

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CICLO DEL NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY:  
ESTUDIOS CON TÉCNICAS ISOTÓPICAS Y CONVENCIONALES**

**por**

**Jesús CASTILLO VELÁZQUEZ**

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
*Magíster* en Ciencias Agrarias opción  
Ciencias del Suelo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
(octubre 2018)

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dr. Jorge Hernández, Dra. Lucía Salvo, Dr. Guillermo Siri-Prieto, el 15 de setiembre de 2018. Autor: Ingeniero Agrónomo Jesús Castillo.  
Director: Dr. José Terra, Co-director: Dr. Carlos Perdomo.

## TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN .....	II
RESUMEN .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. MIRADA GENERAL A LA PRODUCCIÓN Y FERTILIZACIÓN N DE ARROZ EN EL MUNDO .....	1
1.2. EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO .....	3
1.2.1. <u>Índices de eficiencia de uso del nitrógeno</u> .....	3
1.2.2. <u>Técnicas isotópicas asociadas a estudios de eficiencia de uso del nitrógeno y nutrición nitrogenada</u> .....	6
1.2.2.1. Enriquecimiento artificial con <sup>15</sup> N.....	6
1.2.2.2. Abundancia natural $\delta^{15}\text{N}$ .....	7
1.2.3. <u>Eficiencia de uso del nitrógeno según el modelo gráfico</u> .....	9
1.3. EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ .....	11
2. <u>IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE APORTE DE N AL CULTIVO DE ARROZ DE URUGUAY</u> .....	16
2.1. RESUMEN.....	16
2.2. SUMMARY .....	17
2.3. INTRODUCCIÓN.....	18
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
2.4.1. <u>Características de los sitios y tratamientos evaluados</u> .....	19
2.4.2. <u>Manejo de los experimentos y determinaciones realizadas</u> .....	20
2.4.3. <u>Análisis estadístico</u> .....	21
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
2.5.1. <u><math>\delta^{15}\text{N}</math> del suelo</u> .....	22
2.5.2. <u>Relaciones entre <math>\delta^{15}\text{N}</math> en planta y <math>\delta^{15}\text{N}</math> en suelo</u> .....	23
2.5.3. <u>Efecto de la fertilización N en el valor de <math>\delta^{15}\text{N}</math> en planta</u> .....	28
2.6. CONCLUSIONES.....	31

2.7. BIBLIOGRAFÍA.....	31
<b>3. <u>EFICIENCIA DE USO DEL N EN EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY I: ESTUDIO</u></b>	
<b><u>NO ISOTÓPICO</u></b> .....	37
3.1. RESUMEN.....	37
3.2. SUMMARY .....	38
3.3. INTRODUCCIÓN.....	39
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	41
3.4.1. <u>Sitios experimentales y tratamientos evaluados</u> .....	41
3.4.2. <u>Manejo de los experimentos, diseño experimental y determinaciones</u> <u>realizadas</u> .....	42
3.4.3. <u>Cálculos realizados</u> .....	43
3.4.4. <u>Análisis estadístico</u> .....	43
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.5.1. <u>Análisis de las respuestas agronómicas de los 12 experimentos</u> .....	44
3.5.2. <u>Efecto de la fertilización N en el rendimiento, absorción de N y en la</u> <u>respuesta en rendimiento de los diferentes sitios y años</u> .....	46
3.5.3. <u>Índices de eficiencia de uso del N calculados</u> .....	49
3.5.3.1. Eficiencia interna de uso del N (EUI).....	49
3.5.3.2. Eficiencia fisiológica de uso del N (EFIS) .....	51
3.5.3.3. Eficiencia de recuperación aparente (ERA).....	52
3.5.3.4. Factor de productividad parcial del N agregado (FPP).....	53
3.6. CONCLUSIONES.....	55
3.7. BIBLIOGRAFÍA.....	55
<b>4. <u>EFICIENCIA DE USO DEL N EN EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY II: ESTUDIO</u></b>	
<b><u>ISOTÓPICO</u></b> .....	60
4.1. RESUMEN.....	60
4.2. SUMMARY .....	61
4.3. INTRODUCCIÓN.....	62
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	63
4.4.1. <u>Diseño experimental, manejo general y tratamientos <sup>15</sup>N evaluados</u> .....	63
4.4.2. <u>Determinaciones realizadas</u> .....	66

4.2.3. <u>Cálculos realizados</u> .....	67
4.2.4 <u>Análisis estadístico</u> .....	67
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
4.3.1. <u>Eficiencia de recuperación isotópica (ERI)</u> .....	68
4.3.2. <u>Eficiencias de recuperación isotópica (ERI) parciales</u> .....	72
4.4. CONCLUSIONES.....	75
4.5. BIBLIOGRAFÍA.....	75
5. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	79
6. <u>CONCLUSIONES</u> .....	83
7. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	84

## RESUMEN

Pese a su alta productividad, poco se conoce de la eficiencia de uso del N, la del fertilizante N, ni de las principales fuentes de aporte de este nutriente al cultivo de arroz en Uruguay. Los objetivos del trabajo fueron: a) Identificar las principales fuentes de N al cultivo, el cual rota con pasturas (nativas o mejoradas en mezcla con leguminosas) y b) cuantificar los diferentes indicadores de la eficiencia de uso del N y del fertilizante N. Para el cumplimiento del primer objetivo se utilizó la técnica de abundancia natural ( $\delta^{15}\text{N}$ ), mientras que para el segundo se utilizaron métodos directos (enriquecimiento artificial con  $^{15}\text{N}$ ) e indirectos (método de la diferencia). Los valores  $\delta^{15}\text{N}$  encontrados en planta indicaron que la principal fuente de N para el cultivo de arroz fue la mineralización de la materia orgánica del suelo, seguida por el fertilizante N agregado. No existió evidencia clara de aportes de N al cultivo proveniente de la FBN, vía pasturas u otros fijadores si bien el arroz sobre manejo antecesor de pasturas con leguminosas rindió más. En promedio se produjeron 146 kg de grano por kg N agregado, lo que indicó un factor de productividad parcial (FPP) del N agregado muy alto. Esta alta productividad se observó aun en los tratamientos sin agregado de N. La cantidad de N tomado por el cultivo respecto al N agregado (eficiencia de recuperación aparente = ERA), fue de media a alta, situándose en 40%. Contrariamente, los índices de eficiencia relacionados al cultivo, eficiencia de uso interna (EUI) y eficiencia fisiológica (EFIS), que consideran la productividad a partir del N tomado (total o incremental), fueron menores a lo reportado (41 y 58 kg grano por kg N absorbido), posiblemente debido al tipo de variedad utilizada en este trabajo, y a la alta EUI alcanzada por los testigos sin N. Utilizado como trazador, el fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$  agregado presentó una eficiencia de recuperación isotópica (ERI) de 46%, y un reciclaje (paja + suelo) a fin de ciclo del 49%, no encontrándose un 24% el que se asumió como pérdida. Este trabajo permitió conocer y entender las relaciones que sustentan la concreción de altos rendimientos con bajo agregado de N. A partir de los índices de eficiencia calculados, es posible rediseñar la tecnología de producción para aumentar los rendimientos y la eficiencia de uso del N conjuntamente, así como preservar su sustentabilidad del sistema en el largo plazo, a través de la calidad del suelo.

**Palabras clave:** rotación arroz-pasturas, eficiencia de uso del N, eficiencia de uso del fertilizante,  $\delta^{15}\text{N}$ , enriquecimiento artificial  $^{15}\text{N}$

## NITROGEN CYCLE OF RICE CROP IN URUGUAY: STUDIES BASED ON ISOTOPIC AND CONVENTIONAL TECHNIQUES

### SUMMARY

Despite its high productivity, little is known about the N and fertilizer use efficiency, as well as the main sources involved in N contribution to the rice crop in Uruguay. The objectives of this work were: a) identify the main N sources to the crop, which rotate with pastures (natural or improved mixed with legumes) and b) quantify different indicators of N and fertilizer use efficiency. To fulfill the first objective, natural abundance technique ( $\delta^{15}\text{N}$ ) was used, while to the second were used direct methods ( $^{15}\text{N}$  enrichment) and indirect (difference method). Plant  $\delta^{15}\text{N}$  values indicate that the main N source to the rice crop was the soil organic matter mineralization, followed by the N fertilizer input. There was no clear evidence of N inputs to the crop from the BNF, through pastures or other fixers, although, rice over legumes pastures reach higher yields. On average, 146 kg of grain per kg N applied were produced, which indicated a very high partial factor productivity (PFP) of added N. This high productivity was observed even in treatments without N addition, which was associated with the first result. Total crop N uptake related to added N (apparent recovery efficiency = ARE), was from medium to high, reaching 40%. Conversely, efficiency indices related to the crop, internal use efficiency (IUE) and physiological use efficiency (PHISE), which consider grain production from taken N (total or incremental), were lower than reported (41 y 58 kg kg<sup>-1</sup>), probably due to the variety used in this work, considered as old. Used as a tracer, labeled  $^{15}\text{N}$  fertilizer reached an isotopically recovery efficiency (IRE) of 46%, and a recycling (straw+ soil) at harvest of 49%, while 24% of the N was not accounted for, assumed as lost. This work allowed to know and understood N relationships that support the achievement of high yielding with low N addition. Based on the calculated efficiency indices, is possible to redesign management practices to increase yield and N use efficiency together, as well as preserve system sustainability in the long term, through the quality of the soil.

