

Eficiencia agronómica de fuentes de fertilizantes marcados con ^{15}N en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*)¹

Freddy S. Contreras^{2*}, Fernanda L. Mendes³, Rafael Otto⁴, Gean C.S. Matias⁵, Pablo J. Ghiberto⁶ y Paulo C. O. Trivelin⁷

Las plantas de arroz tienen la capacidad de absorber nitrógeno en forma de amonio, nitrato y amida (urea). Sin embargo, cuando el nitrógeno se aplica en forma amoniacal, se produce la absorción y la incorporación directa de amoníaco-N en las formas orgánicas en la planta (cadenas cortas de aminoácidos y enzimas). El uso eficiente de N es importante para aumentar la producción de cultivos anuales como el arroz, pero los fertilizantes nitrogenados pueden contaminar el medio ambiente si no se utilizan en la dosis adecuada y se aplican correctamente. El experimento se basó en el principio de dilución isotópica, y se llevó a cabo en un invernadero en el Centro de Energía Nuclear en Agricultura (CENA / USP) de Brasil, en el 2006. Los tratamientos correspondieron a las fuentes de nitrógeno: (1) $\text{CO}(^{15}\text{NH}_2)_2$, (2) $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y (3) K^{15}NO_3 en una dosis de 100 mg kg^{-1} de N del suelo (Entisoles) que tenía baja fertilidad, alta acidez y alta saturación de aluminio. El principal objetivo fue evaluar la eficiencia de las fuentes de nitrógeno y comprobar la cantidad de N proveniente de diferentes fuentes de fertilizante en el cultivo de arroz. Los resultados indican que el número de hijos por planta, evaluado 30 días después de la siembra, fue superior con urea en comparación con las demás fuentes de N. La aplicación en forma de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ reporta un 80.32 % de N en la parte aérea en relación a la planta entera, lo que representa un incremento del 9.65 % y 10.27 % en relación con la forma de amida y nitrato, respectivamente. El nitrógeno proveniente de los fertilizantes (Nppf) en la parte aérea de la planta de arroz, fue superior cuando se utilizó el $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y no difirió de la aplicación del K^{15}NO_3 . El $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ presentó mayor eficiencia de utilización de N (EUN) que la aplicación de K^{15}NO_3 . Es decir, aumentó la cantidad de masa seca con la misma cantidad de nitrógeno. La eficiencia de utilización de nitrógeno en el cultivo de arroz, según las fuentes de N, fue en el orden: amoniacal > amídica > nítrica.

Palabras claves: Isótopo, ^{15}N , Nppf, arroz

INTRODUCCIÓN

En Brasil, la producción de arroz de secano se realiza principalmente en la región de sabana, donde los suelos tienen una fertilidad baja (EMBRAPA 2003, Fageria 1998), con predominancia de Oxisoles y un bajo contenido de materia orgánica, en el rango de $15\text{-}25 \text{ g kg}^{-1}$.

El N es el cuarto elemento más abundante en la planta, después de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O). En los suelos de sabana, uno de los aspectos más importantes para la producción de cultivos es el manejo de la fertilidad, en particular el N. Este puede ser absorbido por la planta en varias formas: nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y compuestos con bajo peso molecular (Souza

y Fernandes 2006, Furlani 2004, Nasholm *et al.* 1998). Alfaia (1997) estudió en gramínea el destino de dos fuentes de fertilizante nitrogenado, utilizando sulfato de amonio $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y urea $\text{CO}(^{15}\text{NH}_2)_2$ marcada con ^{15}N . Este autor reportó que la urea (60-70 %) fue más eficiente que el sulfato de amonio (44-49 %).

