar y Goh, 2000). El uso de técnicas utilizando fertilizantes enriquecidos con isótopos estables es apropiado para estudiar la dinámica del N en el sistema suelo-planta-atmósfera, ya que permite conocer el destino del N aplicado como fertilizante y determinar la eficiencia de su uso (Bowen y Zapata, 1991; Pino, 2010).

El objetivo principal de este trabajo fue determinar el destino del N aplicado en un cultivo de sésamo mediante una técnica isotópica, utilizando urea marcada con ^{15}N , con el fin de generar información que contribuya a un uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, reducir costos de producción y evitar impactos ambientales negativos.

Materiales y métodos

Localización y manejo del cultivo

El experimento se condujo en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, en San Lorenzo, Paraguay, (25° 19' 35" S y 57° 31' 18" O), durante el periodo comprendido entre julio de 2010 y marzo de 2011; la temperatura media fue 22 °C y la precipitación acumulada 1413 mm (FCA/UNA, 2011).

El suelo es Rhodic Paleudult (Soil Survey Staff, 2010) con textura superficial arenosa, baja fertilidad y propiedades físicas y químicas limitantes, estructura en bloques subangulares pequeños y débilmente desarrollados (López *et al.*, 1995), características típicas de suelos degradados en fincas pequeñas históricamente utilizados para cultivos de maíz, soja y sésamo. En este caso el cultivo previo al sésamo fue maíz, con sistema convencional de preparación del suelo.

El pH(1:1) en el suelo era 6.3, 1% materia orgánica (oxidación húmeda con dicromato de potasio), 8.9 mg/kg de fósforo (extracción con Mehlich-1 y determinación por colorimetría) y concentraciones de Ca, Mg y K de 1.6, 0.6

y 0.1 cmol_c/kg, respectivamente (extracción con acetato de amonio y determinación por absorción atómica). Estos valores corresponden a un pH ligeramente ácido y niveles bajos de materia orgánica (M.O), fósforo (P), Ca, Mg y K.

Las parcelas experimentales eran de 5 m x 4 m y el diseño experimental fue bloques completos al azar, con ocho tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en la combinación de los factores fertilización nitrogenada, abono verde y laboreo, y dos niveles (con y sin) que fueron comparados por sus efectos en los contenidos de N en el suelo y la planta (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos evaluados en el experimento para determinar el destino del nitrógeno aplicado a un cultivo de sésamo.

Tratamientos	Abono verde	Laboreo	Fertilización nitrogenada
1	Sí	Sí	Sí
2	Sí	Sí	No
3	Sí	No	Sí
4	Sí	No	No
5	No	Sí	Sí
6	No	Sí	No
7	No	No	Sí
8	No	No	No

Los tratamientos con abonos verdes consistieron de una mezcla de lupino + avena negra (50 kg/ha de semilla de avena y 80 kg/ha de semilla de lupino) sembradas en la primera quincena de junio de 2010 en forma manual, colocando las semillas en surcos separados a 0.3 m con 3 cm de profundidad. Los abonos verdes fueron secados con herbicida en la última semana de setiembre de 2010 y permanecieron sobre la superficie en las parcelas sin laboreo y en las parcelas con laboreo fueron incorporados en el suelo.

Estas últimas recibieron dos pases de arado, el primero 15 días antes de la siembra del cultivo de abono verde y la segunda 5 días antes de la siembra de sésamo, seguidas de dos pases de rastra. Las parcelas sin laboreo no recibieron preparación del suelo, pero es importante señalar que estas parcelas habían sido sometidas a laboreo continuado durante los últimos 20 años previos al experimento.

Las parcelas con fertilización nitrogenada recibieron 20 kg/ha de N en la siembra y

30 kg/ha en la etapa de desarrollo, 40 días después de la emergencia. En microparcelas no confinadas (3 m x 2 m) se utilizó urea ¹⁵N con 5% de enriquecimiento y en la superficie restante de la parcela se empleó urea comercial. Además, todas las parcelas recibieron 60 kg/ha de P₂O₅ en forma de superfosfato triple y 40 kg/ha de K₂O en forma de cloruro de potasio, aplicados en su totalidad en el momento de la siembra.