**Keywords:** rice-pasture rotations, N use efficiency, fertilizer use efficiency,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$  artificial enrichment.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. MIRADA GENERAL A LA PRODUCCIÓN Y FERTILIZACIÓN N DE ARROZ EN EL MUNDO**

El cultivo de arroz es el alimento base para la mitad de la población mundial, siendo producido en la actualidad en todos los continentes del mundo a excepción de la Antártida (Prasad, Shivay y Kumar, 2017). El último registro de la FAO (FAOSTAT, 2016), indica que de un total mundial aproximado de 160 M ha destinadas al cultivo de arroz, el 87% de la superficie se encuentra en Asia, seguido por África y las Américas con el 8 y 4% respectivamente, mientras que la restante superficie se encuentra en mayor medida en Europa seguido por Oceanía.

La extensa distribución del cultivo en el mundo hace que las condiciones y características de producción sean por demás variadas. Dentro de ellas, el ambiente productivo se compone de cuatro tipos de ecosistemas a) de tierras altas, b) de tierra bajas regadas por lluvia, c) de ambientes propensos a inundaciones y d) el irrigado artificialmente (IRRI, 1993). Este último es el más importante ya que explica la mitad de la superficie mundial de arroz y el 75% de la producción total (Prasad, Shivay y Kumar, 2017).

Los sistemas de cultivos comprenden desde arroz continuo en las regiones tropicales, hasta aquellos que utilizan otros cultivos de secano en la secuencia agrícola (trigo, maíz, leguminosas de grano, hortalizas) en las regiones templadas y subtropicales, incorporándose en ocasiones leguminosas (*Sesbania aculeata*) como mejorador de la fertilidad del suelo (Sharma y Prasad, 1999). Otro tipo de sistema es el realizado en el sur de Estados Unidos y sur de Brasil, donde desde un tiempo a esta parte, el arroz alterna sistemáticamente con la soja (Riar et al., 2013). Es sistema arroz -pasturas uruguayo es una situación casi única en el mundo, que combina la producción agrícola con la pecuaria, generando un esquema de baja intensidad agrícola (Deambrosi, 2003; Palmer, 2012).

La orientación productiva es variada también, existiendo modelos de producción familiares a pequeña escala y de muy baja tecnificación (Mohapatra et al., 2013), hasta de gran escala, con alto uso de tecnología y con una orientación netamente comercial (IRRI, 2013). Del

total de arroz comercializado en el mundo el 87% está en manos de 10 países, dentro de los cuales, en la actualidad, Uruguay es octavo (Workman, 2018).

El cultivo de arroz, adaptado a una diversidad de ambientes, formas de producción y orientación productiva como las presentadas, sustenta los requerimientos de N basados en diferentes estrategias y fuentes de este nutriente. Si bien la fuente principal en esta diversidad de situaciones es el aporte de N del suelo, varía su oferta en función de la historia agrícola, intensidad de uso del suelo y la región, pudiendo aportar entre un 50 y 80 % de los requerimientos totales del cultivo (Wongl y Nortcliff, 1995; Peng et al., 2006; Espe et al., 2015).

Para completar la otra fracción de los requerimientos, son consideradas diversas alternativas que por un lado aportan el N faltante y por otro reponen o mantienen la fertilidad natural del suelo. Una práctica ampliamente difundida es la utilización de abonos verdes, principalmente leguminosas, como *Sesbania spp.*, *Vigna spp.* y *Crotalaria spp.* (Ladha et al., 2009; Schulz, Keatinge y Wells, 1999). Si bien estas especies tienen un potencial de fijación de N de hasta 200 kg ha<sup>-1</sup>, difícilmente hacen prescindir del agregado de N como fertilizante (Mahajan, Kumar y Chauhan, 2017), principalmente debido a la baja productividad alcanzada por estas especies.

Otra fuente tradicional de N en ambientes de poco desarrollo tecnológico son los biofertilizantes. Entre ellos, la Azolla ha sido la más utilizada, si bien el uso de *Azospirillum* y *Trichoderma* entre otros han sido reportados (Meynard Banayo et al., 2012). La Azolla es un helecho acuático en simbiosis con la cianobacteria fijadora de N *Anabaena azollae*. Los resultados con estos biofertilizantes han sido contradictorios siendo reportados desde aumentos significativos en los rendimientos y mejoras en la calidad de suelo (Panda et al., 2007), hasta una respuesta pequeña y muy variable (250 kg ha<sup>-1</sup>) de su agregado respecto al testigo (Roger, 1995). En condiciones comerciales, el agregado de entre 10 y 15 Mg ha<sup>-1</sup> en base fresca de Azolla, fue equivalente al efecto de 40 kg N ha<sup>-1</sup> como urea. En China, este biofertilizante fue utilizado en 6,5 M ha hacia fines de 1970 decreciendo sostenidamente luego de inicios de la década de los 80. La misma tendencia sucedió en Vietnam, India y Filipinas, y se explicó por la posibilidad de los agricultores de acceder a fuentes de N inorgánicas que se abarataron a causa de cambios en las políticas comerciales de estos países (Roychoudhury et al., 1983).

Aspectos como el mencionado, han hecho que en la actualidad la gran mayoría de los sistemas arroceros del mundo utilicen a los fertilizantes inorgánicos como la principal fuente de N para el cultivo. Del total de N consumido globalmente cada año, el arroz explica el 21-25% (Prasad, Shivay y Kumar, 2017), reportándose el agregado de dosis promedio entre 110 kg N ha<sup>-1</sup> (Ladha et al., 2016) y 150 kg N ha<sup>-1</sup> (Krupnik et al., 2004), con rangos entre los 10 kg N ha<sup>-1</sup> (Dobermann, 2007) y hasta más de 200 kg N ha<sup>-1</sup> (Zhang et al., 2014).

Según la FAO (2018), las proyecciones en la demanda de cereales son crecientes y se estima serán sustentadas por una mayor utilización de N (FAO, 2017). Una mirada de largo plazo de los sistemas arroceros, en función del uso creciente de N en los últimos 50 años (Ladha et al., 2016), requerirá profundizar los esfuerzos en hacer un uso eficiente de este nutriente. En definitiva, el agregado de N busca incrementar la productividad general de los sistemas, de una manera económicamente óptima, minimizando las pérdidas del nutriente al ambiente y contribuyendo a los sistemas agrícolas a través de la sustentabilidad de la fertilidad del suelo y otros componentes de calidad de éste (Fixen et al., 2015).

## **1.2. EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO**

### **1.2.1. Índices de eficiencia de uso del nitrógeno**

Se describen los índices que componen la eficiencia de uso del N, en base a la información sintetizada por Fixen et al. (2015), explicándose gráficamente según el diagrama de 3 cuadrantes propuesto por van Keulen (1982).

El factor de productividad parcial (FPP) del N agregado, es un índice de fácil cálculo e interpretación, siendo necesario solamente registros de rendimientos y dosis de N agregadas. Es una expresión de eficiencia de producción, reportada como unidades de rendimiento por unidad de N aplicado (kg kg<sup>-1</sup>). Es un índice útil para comparar regiones y países que compartan el mismo sistema productivo y un mismo cultivo. Gráficamente queda representado por el cuadrante I de la figura 1. El FPP es el cociente entre los valores que componen cada punto de la serie, esto es, el rendimiento (letra B) sobre la dosis de N (letra A).