El N es un componente de los aminoácidos, nucleótidos y coenzimas. Consecuentemente, hay cierta relación entre el contenido de N y el crecimiento de las plantas. Uno de los principales síntomas de deficiencia de nitrógeno es amarillamiento o clorosis de las hojas, inicialmente en las más viejas y en forma progresiva a las más

¹ Aceptado para publicación el 1/09/2011

² Investigador Titular del Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; ^{3,4,5,6} Estudiantes de Doctorado Universidad de São Paulo; ⁷ Director del Laboratorio Isotópico del Centro de Energía Nuclear para la Agricultura. *Autor responsable: fcontreras@idiaf.gov.do

nuevas. Esto se debe a la inhibición de la síntesis de clorofila (Epstein y Bloom 2006), resultando principalmente en la reducción de la fotosíntesis y, por consiguiente, en síntesis de aminoácidos esenciales.

El uso de fertilizantes nitrogenados aumenta la producción de cultivos anuales como el arroz (Fageria y Prabhu 2004). Sin embargo, estos fertilizantes pueden contaminar el medio ambiente si no se utilizan en las dosis adecuadas y mediante su correcta aplicación. Las tres formas de fertilizantes nitrogenados (amoniaco, amídico y nítrico) pueden presentar la misma eficiencia, incluso cuando se aplica en cobertura. Experimentos realizados por el Instituto Riograndense de Arroz, en el sur de Brasil, presentaron rendimientos de 2.8, 4.1 y 3.5 Mg ha⁻¹ de grano, cuando las fuentes fueron sulfato de amonio, nitrato de sodio y urea, respectivamente (IRGA 1971).

Los objetivos fueron evaluar la eficiencia de diferentes fuentes de N marcadas con ¹⁵N (urea, sulfato de amonio y nitrato de potasio) y comprobar la cantidad de N en las plantas proveniente del fertilizante (Nppf) en el cultivo de arroz de secano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue instalado en un invernadero en el Centro de Energía Nuclear en Agricultura (CENA/USP) de Piracicaba, Brasil, en el período de agosto a noviembre de 2006. Se colectaron muestras de un suelo Neossolo Quartzarenico con 12 % de arcilla a una profundidad de 0-0.20 m. Las propiedades químicas del suelo se presentan en la Tabla 1. Las muestras se secaron

al aire, se tamizaron en malla de 5 mm y se colocaron en macetas plásticas de 4 kg, donde se cultivó la variedad de arroz (*Oryza sativa* L.) Primavera. Se utilizó el método isotópico con ¹⁵N en un diseño completamente al azar con tres tratamientos: (1) CO(¹⁵NH₂)₂, (2) (¹⁵NH₄)₂SO₄ y (3) K¹⁵NO₃, en una dosis de 100 mg kg⁻¹ de N, con seis repeticiones por tratamiento. Las unidades experimentales fueron constituidas por una maceta plástica conteniendo 4 kg de tierra con seis plantas de arroz.

El suelo fue tamizado antes de la corrección de acidez, de acuerdo al método propuesto por Raij *et al.* (1996), con el objetivo de aumentar la saturación de bases a 60 % utilizando calcáreo dolomítico (24 % CaO y 16 % MgO). Además, se aplicaron 200 mg kg⁻¹ de P en forma de superfosfato triple. El potasio (K) y el azufre (S) se proporcionaron mediante la aplicación de soluciones nutritivas. Teniendo en cuenta que la fuente (¹⁵NH₄)₂SO₄ tiene azufre como nutriente secundario, así como la fuente K¹⁵NO₃ tiene K, se prepararon soluciones con CaSO₄ (utilizadas en el tratamiento con K¹⁵NO₃) y K₂SO₄ (utilizada para tratamientos con CO(¹⁵NH₂)₂) para proporcionar una cantidad similar de estos nutrientes a todos los tratamientos.

Dos semanas después de la siembra se hizo un raleo, dejando seis plantas de arroz en cada maceta. En ese momento, se aplicaron los fertilizantes nitrogenados a una dosis de 100 mg kg⁻¹ de N, disueltos en 100 mL de solución por maceta. Los fertilizantes CO(¹⁵NH₂)₂, (¹⁵NH₄)₂SO₄ y K¹⁵NO₃ mostraron enriquecimiento en átomos de ¹⁵N de 3.02 %, 3.35 % y 2.95 %, respectivamente.