Los fertilizantes fueron depositados en surcos abiertos, paralelos a las líneas de siembra, con aproximadamente 8 cm de profundidad y cubiertos con suelo. El sésamo, variedad Escoba, fue sembrado en la primera quincena de octubre de 2010 en hileras espaciadas 0.8 m. Las semillas fueron depositadas a 3 cm de profundidad, a razón de 4 kg/ha y se hizo raleo manual cuando las plantas tenían entre 4 y 8 hojas para alcanzar entre 8 y 12 plantas/m. Las parcelas se mantuvieron libres de malezas mediante limpiezas periódicas; no se presentaron plagas ni enfermedades.

La cosecha tuvo lugar en la primera semana de marzo de 2011, cuando aproximadamente el 90% de las plantas presentaban coloración amarillenta, las hojas se desfoliaron naturalmente y las primeras cápsulas maduras empezaron a abrir. El área útil por parcela consistió de tres hileras centrales de 1 m de longitud. Las plantas fueron cosechadas manualmente a ras del suelo y colocadas en bolsas con buena aireación. Las muestras se secaron hasta peso constante en un galpón con bajo contenido de humedad (< 30%) y temperatura aproximada de 40 °C.

Evaluaciones y variables de medición

En el momento de la cosecha se midieron las variables siguientes: tramo de carga (porción de las ramas que contienen cápsulas), número de cápsulas por rama, número de ramas por planta, número de plantas cosechadas, altura de plantas, número de semillas por cápsula y peso de 1.000 semillas.

Inmediatamente después de la cosecha se tomaron muestras de suelo de cada microparcela, en la profundidad de 0 a 15 cm; para el efecto se utilizó una barrena y se tomaron cuatro submuestras a una distancia de 20 cm del surco de siembra. Estas submuestras

fueron mezcladas para formar una muestra compuesta que fue secada al aire, tamizada y conservada herméticamente.

Las muestras de suelo, granos y materia seca de tallos, hojas y cápsulas fueron molidas, envasadas y enviadas al Laboratorio del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en Seibersdorf, Austria, para los análisis isotópicos de N por la técnica de espectrometría de masa.

Una vez obtenidos los datos de laboratorio se utilizaron las fórmulas (1), (2) y (3) (Zapata, 1990) para cuantificar el N derivado del fertilizante (*Nddf*) y el N derivado del suelo (*Ndds*). Para cuantificar el N derivado del abono verde se compararon las cantidades de N en las parcelas que recibieron este tipo de abono vs. las parcelas que no lo recibieron, en cada sistema de laboreo.

$$Nddf (\%) = \frac{\% \text{ átomo exceso planta}}{\% \text{ átomo exceso fertilizante}} * 100 \quad (1)$$

$$Nddf (\text{kg/ha}) = N \text{ Total } (\text{kg/ha}) * \frac{\% N}{100} \quad (2)$$

$$Ndds (\%) = 100 - Nddf (\%) \quad (3)$$

También fueron calculadas la cantidad total de N, la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) y la eficiencia agronómica (EA), según las ecuaciones siguientes:

$$N \text{ Total } (\text{kg/ha}) = MST (\text{kg/ha}) * \frac{\% N}{100} \quad (4)$$

$$EUN (\%) = \frac{Nddf (\text{kg/ha})}{\text{Dosis de N aplicado}} * 100 \quad (5)$$

$$EA (\text{ kg de grano/kg de fertilizante}) = \frac{Y_n - Y_o}{\text{Dosis de N aplicado}} \quad (6)$$

donde, *MST* = materia seca total (kg/ha); *Y_n* y *Y_o* son los rendimientos (kg/ha) del cultivo fertilizado y del tratamiento control, respectivamente.

Los valores obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza, la separación de medias se realizó con la prueba de Tukey al 5%

de probabilidad de error. Para los análisis estadísticos se utilizó el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

Resultados y discusión

Rendimiento de grano y parte aérea de la planta

El rendimiento de grano, la MS de la parte aérea y el índice de cosecha de sésamo variaron, respectivamente, entre 1.8 y 2.34 t/ha, 8.35 y 1.06 t/ha y 0.20 y 0.25. En estas variables no se encontraron respuestas a la fertilización, al laboreo o al uso de abonos verdes, en forma individual o combinada (Cuadro 2).