La eficiencia de uso interno (EUI) se define como el rendimiento alcanzado en función del N total absorbido. A modo de ejemplo, en el cuadrante II de la figura 1, corresponde al cociente entre el rendimiento definido con la letra "A" y la absorción de N definida con la letra "B".

La eficiencia fisiológica (EFIS) es el cociente entre 2 incrementos, el de rendimiento y el de absorción de N. Se visualiza sobre la misma curva del cuadrante II, pero por medio de la diferencia entre 2 puntos cualesquiera de la serie. En este cuadrante, es el cociente entre la diferencia en rendimiento (A-C) y la de absorción de N (B-D).

La eficiencia de recuperación aparente (ERA) es definida como el cociente entre la diferencia en absorción total de N entre parcelas fertilizadas y sin agregado de N (omisión) y la dosis de N agregada. En el cuadrante III de la figura 1, la ERA corresponde a la diferencia de absorción de N entre los puntos de la serie con agregado de N y sin agregado (B-A), respecto a la dosis de N agregada (C).

Por último, la eficiencia agronómica (EA) es definida como el incremento de rendimiento por unidad de N agregada. Se relaciona directamente con el retorno económico de la fertilización N. Se visualiza a modo de ejemplo en el cuadrante I de la figura 1 como, el cociente entre la diferencia en rendimiento (B-A) y la dosis de N que generó ese incremento en rendimiento (C).

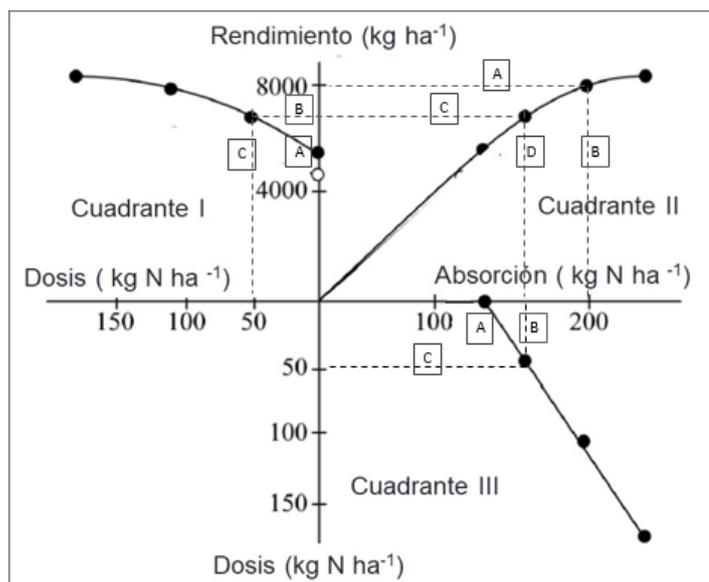


Figura 1. Diagrama de 3 cuadrantes mostrando las relaciones entre: I) dosis de N agregada y rendimiento, II) absorción total de N y rendimiento y III) dosis de N agregada y N absorbido por el cultivo. Los índices de eficiencia de uso del N comprendidos en cada cuadrante son: I) FPP y EA, II) EFIS y EUI y III) ERA. Adaptado de van Keulen, (1982).

Según Cassman et al. (1998), cuando se toma en cuenta a los sistemas de producción reales, el cálculo de índices de eficiencia de uso del N basado en el método de la diferencia se ajusta más con las necesidades de los agricultores. Esto se debe a que, en la respuesta vegetal, se considera como impacta en forma parcial el N agregado, sobre la base de las restantes fuentes de N del sistema. Esto significa que se considera el efecto del N del suelo, el del fertilizante y la interacción entre ambos (Jenkinson, Fox y Rayner, 1985).

La forma más generalizada de cuantificar los índices que componen la eficiencia de uso del nitrógeno es basándose en el “método de la diferencia” (Roberts y Janzen, 1990). Esta metodología considera la utilización de una parcela testigo (sin agregado de N), la cual es comparada con otra fertilizada. El método de la diferencia es simple y de muy bajo costo, siendo ampliamente utilizado para evaluar la respuesta vegetal frente al agregado de N en el corto plazo, principalmente en situaciones productivas reales (Cassman, Dobermann y Walters, 2002; Dobermann, 2007).

## **1.2.2. Técnicas isotópicas asociadas a estudios de eficiencia de uso del nitrógeno y nutrición nitrogenada**

Cuando los estudios de eficiencia de uso del nitrógeno requieren un grado más detallado, la utilización de isótopos se vuelve necesaria. En términos generales, el uso de técnicas isotópicas permite en los estudios de nutrición nitrogenada desde trazar el nutriente agregado en todo el sistema (Harmsen, 2003; Zapata, 1990), hasta estudiar el aporte de N de diferentes fuentes a través de las señales isotópicas de éstas (Biggs et al., 2002). En el primer caso la técnica empleada es la de enriquecimiento artificial con  $^{15}\text{N}$ , mientras que la segunda se trata de la abundancia natural  $^{15}\text{N}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ).

### **1.2.2.1. Enriquecimiento artificial con $^{15}\text{N}$**

Comparativamente, la menor abundancia del isótopo  $^{15}\text{N}$  respecto al  $^{14}\text{N}$ , permite la utilización de fuentes enriquecidas del primero con el fin de trazar la dinámica de este isótopo en estudios biológicos y ambientales. Este enriquecimiento isotópico se expresa como porcentaje de átomos de  $^{15}\text{N}$  por sobre su abundancia natural (%  $^{15}\text{N}$  átomos en exceso). En tal sentido, la incorporación de una fuente enriquecida genera una alteración al sistema en cuanto a los valores iniciales de abundancia natural  $^{15}\text{N}$ . No obstante, solo por medio de esta técnica es posible lograr un buen entendimiento de temáticas como la de conocer el destino del fertilizante aplicado (Hart et al., 1993); cuantificar pérdidas de fertilizante N (Jenkinson et al., 2004), cuantificar las tasas brutas o reales de los procesos de N en el suelo mineralización - inmovilización (Videla, 2004), evaluar prácticas de manejo de fertilizantes (Recous, Machet y Mary, 1992), y cuantificar la fijación biológica del  $\text{N}_2$  atmosférico (Mallarino et al., 1990; Ramos et al., 2001).

La base de estos trabajos es mediante el conocimiento del N derivado del fertilizante ( $N_{ddf}$ ) contenido en cierta muestra:

$$N_{ddf} = \frac{\%At.Exceso^{15}N \text{ muestra}}{\%At.Exceso^{15}N \text{ fertilizante}} \quad (1)$$

En tal sentido, si el  $N_{ddf}$  es 0,5 significa que la mitad del N de la planta proviene del fertilizante. Si solo existen 2 fuentes, por ejemplo, el fertilizante y el suelo, el restante 50% del N en la planta provendrá de este último. Por lo tanto, el N tomado por la planta proveniente del fertilizante será la eficiencia de recuperación isotópica (ERI) del fertilizante marcado  $^{15}\text{N}$  agregado.

El análisis de datos provenientes de experimentos que utilizan  $^{15}\text{N}$  en ocasiones presenta limitaciones. Algunos reportes (Jansson y Persson, 1982) muestran que este método no es el más conveniente cuando se quiere cuantificar la eficiencia de uso del fertilizante. Esto es debido a los procesos de mineralización e inmovilización en el suelo, los cuales pueden diluir o concentrar la cantidad del isótopo  $^{15}\text{N}$  del pool de N del suelo, sin que esto signifique una disminución de N para el cultivo.

No obstante, considerando lo mencionado por Jansson y Persson (1982), en el cultivo de arroz esta técnica se utilizó ampliamente para conocer la eficiencia de uso del fertilizante marcado y el destino de éste en el sistema suelo planta. Estos trabajos pueden encontrarse en las extensas revisiones del tema que realizaron Krupnik et al. (2004) y Dourado-Neto et al. (2010).

#### **1.2.2.2. Abundancia natural $\delta^{15}\text{N}$**

Esta técnica, se basa en la ligera variación que existe en la relación de los isótopos  $^{15}\text{N}$  y  $^{14}\text{N}$  debido al fraccionamiento isotópico resultante de procesos químicos, físicos y biológicos (Högberg, 1997; Dawson y Brooks, 2001). Por lo tanto, existe un efecto significativo de estos procesos, cuando se trabaja en la región de variación natural de isótopos de N. En tal sentido, es esperable un cambio en el valor de la abundancia natural  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  cuando los procesos de pérdida o ganancia de N suceden en forma continua o por períodos largos de tiempo y/o existen diferencias importantes en los valores de abundancia natural  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  entre el N total y las formas de entrada o salida de N.