Tabla 1: Resultados promedio de los análisis químicos del suelo

pH	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CIC	V	m	S-SO ₄
	CaCl ₂ g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³					%		mg dm ⁻³
4.2	4.0	4.0	0.3	5.0	2.0	24.0	7.3	7.3	31.3	23.7	49.7	9.0

MO= materia orgánica; P= fósforo, extraído por resina; K= potasio; Ca= calcio; Mg= magnesio; H+Al= acidez potencial; Al= aluminio; SB= suma de bases; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; V= Porcentaje de Saturación de Bases; m= saturación por aluminio; S-SO₄= sulfato.

Después de 20 días de la siembra, se aplicaron 200 ml por maceta de una solución que contenía micronutrientes, a una dosis de 2.5 mg kg⁻¹ de Cu, 4 mg kg⁻¹ de Zn, 2 mg kg⁻¹ de B y 12.5 mg kg⁻¹ de Mg.

La cosecha de las plantas se hizo al final de la fase vegetativa. Las plantas fueron separadas en parte aérea y sistema radicular. La parte aérea (PA) fue obtenida mediante un corte próximo a la superficie del suelo y las raíces se separaron del suelo por tamizado con malla de 1 mm. La parte aérea y el sistema radicular del arroz se empacaron en bolsas de papel y se secaron en estufa de circulación forzada a temperatura de 65 °C hasta peso constante. Posteriormente se obtuvo la masa total en balanza analítica.

Para determinar el contenido de N total y la abundancia de ¹⁵N, todo el material se trituró en molino tipo Wiley, mientras que las muestras de suelo secadas al aire se trituraron en el molino de bolas. Después de la preparación de las muestras, se realizaron determinaciones para N total (mg kg⁻¹) y abundancia de ¹⁵N (% de átomos) en un espectrómetro de masas, con analizador automático de N, modelo ANCA-SL de la PDZ Europa 20-20, de acuerdo con la metodología descrita en Barrie y Prosser (1996).

El N acumulado en la parte aérea, raíces y plantas enteras, en mg por maceta, es resultado del producto de la masa seca producida y el contenido de N en cada compartimento. El N en la planta derivado del fertilizante (Nppf) en mg por

maceta obtenido para la parte aérea, el sistema radicular o plantas enteras se calculó mediante la expresión:

$$Nppf = \frac{a - c}{b - c} \times N_{total} \quad (1)$$

Siendo: *a* = abundancia de ¹⁵N (% átomos) en la parte aérea o raíz de la planta, *b* = abundancia de ¹⁵N (% de átomos) en el fertilizante, *c* = abundancia natural de ¹⁵N (0.368 % átomos) en el suelo, *N_{total}* = N acumulado en la parte aérea o raíz de la planta.

La recuperación (*R*) de N de los fertilizantes en la planta de arroz (en %) se refiere al porcentaje de N aplicado a través de los fertilizantes que se encontró en las plantas de arroz y se determinó por la siguiente ecuación.

$$R = \frac{Nppf}{Dosis} \times 100 \quad (2)$$

La eficiencia de uso del N (EUN), expresada en g MS g⁻¹ de N, fue calculada con la relación de masa seca de la planta entera (g MS por maceta), entre la cantidad total de N acumulado (g N por maceta). Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza en el programa estadístico SAS 8.02 (SAS 2001). Cuando se detectaron diferencias significativas entre medias de los tratamientos (*p* ≤ 0.05), se compararon mediante la prueba de DMS de Fisher (*α* = 0.05).

Tabla 2. Nitrógeno en la planta proveniente del fertilizante (Nppf) en el sistema de radicular, parte, área y la planta entera en mg por maceta en relación a las fuentes de N

Fuentes de N	Nppf mg. por maceta		
	Raíz	Parte aérea	Planta entera
Urea	95.47 a	249.97 b	340.67 ab
Sulfato de amonio	59.47 b	276.10 a	326.11 b
Nitrato de potasio	103.18 a	261.98 ab	361.53 a

Promedios en las columnas seguidas por las mismas letras no son diferentes estadísticamente (DMS de Fisher, 5 %).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa que la cantidad de Nppf en el sistema radicular fue menor cuando se aplicó la fuente de nitrógeno de sulfato de amonio (59.47 mg N por maceta). Las fuentes amónica y nítrica no presentaron diferencias estadísticas, con promedios de 95.47 y 103.18 mg de N por maceta, respectivamente (Tabla 2).