El rendimiento promedio de grano fue 2.12 t/ha y superior a los encontrados en suelos arenosos de baja fertilidad con la aplicación de abonos verdes de cobertura por Vera (2011) (0.95 t/ha), Macchi Leite (2003) (0.6 t/ha) y Vázquez (2009) (2.1 t/ha). Este rendimiento fue mayor que el promedio nacional de 0.61 t/ha de grano (MAG, 2011), lo que posiblemente fue debido a las menores pérdidas de granos al momento de la cosecha en condiciones experimentales, lo que no ocurre en los sistemas comerciales de cultivo y cosecha de sésamo que alcanzan 50% (Embrapa, 2007).

El rendimiento de grano se relacionó de forma significativa con el rendimiento de materia seca y el número de ramas/planta ($R^2 = 0.60$, $P < 0.05$), de la forma siguiente:

$$\text{Rendimiento de grano (kg/ha)} = 150 + 0.15 \text{ MS (kg/ha)} + 92.6 * \text{No. ramas por planta}$$

El promedio de producción de MS de la parte aérea de la planta, incluyendo los granos, fue de 9.43 t/ha, valor que coincide con los reportados por Embrapa (2001). El promedio del índice de cosecha fue de 0.23, es decir, que de cada 100 kg/ha de MS producida por la planta, 23 kg son transformados en grano.

La falta de significancia en el rendimiento de grano y las demás variables productivas de sésamo analizadas por efecto de los tratamientos (fertilización nitrogenada, laboreo y uso de abonos verdes) se debió, posiblemente, a la aplicación de una dosis única de N, igual a la que normalmente aplican los agricultores (Arriél *et al.*, 2007). Parwar *et al.* (1993) encontraron un aumento significativo en la producción de semillas de sésamo, como resultado de la aplicación de 120 kg/ha de N;

Cuadro 2. Rendimiento de grano, MS de la parte aérea e índice de cosecha de sésamo por efecto del laboreo (L), y la aplicación abonos verdes (AV) y fertilización nitrogenada (N).

Tratamiento	Rendimiento grano	MS parte aérea	Índice de Cosecha
	(t/ha)		
L	2.336	10.654	0.22
L, N	2.105	8.507	0.25
Testigo	1.962	8.347	0.23
N	2.392	10.461	0.24
AV, L	2.193	9.072	0.25
AV, L, N	2.224	9.920	0.23
AV	1.924	9.774	0.20
AV, N	1.797	8.737	0.20
DMS (P < 0.05)	ns	ns	ns

DMS: diferencia mínima significativa; ns: no significativo.

Cristaldo y Paredes (2003) obtuvieron rendimientos máximos con la aplicación de 73 kg/ha de N y Jara y Ruiz Díaz (2005) con la aplicación de 60 kg/ha de N, lo que sugiere una amplia variación en la respuesta del cultivo a la fertilización, dependiendo del suelo, el ecosistema y la dosis aplicada.

Sá (1993) observó que en la etapa inicial del sistema siembra directa (sin laboreo) es necesario aplicar dosis más altas de N debido a la intensificación del proceso de inmovilización por los microorganismos en el suelo como respuesta a la mayor oferta de carbono orgánico en el sistema; por esta razón para el manejo de la fertilización nitrogenada en sistemas de siembra directa normalmente se recomienda aplicar dosis de N entre 10 y 30% mayores que las empleadas en sistemas convencionales de manejo (Ceretta, 1997).

Como se mencionó anteriormente, el lote experimental fue manejado bajo laboreo convencional en los 20 años previos al ensayo, de tal manera que los beneficios de la no-labranza aún no habían influido sobre los rendimientos de granos de sésamo. Según Sá (1993) sólo después de 4 años de implementación del sistema de siembra directa se inicia el restablecimiento del equilibrio de las transformaciones con mayor liberación de N, en la medida que ocurre la reposición de los residuos de cosecha.