Si bien el uso de esta técnica como trazador presenta varias limitantes debido a los procesos de fraccionamiento entre el  $^{15}\text{N}$  y el  $^{14}\text{N}$ , y por los procesos de mezclado del pool de

N de suelo, existe una asociación entre la señal isotópica de la fuente (suelo, por ejemplo) con la fosa (planta), siendo la señal isotópica de la fuente la media de todas las señales isotópicas del conjunto de fuentes de N disponibles, ponderadas por su disponibilidad (Robinson, 2001).

Se expresa mediante la notación delta ( $\delta$ ) en partes por mil (‰) siendo la fórmula de cálculo:

$$\delta^{15}N = \left( \frac{R_{muestra}}{R_{estandar}} - 1 \right) \times 1000 \quad (2)$$

donde  $\delta^{15}N$  es la composición isotópica de la muestra y R es la relación molar del isótopo pesado sobre el liviano ( $^{15}N/^{14}N$ ) para la muestra y el estándar.

Algunos estudios que utilizaron esta técnica estuvieron orientados a: identificar fuentes de  $NO_3$  en cuencas, asociados a isótopos de oxígeno  $\delta^{15}N$  y  $\delta^{18}O$  (Mayer et al., 2002; Kellman y Hillaire, 2003); para cuantificar fijación biológica de N (Carranca, de Varennes y Rolston, 1999); identificar fuentes de deposición atmosférica (Heaton, 1986); así como estudiar la contribución de N por fijación en vida libre en cultivos (Biggs et al., 2002) entre otros.

El rango esperable para los valores de abundancia natural en materiales biológicos oscila entre 0,3626 at. %  $^{15}N$  y 0,3718 at. %  $^{15}N$ , correspondiendo a valores de  $\delta^{15}N$  de -10‰ a + 15‰ respectivamente. Suelos utilizados para pastoreo animal, presentan valores entorno a + 6‰ de  $\delta^{15}N$  (Xu et al., 2010), el cual está enriquecido en  $^{15}N$  respecto al  $\delta^{15}N$  atmosférico. Según Yoneyama (1996), este enriquecimiento está explicado por salidas de N del sistema las que tienen una relación entre  $^{15}N$  y  $^{14}N$  baja.

En el cultivo de arroz, el uso de la abundancia natural  $\delta^{15}N$  se utilizó para identificar genotipos que fuesen más sensibles a establecer relaciones con organismos fijadores de N en vida libre (Watanabe et al., 1987), para detectar variaciones en el  $\delta^{15}N$  de diferentes suelos y cultivos en referencia al agregado de N (Yoneyama, Kouno y Yazaky, 1990), para estudiar procesos de fraccionamiento isotópico en suelos inundados (Choi, Ro y Lee, 2003) y estudiar diferencias entre el  $\delta^{15}N$  en arroz fertilizado de forma orgánica (residuos de leguminosas y abonos orgánicos) y comercial (fertilizante N) (Yun et al., 2011).

En el diagrama 1 se puede apreciar a modo de ejemplo, diferentes valores de  $\delta^{15}N$  de distintas etapas del ciclo del N en el sistema suelo-planta, así como valores de referencia para los procesos involucrados en estas etapas.

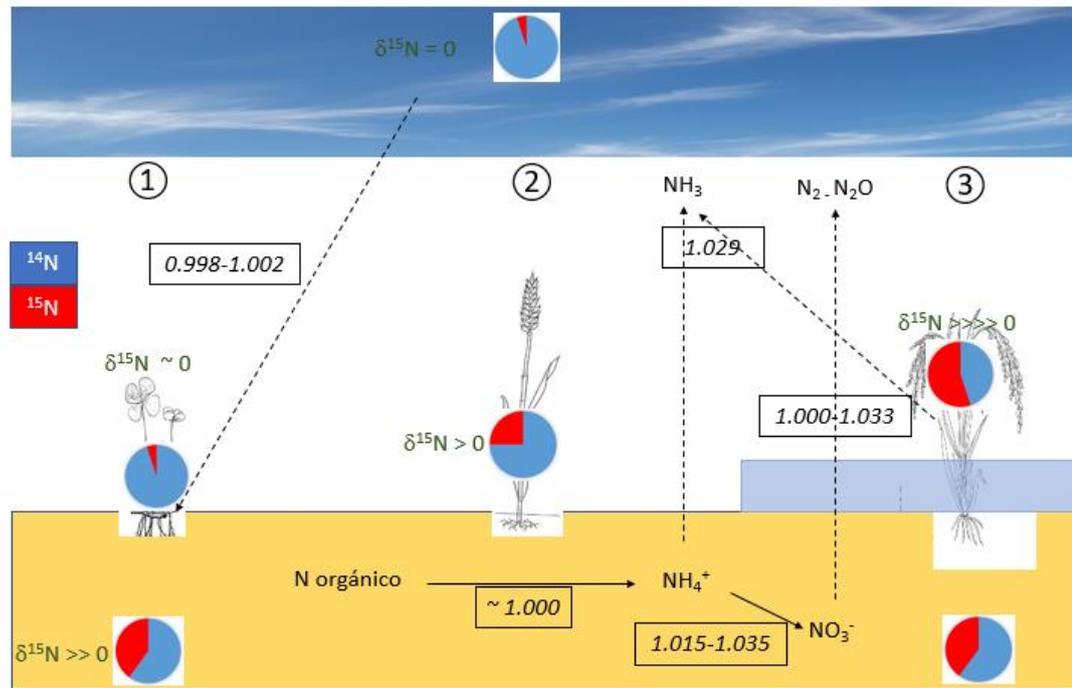


Diagrama 1. Modelo esquemático de las magnitudes en los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  de diferentes componentes del sistema suelo planta. Ejemplo 1 situación para especie fijadora de N, situación 2 de cultivo de secano, y situación 3 ambiente con inundación (arroz). Círculos rojo y azules representan esquemáticamente la proporción de isótopos  $^{15}\text{N}$  y  $^{14}\text{N}$  respectivamente del producto o sustrato en cuestión. Valores en cursiva en recuadros corresponden a los factores de fraccionamiento ( $\alpha$ ) reportados por Hogberg, 1997 para diferentes procesos del ciclo del N. Valores mayores a 1 indican un empobrecimiento del producto respecto al sustrato.

### 1.2.3. Eficiencia de uso del nitrógeno según el modelo gráfico

Esta metodología basa su enfoque en las entradas y salidas de N del sistema. Las entradas contemplan fuentes inorgánicas, orgánicas, biológicas por fijación y deposición, de origen animal o vegetal. Por su parte las salidas refieren al N contenido en productos animales y vegetales (EU Nitrogen Expert Panel, 2015). Según este método, la eficiencia de uso del N (EUN) es entonces a la fracción de N que entra al sistema que es retenida en los productos.

La información de entradas y salidas de N deriva en tres indicadores diferentes al mismo tiempo: a) de eficiencia de uso de los recursos, b) de productividad y c) de pérdida de N potencial al ambiente (Brentrup y Lammel, 2016).

La figura 2 muestra zonas de la EUN, en función de rangos óptimos predefinidos (diagonales de 90 y 50% para este ejemplo en eje de ordenadas secundario). Valores por debajo de 50% indicarían una potencial contaminación (área azul), y por encima de 90% /zona anaranjada) riesgo de agotamiento de reservas de N del suelo. Una tercera línea diagonal indica el límite máximo para un potencial N excedente (entradas- salidas), como indicador para evitar pérdidas de N al ambiente (zona celeste). También es definida una mínima productividad del sistema, expresada en kg N retirado en el producto, representado por la línea horizontal punteada. La zona gris por debajo de la línea horizontal indica problemas en el sistema que impactan en una muy baja productividad. La zona restante es la definida como de EUN deseable (zona blanca). Tanto los valores de referencia fijados para delimitar la EUN son tentativos, estos han sido observados y conseguidos en diversos sistemas agrícolas (EU Nitrogen Expert Panel, 2015).