Las diferencias encontradas en Nppf de las raíces sobre el uso de las fuentes de N, puede ser explicado por el hecho de que grandes cantidades de NH_4^+ son tóxicas para las plantas (Epstein y Bloom 2006), ya que puede disipar los gradientes de protones trans-membrana, siendo absorbido y asimilado en los tejidos de las raíces y redistribuido en forma de aminoácidos (Mengel y Kirkby 1987). Los valores elevados Nppf para la fuente de NO_3^- en las raíces, está relacionada con la capacidad de las plantas en acumular el N en la vacuola en forma de NO_3^- , que para su asimilación debe ser obligatoriamente reducido a la forma amoniacal. Esto representa gastos de energía para las plantas (Epstein y Bloom 2006, Bloom *et al.* 1992). En el caso de la urea, muchos autores coinciden en que las plantas pueden absorber las moléculas de bajo peso molecular, lo que no representa gastos de energía para la planta.

Considerando la parte aérea de la planta de arroz, el Nppf fue mayor para la aplicación de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, con 276.10 mg N por maceta, y este presentó un comportamiento igual a la aplicación de K^{15}NO_3 . La aplicación de $\text{CO}(^{15}\text{NH}_2)_2$ tuvo la menor cantidad de N derivado del fertilizante en la parte aérea de la planta de arroz (249.97 mg N por maceta).

Cuando se considera toda la planta, podemos ver que el mayor Nppf fue para la fuente de K^{15}NO_3 , pero esta fuente no fue diferente de $\text{CO}(^{15}\text{NH}_2)_2$ (Tabla 2). Estos resultados sugieren que a pesar del rápido metabolismo del amonio en las plantas de arroz, la fuente nítrica puede proporcionar mayor Nppf debido al "pool" de reserva. Para la fuente de K^{15}NO_3 , se verificó que cuando es bien manejada, en el sentido de evitar pérdidas por volatilización, es posible aumentar la eficiencia de recuperación y con ello aumentar el Nppf en toda la planta. En este caso, se puede considerar que la elección de la fuente y el manejo adoptado son fundamentales para elevar la eficiencia de recuperación de N por las plantas.

Aunque no hubo diferencia entre los tratamientos en la producción de masa seca, considerando la planta entera, la EUN para el $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ fue más eficaz que el K^{15}NO_3 (Tabla 3). Es decir, promovió mayor acumulo de masa seca con la misma cantidad de N, probablemente debido al

Tabla 3. La materia seca (MS), recuperación (R) y eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) de la planta de arroz, dependiendo de las fuentes de nitrógeno (N)

Fuentes de N	MS	R		EUN	
	g por maceta	%		g MS g ⁻¹ N	
Urea	31.76	87.58	ab	76.89	ab
Sulfato de amonio	30.96	85.15	b	78.71	a
Nitrato de potasio	29.43	92.46	a	70.18	b

Promedios en las columnas seguidas por las mismas letras no son diferentes estadísticamente (DMS de Fisher, 5 %).

gasto energético para la transformación de NO_3 a NH_4 , que es la forma incorporada de N en el interior de la planta. La EUN para la $\text{CO}(\text{}^{15}\text{NH}_2)_2$ no difirió estadísticamente del $(\text{}^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ni del K^{15}NO_3 .

Los resultados muestran elevada recuperación de N de los fertilizantes para todas las fuentes, variando de 87 hasta 92 % de recuperación en la planta entera (Tabla 3). El resto del N del fertilizante se recuperó en el suelo, no habiendo así otras fuentes de pérdidas de N, como la volatilización, desnitrificación o pérdidas en la parte aérea. En este estudio esas pérdidas fueron insignificantes, porque los cultivos fueron cosechados al final de la etapa vegetativa del cultivo, cuando son generalmente mínimas. Ellas se producen en mayor número durante la maduración y senescencia de las hojas (Guindo *et al.* 1994).