La incorporación de MS en el suelo por la mezcla avena negra + lupino como abonos verdes de invierno fue muy baja, si se compara con los resultados de Filippini (2007) quien encontró hasta 4.3 t/ha de MS en condiciones

similares de manejo a las del presente estudio. Estas diferencias fueron debidas a que en este último caso la siembra se hizo en una época diferente a la recomendada para la región Oriental de Paraguay, que corresponde a abril (Florentín *et al.*, 2006). En conclusión, aunque el uso de abonos verdes favoreció el mantenimiento de la humedad en el suelo y el control de malezas, no tuvo efecto sobre la dinámica del N ni mejoró el rendimiento del grano en sésamo.

Contenido de nitrógeno en el grano y en la MS

Entre 74 y 93 kg/ha de N fueron exportados a los granos, lo que concuerda con los resultados de Bascones y Ritas (1961) quienes encontraron 71.74 kg/ha de N en los granos de sésamo. Los contenidos de N total y N derivados del fertilizante, de abono verde o desde el suelo, no fueron diferentes ($P > 0.05$) entre las parcelas con y sin laboreo (Cuadro 3).

El mayor aporte de N en los granos provino del suelo y fue de 57.2 kg, en promedio, para ambos sistemas de laboreo; por otra parte, el aporte de los residuos de abonos verdes fue aproximadamente de 20 kg/ha y el del fertilizante fue sólo de 4.7 kg, es decir, que independiente de la fertilización, la mayor cantidad de N provino del suelo, lo cual coincide con los hallazgos de Lara Cabezas (2005) y destacan la importancia de la incorporación de residuos vegetales que formarán parte de la materia orgánica del suelo y son fuente de N para las plantas.

En la parte aérea de la planta de sésamo el contenido de N varió entre 97 y 110 kg/ha, de estos, aproximadamente 85% provino

Cuadro 3. Contenido total de nitrógeno en granos de sésamo y contribución de la fertilización, el abono verde y los componentes del suelo, con y sin laboreo del suelo.

Laboreo	Total	Del fertilizante	Del abono verde	Del suelo
N (kg/ha)				
Sin	93.2	5.2	25.2	62.8
Con	74.4	4.1	15.7	54.6
DMS (P < 0.05)	ns	ns	ns	ns

del suelo, 9% del abono verde y sólo 5% del fertilizante aplicado. Para esta variable no se observaron diferencias entre las parcelas con y sin laboreo (Cuadro 4).

Contenido de N en el suelo

Al final del ciclo de cultivo de sésamo, sólo 2% del contenido total de N en el suelo provino del fertilizante aplicado (Cuadro 5). Se estima que 40% del N en el suelo se derivó de los abonos verdes; no obstante este valor es sobrestimado ya que la producción de MS de los abonos verdes (avena negra + lupino) fue sólo de 1.8 t/ha. Si se considera que el aporte de N es normalmente de 1.3% de la MS, en este caso este valor correspondería a 23 kg/ha de N, de acuerdo con lo encontrado por González (2011) con la misma combinación de abonos verdes.

Destino del N aplicado como fertilizante

El N aplicado como fertilizante puede tener varios destinos, una parte es absorbida por

las plantas, otra permanece en el suelo formando parte de la M.O. y otra, puede perderse por lixiviación, volatilización o desnitrificación.

En la Figura 1 se muestra el destino del N aplicado como fertilizante en forma de urea en parcelas con y sin laboreo. Se encontró que 68% del N aplicado fue recuperado en la planta y el suelo. Atta y Van Cleemput (1988) al aplicar 238 kg/ha de N observaron una recuperación de 12% del fertilizante aplicado, 13% permaneció en el suelo y 75% se perdió en diferentes formas.

Eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado

La eficiencia agronómica (EA) promedio en las parcelas sin y con abonos verdes fue de 21.3 kg de grano por cada kg de N aplicado (Figura 2), siendo superior a los demás tratamientos (P < 0.05), lo que indica que el uso de abonos verdes y la no remoción del suelo favorecen la eficiencia en la utilización de fertilizantes nitrogenados. Los bajos valores obtenidos se

Cuadro 4. Contenido total de nitrógeno en la materia seca de la parte aérea de sésamo y contribución del fertilizante, el abono verde y el suelo, con y sin laboreo.