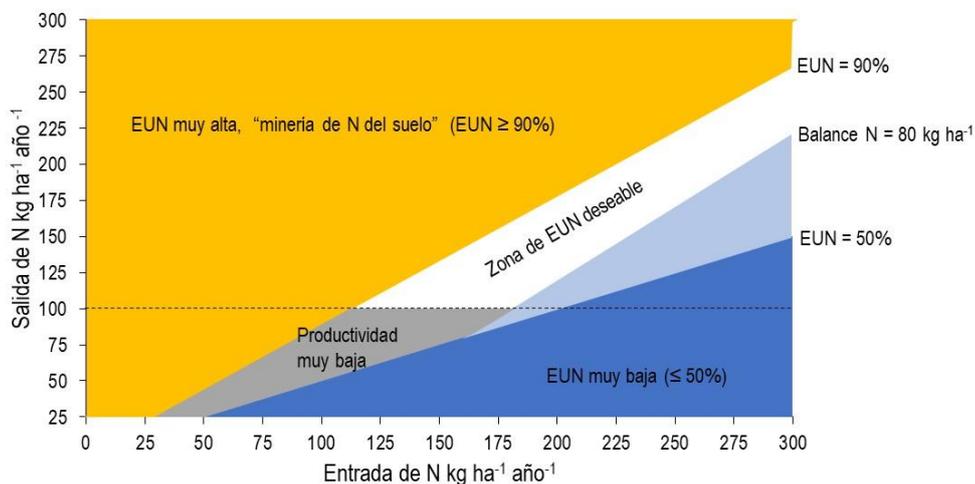


Figura 2. Eficiencia de uso del N interpretado según el diagrama conceptual del sistema indicador combinado. Adaptado de Brentrup y Lammel (2016).

### 1.3. EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN EL CULTIVO DE ARROZ

La eficiencia de uso del N es un indicador especialmente importante para evaluar sistemas de producción, siendo fuertemente afectado por el manejo que se realice con el fertilizante N agregado. Si bien muchas veces se piensa en éste, como un índice que atiende únicamente potenciales pérdidas de N al ambiente, asociadas a contaminación por el agregado de altas cargas de este nutriente al sistema, existen casos donde la degradación existió sin que se cumpla ese hecho (Fixen et al., 2015).

En tal sentido, pueden existir situaciones donde la eficiencia de uso del N sea relativamente baja sin ser necesariamente peligrosa en términos ambientales, así como sistemas con una eficiencia muy alta pueden no ser sustentables. A esto hace referencia Fixen et al. (2015), al indicar que no todos los aspectos involucrados en el agregado de nutrientes, por lo tanto, en su desempeño tanto agronómica como ambientalmente son contemplados por el valor aislado de eficiencia de uso.

En muchos países de África, la causa de la baja productividad ha sido asociada por una extracción de nutrientes en general muy superior al agregado lo que ha provocado una minería de nutrientes. El ejemplo antagónico lo presentan países del este de Asia, donde el N agregado se ha desplazado fuera de los límites agrícolas por falta de una buena sincronización entre la oferta y la demanda de N (Dobermann, 2007). De no controlarse, mantener esta situación en el tiempo, puede comenzar a generar altos costos que se trasladen a la sociedad (Keeler et al., 2016). En términos generales, los dos ejemplos manejados son los que explican por qué los trabajos tendientes a aumentar la eficiencia de uso de este nutriente continúan siendo de interés a nivel de investigación y político.

A nivel internacional, casi todas las regiones productoras de arroz han reportado algún tipo de parámetro de la eficiencia de uso del N. El cuadro 2 muestra información compilada de diferentes zonas del mundo de diferentes parámetros de eficiencia, obtenidos en muchos años y sitios, existiendo distinto grado de detalle entre situaciones. Para situaciones de manejo ajustadas, se reportan valores de referencia mayores a 0,5, 50, 25, 80 y entre 55 y 65 kg kg<sup>-1</sup> para la ERA, EFIS, EA, FPP y EUI respectivamente (Dobermann y Fairhurst, 2000; Dobermann, 2007).

Los estudios isotópicos con el fin de conocer la ERI, se asoció a países con un desarrollo importante del rubro arrocerero (Krupnik et al., 2004), no siendo fáciles de identificar reportes de arroz en América del Sur con esta técnica.

Trabajos tendientes a conocer y manejar el suministro de nutriente por parte del suelo u otras fuentes nativas, así como maximizar la eficiencia del fertilizante (Zhao et al., 2013; Peng et al., 2010), han sido abordados con el fin de aumentar el FPP. Ya que este parámetro está relacionado al aporte de N nativo del suelo y a la EA ( $EA = ERA \times EFIS$ ) (Cassman et al., 1998), el conocimiento de esta información es la línea base para definir prácticas alternativas de manejo que permitan aumentar la eficiencia de uso general.

Un análisis global de la eficiencia de recuperación del N agregado, entre países ricos, economías emergentes y países en vías de desarrollo, fue conducido por Conant, Aaron y Grace (2013). Este trabajo mostró que las diferencias en la eficiencia de uso del N entre estos grupos de países se han mantenido incambiada en los últimos 50 años, si bien las cantidades de N agregadas, así como los rendimientos habían aumentado. Los países ricos, caracterizados por un sistema de alta producción por medio de altas cantidades de N agregadas, tendieron a ser los más contaminantes pero los de mayor eficiencia de uso, debido a una mayor eficiencia de recuperación (ERA). En ese período, el rendimiento global de estos países fue 70 % superior a los de las demás economías mientras que el agregado de N lo fue en un 54%.

Cuadro 2. Distintos componentes de la eficiencia de uso del N en el cultivo de arroz, calculados en base al método de la diferencia y por medio del enriquecimiento artificial con  $^{15}\text{N}$ . ##

País/Región	Dosis N kg ha <sup>-1</sup>	ERI ( $^{15}\text{N}$ ) ----- % -----	ERA	EFIS	EA ----- kg kg <sup>-1</sup> -----	FPP
Filipinas	101	---	---	---	9	57
India	135	---	---	---	17	53
Vietnam	106	---	---	---	11	52
Bangladesh	72	---	---	---	---	62
Asia *	115	44	46	53	22	62
Asia **	117	---	31	39	12	49
África **	106	---	36	47	17	46
África ****	124	---	24	---	---	---
Australia	175	25	32	---	---	---
Eurasia	115	32	41	---	---	---
América del Norte	39	28	---	---	---	---
América del Sur	120	---	39	---	---	---
Asia del Sur	213	32	39	---	---	---
China	190	---	38	---	12	25
<i>Promedio</i>	<i>124</i>	<i>33</i>	<i>36</i>	<i>46</i>	<i>15</i>	<i>51</i>

ERI= eficiencia de recuperación isotópica (fertilizante  $^{15}\text{N}$ ), ERA= eficiencia de recuperación aparente, EFIS= eficiencia fisiológica, EA= eficiencia agronómica, FPP= factor parcial de productividad.

## Compilado en base a Dobermann, (2007); Krupnik et al. (2004); Balasubramanian et al. (2003); Singh et al. (2007a); Singh et al. (2007b) y Jin, (2012). \* Estaciones experimentales, \*\* campos agricultores, \*\*\* campos demostrativos

Cuando el parámetro de eficiencia utilizado para evaluar la eficiencia de uso del N en un sistema es el FPP, es necesario considerar aspectos agronómicos complementarios ya que, por tratarse de un cociente entre productividad y agregado de N, este índice tenderá a variar significativamente en función de la dosis agregada. El alto valor del FPP alcanzado en África (122 kg kg<sup>-1</sup>) y algunas zonas de Asia central (85 kg kg<sup>-1</sup>) (Dobermann y Cassman, 2005) con un agregado bajo de N, es un indicador claro de insostenibilidad, debido a un balance de N negativo sostenido en el tiempo. Analizado según el modelo gráfico de eficiencia de uso del N (EU Nitrogen Expert Panel, 2015), este tipo de situaciones sería algún punto en la parte superior izquierda del esquema, que indican eficiencias demasiado altas, pero asociadas a altos riesgos de “minería” de N.

La situación en Uruguay no es muy diferente a los casos mencionados. En los últimos 20 años, la producción a nivel país se caracterizó por la obtención de altos rendimientos con un relativo bajo agregado de N (Deambrosi, 2003). Trabajos en nutrición N orientados a explorar la respuesta relativa en rendimiento debido a la fertilización nitrogenada del cultivo en diversos años y localidades, mostraron que ésta fue baja y errática, aún en suelos de bajo contenido de carbono orgánico, dependiendo el rendimiento y las respuestas a la fertilización mayoritariamente de las condiciones climáticas reinantes en el año de evaluación (Deambrosi y Méndez 2007).