La fuente $(\text{}^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ promovió una mayor recuperación (72 %) de N en la parte aérea en relación a la fuente de urea (64 %), mientras que el K^{15}NO_3 , presentó una recuperación (67 %) similar a los demás.

Aunque la urea fue aplicada en la superficie, situación que generalmente favorece la pérdida de NH_4 por volatilización de esa fuente de amónica, se observa que la R del N de la fuente urea fue elevada, lo que evidencia que ese proceso no ocurrió. Esto se debió a la irrigación del suelo en las macetas inmediatamente después de aplicar la solución que contenía la urea, así como el mantenimiento de la humedad del suelo, especialmente en las semanas posteriores a la fertilización. Esto, sin duda, mejora la incorporación de la urea en el suelo para reducir las pérdidas por volatilización.

CONCLUSIONES

La utilización de nitrato de potasio y urea en el cultivo de arroz en secano representa la mejor opción de recuperación de nitrógeno aplicado como fertilizantes

La EUN por el cultivo de arroz de secano fue en el orden: $(\text{}^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{CO}(\text{}^{15}\text{NH}_2)_2 > \text{K}^{15}\text{NO}_3$.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Isotopos Estables del Centro de Energía Nuclear para la Agricultura, de la Universidad de Sao Paulo, Brasil, por la disponibilidad de los fertilizantes marcados con ^{15}N y la realización de todos los análisis isotópicos de este experimento. Al Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, por la autorización para realizar este estudio en Brasil. A la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CNPq) por el soporte económico durante nuestra estadía en Brasil.

LITERATURA CITADA

- Alfaia, SS. 1997. Destino de adubos nitrogenados marcados com ^{15}N em amostras de dois solos da Amazônia Central. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 21, n. 3, p. 379-385.
- Barrie, A; Prosser, SJ. 1996. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: Boutton, TW, Yamasaki, S. (Ed.). Mass Spectrometry of soils. New York: Marcel Dekker, p.1-46.
- Bloom, AJ; Sukrapanna, SS; Warner, RL. 1992. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. Plant Physiology 99:1294-1301.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, BR). 2003. Cultivo do arroz de terras altas (en línea). Sistemas de Produção No 1. Goiânia. Consultado 14 mar 2006. Disponible en <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltas/index.htm>.
- Epstein, E; Bloom, A. 2006. Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. 2 ed., Londrina: Editora Planta. 403p.
- Fageria, NK. 1998. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v.2, p.6-16,
- Fageria, NK; Prabhu, AS. 2004. Controle de brusone e manejo de nitrogênio em cultivo de arroz irrigado. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v.39, n.2, p.123-129.
- Furlani, AMC. 2004. Nutrição Mineral. In: Gilberto Barbante Kerbauy. Fisiologia Vegetal. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, v. p. 452.
- Guindo, D; Wells, BR; Norman, RJ. 1994. Accumulation of fertilizer Nitrogen-15 by rice at different stages of development. Soil Sci. Soc. Am. J 58:410-415.

IRGA (Instituto Riograndense do Arroz, BR). 1971. Resultados experimentais e análises estatísticas. Porto Alegre. 7 p. (Mimeografado).

Mengel, K; Kirkby, EA. 1987. Principles of plant nutrition. 4. ed. Berna, International Potash Institute. 687 p.

Nasholm, T; Ekblad, A; Nordin, A; Giesler, R; Hogberg, M; Hogberg, P. 1998. Boreal forest plants take up organic nitrogen. Nature 392:914-916.

Raij, B van; Cantarella, H; Quaggio, JA; Furlani, AMC. 1996. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC. (Boletim Técnico, 100).

SAS (Statistical Analysis System Institute, US). 2001. The SAS-System for Windows. Release 8.02 (TS2M0) (software). SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.

Souza, SR; Fernandes, MS. 2006. Nitrogênio. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 432p.