Laboreo	Total	Del fertilizante	Del abono verde	Del suelo
N (kg/ha)				
Sin	97.3	5.0	7.3	85.0
Con	109.7	6.2	12.0	91.5
DMS (P < 0.05)	ns	ns	ns	ns

DMS: diferencia mínima significativa; ns: no significativo

Cuadro 5. Contenido total de nitrógeno en el suelo y contribución del fertilizante, del abono verde y del suelo, con y sin laboreo.

Laboreo	Total	Del fertilizante	Del abono verde	Del suelo
N (kg/ha)				
Sin	870.3	24.2	207.6	638.5
Con	1006.5	18.0	572.0	416.5
DMS (P < 0.05)	ns	ns	154	ns

DMS: diferencia mínima significativa; ns: no significativo.

deben al escaso incremento en el rendimiento de los granos de sésamo, por efectos de la aplicación de fertilizante nitrogenado. Zapata (2008) reporta valores de EA normales entre

10 y 25 kg de grano por cada kg de N aplicado.

En la Figura 3 se presenta la eficiencia de utilización del nitrógeno (EUN) que varió entre 18 y 26%. No se hallaron diferencias

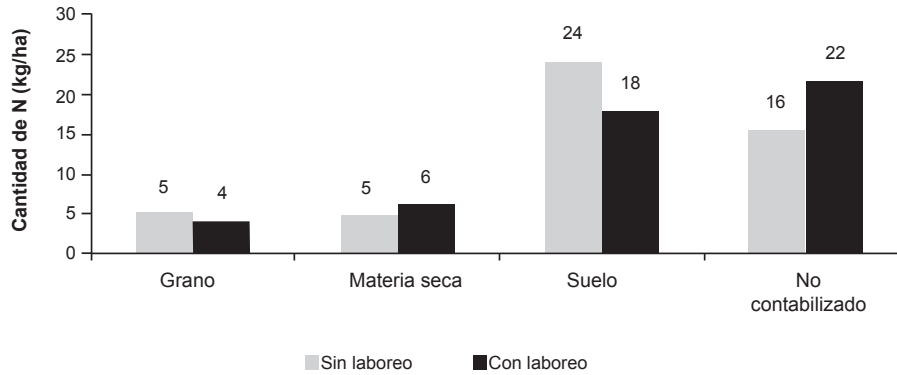


Figura 1. Destino del nitrógeno aplicado como fertilizante en parcelas experimentales sin y con laboreo.

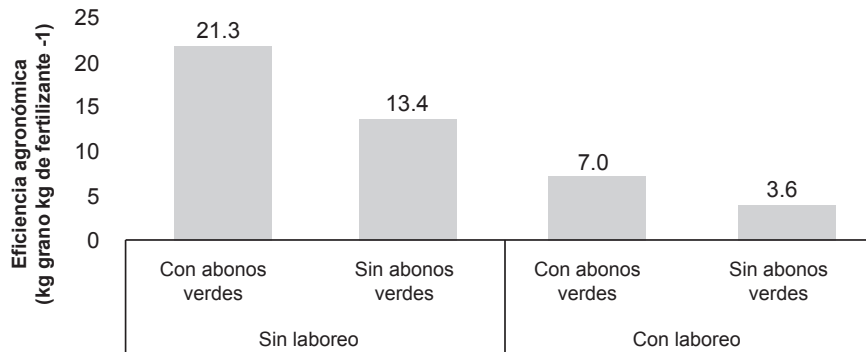


Figura 2. Efectos del abono verde y el laboreo en la Eficiencia Agronómica de sésamo.

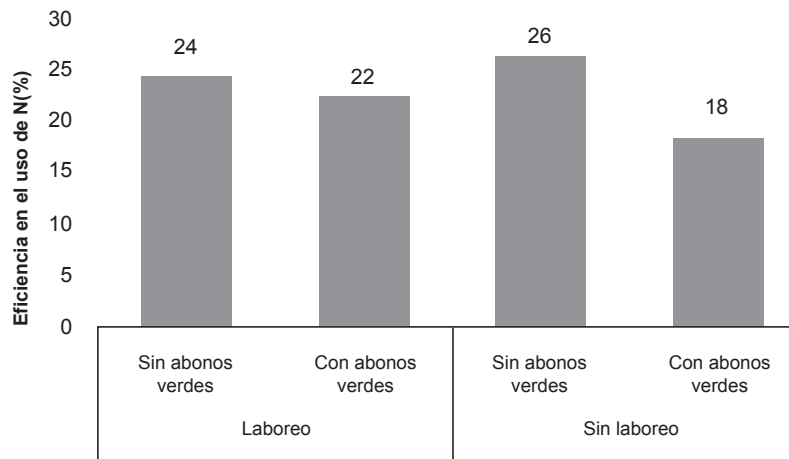


Figura 3. Efectos del abono verde y el laboreo en la eficiencia en el uso del nitrógeno.