Un análisis del mismo período a escala nacional del sector arrocero uruguayo (Pittelkow et al., 2016), mostró que se alcanzaron valores de FPP muy altos (100 - 160 kg kg<sup>-1</sup>), en comparación a los 64 kg kg<sup>-1</sup> reportados por Ladha et al. (2005) y los presentados en el cuadro 3. No obstante, durante todos esos años, las salidas de N en grano superaron a las entradas, considerando únicamente al N proveniente del fertilizante. Debido a que las dosis de N agregadas en Uruguay son estables entre regiones, esta situación podría ser peor para el grupo del quintil superior de rendimientos, que alcanza una productividad mayor (Blanco et al., 2010), por lo tanto, mayores extracciones de N.

Por ser un producto exportable en más del 90% del total producido, conocer más respecto al ciclo del N del arroz en Uruguay, así como cuantificar los índices de eficiencia de uso de este cultivo, podría diferenciar este producto comercialmente. Por otro lado, quedarán identificados a través de los índices, los aspectos menos eficientes en materia de N, permitiendo definir nuevas prácticas de manejo de ser necesario.

El objetivo general de este trabajo fue conocer las causas y los procesos del ciclo del N de los sistemas de arroz en Uruguay, que explican la alta productividad alcanzada con bajo agregado de N.

Para esto, se planteó un primer objetivo específico que fue identificar las principales fuentes de N y su contribución al cultivo de arroz en los sistemas uruguayos. El segundo objetivo específico fue cuantificar índices de eficiencia de uso del N y el tercero, cuantificar la eficiencia de recuperación del fertilizante agregado, el reciclaje de N al sistema, y tener una primera aproximación a las pérdidas de N durante el cultivo en el sistema arroz-pasturas de Uruguay.

Este documento se conforma de tres artículos con formato de revista científica. El primero, llamado “Identificación de las principales fuentes de aporte de N al cultivo de arroz utilizando la técnica  $\delta^{15}\text{N}$ ”, estudia a través de la técnica de abundancia natural de  $^{15}\text{N}$ , cual o cuales de las fuentes de N disponible en el sistema (suelo, fertilizante, fijación por leguminosas previas o en vida libre durante el cultivo), explican en mayor medida la nutrición N del arroz. El segundo artículo: “Eficiencia de uso del nitrógeno y en el cultivo de arroz en Uruguay I: estudio no isotópico” discute a través de la cuantificación de los índices de eficiencia de uso del N: EUI, EFIS, ERA, EA y FPP, las causas que explican el logro de altas productividades de arroz en Uruguay, con bajo agregado de N, así como reporta por primera vez para la producción arrocería uruguaya valores de eficiencia de uso del N. Los valores de estos índices serán de utilidad tanto para definir nuevas prácticas de manejo del N en el cultivo, así como para definir análisis de rutina en esta temática a ser incluidas en el programa de mejoramiento genético de arroz de INIA. Por último, el tercer artículo: “Eficiencia de uso del N en el cultivo de arroz en Uruguay II: estudio isotópico”, es un artículo en serie y complementario al segundo artículo que por medio del uso de fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$ , pretende conocer parte de la dinámica del N en el sistema suelo, planta, atmósfera del arroz. Será información útil tanto a nivel productivo (recuperación de N por el cultivo) como ambiental (reciclaje y pérdidas de N). Los tres artículos tienen el formato de la revista *Agrociencia Uruguay*.

## **2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE APORTE DE N AL CULTIVO DE ARROZ DE URUGUAY**

**Castillo Jesús, Terra José A., Perdomo Carlos H.**

### **2.1. RESUMEN**

La productividad del arroz en Uruguay en el período 2013-2018 fue de 8 Mg ha<sup>-1</sup>. El 35% del arroz se sembró sobre pasturas mezcla con leguminosas, el 15% sobre pasturas regeneradas y el 50% sobre rastrojos de arroz. Esta productividad se alcanzó con aplicaciones de 70 kg N ha<sup>-1</sup> y con aportes mayores de otras fuentes poco conocidas. El objetivo del presente trabajo fue identificar la contribución de las principales fuentes de N al cultivo en diferentes suelos, con antecesores de pasturas mezcla con leguminosas (APL) y pasturas nativas sin leguminosas (APN) y con fertilización nitrogenada contrastantes. Durante dos zafras, se analizaron doce experimentos, la mitad sobre APL y la otra sobre APN. Se evaluaron tres tratamientos de fertilización N: T0, T22 (22 kg N ha<sup>-1</sup> solo a siembra) y T68 (68 kg N ha<sup>-1</sup> fraccionados a la siembra, macollaje y primordio floral). Se determinó N total en suelo y plantas y variaciones de abundancia natural de <sup>15</sup>N ( $\delta^{15}\text{N}$ ) a fin de ciclo. El suelo fue la principal fuente de N para el cultivo, explicado por la relación de  $\delta^{15}\text{N}$  en planta y el suelo ( $P=0,0054$ ;  $R^2= 0,68$ ). La segunda fuente fue el fertilizante N, en función de la disminución de  $\delta^{15}\text{N}$  en planta. La contribución de la fijación biológica de N en el antecesor que incluyó leguminosas pareció irrelevante. Existió un patrón de cambio del  $\delta^{15}\text{N}$  en planta respecto al suelo indicando pérdidas por desnitrificación y volatilización a nivel de suelo y planta.

**Palabras clave:** N nativo del suelo, rotación arroz-pasturas, pasturas leguminosas, FBN.

## 2.2. SUMMARY

Rice productivity in Uruguay was 8 Mg ha<sup>-1</sup> during the period 2013-2018. Around 35% of rice was seeded over mixed pastures with legumes, 15% over regenerated native pastures and 50% over rice stubble. This productivity was reached with fertilizations of 70 kg N ha<sup>-1</sup> and higher contributions of other N sources less identified. The objective of this work was to identify the main sources of N contribution to rice crop over different soils, which included mixed pastures with legumes (LPA) and native pastures without legumes (NPA) antecessors and adding contrasting nitrogen fertilizations. During two growing seasons, twelve experiments were analyzed, a half over LPA antecessor and the other over NPA antecessor. Three N treatments were evaluated: T0, T22 (22 kg N ha<sup>-1</sup> at sowing) and T68 (68 kg N ha<sup>-1</sup> splitted at sowing, tillering and panicle differentiation respectively). Total soil and plant N, and natural abundance <sup>15</sup>N variations at the end of the crop were determined. The soil was the main N source to the crop, explained by soil and plant  $\delta^{15}\text{N}$  relationship ( $P=0,0054$ ;  $R^2= 0,68$ ). The second main N source was the fertilizer, based on the plant  $\delta^{15}\text{N}$  value decrease. Biological N fixation contribution from antecessors with legumes pastures were irrelevant. There was a pattern of change in plant  $\delta^{15}\text{N}$  respect to the soil, indicating N losses due to denitrification and volatilization at soil and plant level.

**Keywords:** Indigenous soil N, Rice-pasture rotation, legumes pastures, NBF

### 2.3. INTRODUCCIÓN

Dentro de las características que diferencian al sistema de producción arroceros uruguayo a nivel internacional, la rotación con pasturas es una de las más importantes (Deambrosi, 2007). En la última década, entre el 50% y 60% de la superficie de arroz que no es plantado nuevamente, es sembrado con pasturas mezcla con leguminosas que alcanzan entre 3 y 4 años de duración. Por otro lado, la siembra del cultivo sobre antecesor inmediato de pasturas con leguminosas es del 35% (MGAP-DIEA, 2017). Estos números parecen ser muy impactantes en un contexto mundial de agricultura continua y desplazamiento de las pasturas a zonas no aptas para cultivos (Peoples et al., 2004) y donde la inclusión de leguminosas se realiza en menos del 10% de las pasturas mejoradas sembradas (Thomas, 2000).

En Uruguay, se agregan en promedio 70 kg N ha<sup>-1</sup> como fertilizante para producir 8.1 Mg de arroz ha<sup>-1</sup> (MGAP-DIEA, 2017), en comparación con otros sistemas arroceros a nivel mundial donde el rendimiento oscila entre 5 -6 Mg ha<sup>-1</sup>, utilizándose para esto entre 120 y 180 kg N ha<sup>-1</sup> (Giller et al., 2004; Buresh et al., 2004). Las leguminosas incluidas en la rotación podrían ser una fuente de N adicional al sistema, contribuyendo al logro de altas productividades con agregados de dosis medias a bajas de N (Deambrosi y Blanco, 2008). No obstante, en Uruguay también se obtienen altas productividades de arroz cuando no se rota con leguminosas y donde el agregado de N es bajo (Deambrosi y Méndez, 2007; MGAP-DIEA, 2017). Esto podría hacer suponer la existencia de otras fuentes de N alternativas a la fijación biológica de N (FBN) en la etapa de pasturas. En sistemas en Asia de baja productividad, las entradas más significativas de N al suelo provienen de fijadores de N nativos (Dart, 1986; Kundu y Ladha, 1995; Watanabe y Liu, 1992) y dentro de éstos, los mayores contribuyentes serían las cianobacterias (Ladha y Reddy 2003) las que pueden llegar a aportar hasta 70 kg N ha<sup>-1</sup> (Jha et al., 2001; Roger y Ladha 1992).