($P > 0.05$) por efecto de los tratamientos, es decir, no se observó respuesta al laboreo ni al uso de abonos verdes, en forma individual o combinada. Los valores obtenidos fueron inferiores a los reportados por Pino *et al.* (1996), quienes en Ultisoles de la novena región de Chile observaron una EUN de 39% cuando aplicaron urea a variedades de trigo, no obstante los valores en el presente estudio se encuentran en el rango de recuperación de fertilizantes nitrogenados (19 - 89%) en suelos agrícolas de América Latina (Urquiaga, 2000).

Conclusiones

- La técnica de dilución isotópica fue útil para determinar el destino del N aplicado, pero sobreestimó el aporte de los residuos de los abonos verdes en el contenido de N en el suelo.
- En promedio, 9% del N fue recuperado en el grano de sésamo, 11% en el follaje, 42% en el suelo y el restante 38% no pudo ser cuantificado y probablemente se perdió.
- La eficiencia del uso de N varió entre 18% y 26%. El uso de abonos verdes de cobertura mejoró la eficiencia agronómica del fertilizante nitrogenado en suelos degradados, por tanto su inclusión en la rotación de cultivos permite la reducción de la aplicación de N en los sistemas productivos de las pequeñas fincas en Paraguay.

Agradecimientos

Al Proyecto ARCAL RLA/5/052 y a la Comisión Nacional de Energía Atómica de Paraguay por proveer los insumos necesarios para los trabajos de campo y financiar los análisis de laboratorio. Al profesor-doctor Takashi Muraoka, y al doctor Karuppan Sakadevan por el soporte técnico.

Referencias

- Arriel, N. H.; Firmino, P. T.; Beltrão, N. E.; Soares, J. J.; Araújo, A. E.; Silva, A. C. y Ferreira, G.B. 2007. A cultura do gergelim. Brasília. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa). Informação Tecnológica-Coleção Plantar. 72 p.
- Atta, S. K. y Van Cleemput, O. 1988. Field study of the fate of labeled fertilizer ammonium applied to sesame and sunflower in a sandy soil. *Plant Soil* 107:123 - 126.
- Bascones, L. y Ritas, J. 1961. La nutrición mineral del ajonjolí. *Agron. Trop. Ven.* 2:17 - 32.
- Bowen, G. D. y Zapata, F. 1991. Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants. Stable isotopes in plant nutrition, Soil fertility and environmental studies. IAEA. Viena. Pp 349 - 362.
- Ceretta, C. A. 1997. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia/milho no sistema plantio direto. Santa Maria. UFSM, Departamento de Solos. p. 112 - 124.
- Cristaldo, M. y Paredes, J. Q. 2003. Producción de *Sesamum indicum* L. influenciada por dosis de diferentes fertilizantes en suelo franco arcilloso. *Inv. Agr.* 5(2):25 - 29.
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; y Robledo, C. W. 2011. Infostat versión 2008. Grupo Infostat. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 336 p.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria). 2007. A cultura do gergelim. Brasília, BR. 72 p.
- Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria). 2001. O agronegócio do gergelim no Brasil. Campina Grande. 348 p.
- FCA/UNA (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción). 2011. Anuario Meteorológico. San Lorenzo, Paraguay. 48 p.
- Filippini, L. E. 2007. Evaluación de abonos verdes de invierno en suelos degradados del Departamento Central. Tesis Ing. Agr.. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción. Departamento de Producción Agrícola. San Lorenzo, Paraguay. 30 p.
- Florentín, M. A.; Peñalva, M; Calegari, A.; y Derpsch, R. 2006. Abonos verdes y rotación de cultivos en siembra directa: Pequeñas propiedades. San Lorenzo, Paraguay. Ministerio de Agricultura y Ganadería - MAG. 84 p.
- González, H. A. 2011. Evaluación de plantas de cobertura de otoño invierno en un Ultisol bajo siembra directa en el Departamento de Caazapá. Tesis Ing. Agr. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial. San Lorenzo, Paraguay. 65 p.
- González, A. L. y Causarano H. J. 2012. Uso de la técnica isotópica para determinar el destino del nitrógeno aplicado a un cultivo de sésamo. En: Leguizamón C. y Causarano H. (eds.). II Congreso Nacional de Ciencias Agrarias. III Seminario Nacional de Energías Renovables. Trabajos Presentados. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay. p. 408 - 410.