Vinculado a los aspectos mencionados anteriormente, la utilización de la técnica isotópica de abundancia natural de <sup>15</sup>N, ha permitido cuantificar el N derivado de organismos fijadores al cultivo de arroz (Fernández Valiente et al., 1997), evaluar diferencias isotópicas asociadas a variedades (Watanabe et al., 1987), así como estimar la contribución de fijadores de N en vida libre en la caña de azúcar (Biggs et al., 2002), por lo que su uso podría contribuir

a entender aspectos de la dinámica de N no conocidos en el sistema arrocero uruguayo, que permitan diseñar tecnologías de fertilización considerando las fuentes de N de mayor aporte.

El objetivo de los experimentos conducidos en el presente trabajo fue identificar la contribución relativa de las distintas fuentes de N al cultivo de arroz, en ambientes edáficos, rotaciones y niveles de fertilización contrastantes a nivel comercial. Las hipótesis de trabajo fueron que: a) las pasturas son una fuente significativa de aporte de N al sistema y al cultivo del arroz cuando integran una rotación b) la fijación biológica en vida libre durante el cultivo no es una fuente importante de N para el arroz y c) la contribución del N del fertilizante al cultivo es baja en relación con la que realiza el suelo.

## **2.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1. Características de los sitios y tratamientos evaluados**

En las zafras 2008-2009 y 2009-2010 se instalaron 12 experimentos de campo en chacras comerciales sobre suelos típicos de las zonas productoras de arroz de la zona Este del país (cuenca de la laguna Merín) (Planosoles Subéutricos, Brunosoles Éutricos y Subéutricos, Gleysoles Háplicos y Lúvicos según MGAP, 1979), de las localidades de Río Branco, Rincón de Ramírez, Ramón Trigo e India Muerta. El cultivar utilizado fue EP 144, de amplia utilización al momento de conducir los experimentos. En cada localidad se instalaron 2 sitios experimentales, uno sobre antecesor inmediato de pasturas mezcla con leguminosas (APL) y otro con pasturas nativas (APN). En los sitios con APL, las pasturas integraron una rotación de 2 años de arroz seguidos por 3-4 años de pasturas. Para el APN, se trataron de pasturas de campo nativas regeneradas, con la misma duración entre fases de arroz y pasturas que en APL, excepto para el sitio de Río Branco APN en ambos años. En este sitio el produjo en los 10 años anteriores una rotación continua de arroz con descanso de año intermedio, donde se regeneró una pastura nativa corta. Las características de los suelos en cada localidad y año son descriptas en el cuadro 1. Cada experimento evaluó 3 tratamientos con diferentes dosis y momentos de aplicación de N: a) T0 (0 kg ha<sup>-1</sup>, b), T22 (22 kg N ha<sup>-1</sup> aplicado a la

siembra) y c) T68 (68 kg N ha<sup>-1</sup> fraccionado en dosis de 22 + 23 +23 kg en siembra, macollaje y diferenciación panicular respectivamente).

Cuadro 1.- Análisis físico químico del suelo (0 - 15 cm) de los 12 sitios experimentales. Entre paréntesis se presenta el código de cada sitio.

Año 1 (2008-2009)	Localización	Clasificación suelos	pH	$\delta^{15}\text{N}$ ‰	CO	NT	ARE. %	ARC. %
Río Branco APN (RB1-APN)	32°40'S - 53°20'O	Planosol Subéutrico	5,2	4,28	1,17	0,11	40	25
Río Branco APL (RB1-APL)	32°41'S - 53°19'O	Planosol Subéutrico	5,1	5,15	1,16	0,13	43	23
Ramón Trigo APN (RT-APN)	32°22'S - 54°40'O	Brunosol Subéutrico	5,1	7,22	1,96	0,21	51	17
Ramón Trigo APL (RTL-APL)	32°20'S - 54°35'O	Brunosol Éutrico	6,1	6,23	2,36	0,24	58	31
India Muerta APN (IM1-APN)	33°43'S - 53°50'O	Gleysol Lúvico	5,2	2,34	3,64	0,37	23	24
India Muerta APL (IM1-APL)	33°39'S - 53°51'O	Gleysol Háptico	5,4	3,19	3,05	0,31	27	28
<b>Año 2 (2009-2010)</b>								
Río Branco APN (RB2-APN)	32°38'S - 53°21'O	Planosol Subéutrico	5,5	7,66	0,7	0,06	47	15
Río Branco APL (RB2-APL)	32°42'S - 53°19'O	Planosol Subéutrico	5,4	7,37	0,78	0,08	47	16
Rincón Ramírez APN (RR-APN)	32°50'S - 53°42'O	Planosol Subéutrico	5,7	3,54	1,08	0,12	36	26
Rincón Ramírez APL (RR-APL)	32°49'S - 53°42'O	Planosol Subéutrico	5,5	3,59	0,91	0,11	37	22
India Muerta APN (IM2-APN)	33°39'S - 53°53'O	Gleysol Háptico	5,9	3,84	1,79	0,19	20	30
India Muerta APL (IM2-APL)	33°40'S - 53°55'O	Gleysol Háptico	5,5	3,54	3,95	0,51	20	43

$\delta^{15}\text{N}$  = abundancia natural <sup>15</sup>N, CO= carbono orgánico, NT= nitrógeno total, ARE. = arena, ARC.= arcilla

#### **2.4.2. Manejo de los experimentos y determinaciones realizadas**

Se fertilizó a la base con 55 kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y la fuente del tratamiento sin N fue superfosfato triple (0% N- 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- 0% K<sub>2</sub>O). En los tratamientos con N se aplicaron 120 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> de fosfato de amonio (18% N- 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- 0% K<sub>2</sub>O) en la hilera. En forma suplementaria se adicionaron en el tratamiento c) 23 kg N ha<sup>-1</sup> al voleo en forma de urea en macollaje y en primordio floral, totalizando 68 kg N ha<sup>-1</sup>. El manejo general de los experimentos fue realizado según las prácticas habituales del productor. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones y 3 tratamientos. El tamaño de cada bloque (cuadro de riego) fue de 13 x 50 m el que contenía 3 unidades experimentales de 6,2 m de ancho por 10 m de largo. Cada unidad experimental estuvo posicionada en zonas del cuadro de riego con una óptima

población. El arroz se sembró en suelo seco en hileras de 17 cm y previo a la instalación de los tratamientos fueron tomadas muestras de suelo y fertilizante las que se analizaron para  $\delta^{15}\text{N}$ . El cultivo de arroz fue muestreado a macollaje, primordio floral, floración y cosecha (grano + paja), mediante el corte a ras del suelo de las plantas existentes en 3 líneas de siembra de 0,3 m cada una totalizando 0,9 m de largo. También a cosecha fueron tomadas muestras de malezas no fijadoras de N presentes en los distintos sitios en cada tratamiento; *Luziola peruviana* el primer año y *Alternanthera philoxeroides* el segundo. Las muestras de suelo se secaron a 45°C y las de plantas a 60° C durante 48 h. Todas las muestras se molieron y tamizaron a 1 mm. Las submuestras para análisis isotópicos tuvieron un molido adicional en micro-molino rotatorio (Marca Sample Tek, modelo 200 via Rotator). Cada muestra fue pesada dentro de cápsulas de estaño, y éstas fueron dispuestas en un analizador elemental Flash EA 112 acoplado a un espectrómetro de masa Finnigan MAT DELTA<sup>plus</sup> XL (Bremen, Alemania), donde se determinó la concentración de carbono orgánico (CO) total de suelos, N total y abundancia natural de  $^{15}\text{N}$ . La relación isotópica se expresó en notación delta ( $\delta$ ) en partes por mil (‰):

$$\delta^{15}\text{N} = \left( \frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

donde  $\delta^{15}\text{N}$  es la composición isotópica de la muestra y R es la relación molar del isótopo pesado sobre el liviano ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) para la muestra y el estándar (aire = 0,3663 atom. %).