- Jara, M. E. y Ruíz Díaz, R. 2005. Efecto de fósforo y nitrógeno en el rendimiento de sésamo *Sesamum indicum* L., sobre un Alfisol en el distrito de Horqueta. *Inv. Agr.* 7(2):42 - 47.
- Kumar, K. y Goh, K. M. 2000. Crop residues and management practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Adv. Agron.* 68:197 - 319.
- Lara Cabezas, W. A. 2005. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade do milho em sistema de plantio direto e solo preparado. *Ciência Rural* 34(4):1005 - 1013.
- López, O.; González, E.; De Llamas, P.; Molinas, A.; Franco, E.; García, S.; y Ríos, E. 1995. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la región oriental del Paraguay. MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). Asunción, Paraguay. 246 p.
- Macchi Leite, G. 2003. Rendimiento del sésamo (*Sesamum indicum* L.) variedad Escoba en suelos degradados, en el sistema de siembra directa. Tesis Ing. Agr. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Departamento de Producción Agrícola. 66 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). Dirección General de Planificación: Unidad de Estudios Agroeconómicos. 2010. Diagnóstico de Rubros Agrícolas. Asunción. 115 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2011. Diagnóstico de Rubros Agrícolas. Asunción. 116 p.
- Parwar, P. R.; Pathi, R. A.; Khanvilkar, S. A.; Mahadkar, U. N.; y Bhagat, S. B. 1993. Effect of different levels of nitrogen and phosphorous on yield and quality of *sesamum*. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 18:310 - 328.
- Pino, I.; Peyrelongue, A.; y Buneder, M. 1996. Evaluation of nitrogen sources (^{15}N) on three wheat varieties in an andisol and an ultisol. Isotopic parameters and fertilizer use efficiency. *Chile. Agr. Tec.* 56(3):187 - 192.
- Pino, I. 2010. Técnicas isotópicas en estudios de suelos. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Biblioteca Digital de la Universidad de Chile. (Disponible en http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronomicas/miscelaneasagronomicas38/C15.html).
- Sá, J. C. 1993. Manejo da fertilidade do solo no plantio direto. Fundação ABC. 96 p.
- Silva, E. C. 2005. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N) da uréia, do milho e da crotalaria pelo milho sob semeadura direta em solo de cerrado. Tese Doutor. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo. 111 p.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11 ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington D.C. 338 p.
- Urquiaga, S. 2000. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en los principales cultivos anuales. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa). *Agrobiología*. Rio de Janeiro, Brasil. p 31 - 49.
- Vázquez Gómez, P.R. 2009. Fertilización nitrogenada y su efecto en la producción de sésamo (*Sesamum indicum* L.), en un Alfisol de Escobar, Departamento de Paraguari. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial. 38 p.
- Vera, H. 2011. Efecto de la fertilización orgánica, organomineral y mineral en el sésamo (*Sesamum indicum* L.) sobre siembra directa. Tesis Ing. Agr. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Departamento de suelos y Ordenamiento Territorial. 60 p.
- Zapata, F. 1990. Field experimentation in isotope-aided studies. Use of Nuclear Techniques in Studies of Soil-Plant Relationships. Training Course Series No. 2, IAEA, Viena. p. 35 - 40.
- Zapata, F. 2008. Guidelines on Nitrogen Management in Agricultural Systems: Introduction to nitrogen management in agricultural systems. IAEA (International Atomic Energy Agency) Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. Viena. 243 p.