A cosecha se determinó el rendimiento en grano previo desborde de 2 m de cabecera y fondo y 1,5 m en ambos lados, colectándose 2 submuestras de 5,25 m<sup>2</sup> cada una. Las parcelas fueron cortadas en forma manual siendo separada la paja del grano en trilladora estática.

### **2.4.3. Análisis estadístico**

Las respuestas agronómicas fueron evaluadas utilizando modelos mixtos (PROC MIXED) del paquete estadístico SAS (Littell et al., 1996). En el modelo estadístico, los sitios, los tratamientos de N y sus interacciones fueron considerados como efectos fijos, mientras que

los bloques anidados en sitios fueron considerados como efectos aleatorios. Para determinar la significancia estadística de los efectos fijos en todos los análisis se utilizó un test F con un  $P=0,05$ .

## **2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.5.1. $\delta^{15}\text{N}$ del suelo**

Los suelos variaron en sus características texturales, contenidos de CO, N y valores de  $\delta^{15}\text{N}$  (cuadro 1). El valor promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  de éstos, estuvo en el rango de lo reportado a nivel internacional (6,1‰) para suelos agrícolas (Makarov, 2009). Se encontró una correlación positiva ( $R= 0,81$ ;  $P=0,001$ ) entre el contenido de arena y la señal isotópica ( $\delta^{15}\text{N}$ ) del suelo. Los suelos más livianos, correspondieron a los sitios de menor CO y mayor intensidad agrícola, similar a lo reportado por Mori, (2009). En este estudio, estos sitios (localidades de Río Branco y Rincón de Ramírez), presentan una historia arrocera de casi un siglo. Por otro lado, los suelos de menor  $\delta^{15}\text{N}$  fueron los de India Muerta en el primer año (2,34‰ y 3,19‰, para APL y APN respectivamente). Estos sitios fueron los de menor historia arrocera previa Uruguay (30 años, con baja frecuencia de uso) y que hasta hace 4 décadas fueron humedales con suelos del gran grupo de los Gleysoles con altos contenidos de materia orgánica y posiblemente residuos de la vegetación nativa descompuestos parcialmente. Posiblemente la absorción de N empobrecido en  $^{15}\text{N}$  por la vegetación nativa a lo largo del tiempo, producto de la escasa mineralización de la materia orgánica del suelo y su posterior incorporación como restos vegetales empobrecidos en  $^{15}\text{N}$  sobre la superficie de éste, explique el bajo valor relativo de  $\delta^{15}\text{N}$  de estos suelos comparados con los demás (Högberg, 1997).

Tanto los suelos sobre APL como APN (cuadro 1), presentaron valores de  $\delta^{15}\text{N}$  muy similares entre sí. Esta comparación no es del todo correcta, ya que la ubicación de cada sitio de la misma localidad fue próxima pero no contigua, pero indicaría que el N fijado en la etapa de pasturas se diluyó en un pool de N total del suelo significativamente mayor, y que la fijación acumulada no ha cambiado aún el valor isotópico del suelo. Para que estos cambios fuesen detectados hubiesen sido necesarias entradas de N al suelo por medio de la FBN de una

magnitud mayor a la ocurrida. Según Mallarino et al., (1990) pasturas mezcla con trébol blanco (*Trifolium Repens* L.) son capaces de fijar entre 30 y 46 kg N Mg<sup>-1</sup> MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, por lo que, la cantidad de N fijado dependerá de la productividad de la pastura. Trabajos de Schulz, Keatinge y Wells, (1999) y Peoples et al. (2004), señalan que entradas de N mayores a 100 kg ha<sup>-1</sup> fueron logradas con pasturas que alcanzaron productividades mayores a 5 Mg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Seguramente en nuestro trabajo la inexistencia de diferencias en la señal isotópica del suelo entre antecesores esté asociada a la productividad típica de las pasturas en el este del país ya que, en rotación con arroz, trabajos nacionales muestran valores cercanos a 1,7 Mg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Hirczak y Rodriguez, 2005).

### **2.5.2. Relaciones entre $\delta^{15}\text{N}$ en planta y $\delta^{15}\text{N}$ en suelo**

El  $\delta^{15}\text{N}$  en planta dependen entre otros de si la fuente de N utilizada es orgánica o inorgánica (Choi et al., 2002; Choi et al., 2006; Yun et al., 2011), de si la forma mineral de N absorbida es  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^-$  (Yoneyama, Ito y Engelaar, 2003), de la profundidad a la que éste N es tomado (Watanabe et al., 1987; Baptista et al., 2014), de la existencia de asociaciones entre la rizosfera y organismos fijadores de N (Hobbie, Macko y Williams, 2000) y de los procesos de fraccionamiento de N asociados a la absorción y translocación de N dentro de la planta que estén ocurriendo (Evans, 2001; Robinson, 2001). En nuestro trabajo se encontró una asociación positiva entre el  $\delta^{15}\text{N}$  de los suelos y las plantas de arroz en los tratamientos sin agregado de N (figura 2 a). Esta relación fue más significativa ( $P= 0,0054$ ;  $R^2= 0,68$ ) cuando no fueron considerados 2 sitios con finalización anticipada de riego que cuando estos fueron incluidos ( $P= 0,027$ ;  $R^2=0,42$ ). Sin tomarlos en consideración, los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en planta entera estuvieron enriquecidos en forma significativa ( $P=0,0018$ ) 39% respecto al  $\delta^{15}\text{N}$  de los suelos (figura 2 a). Este enriquecimiento  $^{15}\text{N}$  fue gradual, teniendo un primer nivel de enriquecimiento ( $P=0,0376$ ) considerando la paja respecto al suelo (figura 2 c) y un segundo nivel ( $P=0,0004$ ) considerando el grano respecto a la paja (figura 2 b). En esta línea, investigaciones conducidas mediante esta técnica isotópica en el cultivo de arroz también han reportado enriquecimientos en  $^{15}\text{N}$  en planta a cosecha respecto al valor de  $\delta^{15}\text{N}$  del suelo (Watanabe et al., 1987; Yoneyama, Kuono y Yazaki, 1990; Yun et al., 2011). El enriquecimiento

en  $^{15}\text{N}$  de la planta respecto al suelo se explicó por la absorción de N mineral enriquecido en este isótopo. Esto sucede debido a las pérdidas por desnitrificación que experimentan los suelos asociados a la inundación permanente luego de una etapa de secano y a la volatilización del N, a partir de  $\text{NH}_4^+$  producto de la mineralización anaeróbica. La otra vía de pérdida reportada es la volatilización de N desde la propia planta de arroz, generando una destilación del N más liviano, quedando en planta proporcionalmente más  $^{15}\text{N}$ . En este sentido, trabajos pioneros conducidos en invernáculo (Da Silva y Stutte, 1981a; Da Silva y Stutte 1981b) no identificaron grandes pérdidas por volatilización de  $\text{NH}_3$  por parte del vegetal. Estos autores reportaron pérdidas de hasta  $15 \text{ kg N ha}^{-1}$  a lo largo del período experimental, si bien utilizaron para la evaluación plantas de arroz durante la fase vegetativa. No obstante, Mikkelsen (1987), evaluando todo el ciclo del cultivo, menciona que estas pérdidas por la propia planta pueden ser importantes, superando en ocasiones los  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$ , las que según Kumagai et al. (2011); Chen et al. (2009) y Hayashi, Nishimura y Yagi, (2008), en variedades índicas, comienzan en el embarrigado del cultivo y se incrementan en el estado de floración y llenado de grano.

En contraposición a esto, en sistemas de cultivos de secano este aspecto no es evidenciado encontrándose en planta una señal isotópica menor a la del suelo (Meints, Boone y Kurtz, 1975; Choi et al., 2006; Zhou et al., 2013). En gran medida esto está explicado por que el proceso predominante es el de fraccionamiento a favor del isótopo más liviano ( $^{14}\text{N}$ ) que ocurren desde que el N es absorbido hasta que es translocado a las diferentes partes de las plantas. En los sitios de RT-APN el primer año y RB2-APL el segundo, donde el riego se vio interrumpido en forma anticipada, fueron encontrados resultados como en la bibliografía recién expuesta para secano, siendo la señal isotópica en planta menor a la del suelo (figuras 1 a y 1 c). En estos dos sitios, otro aspecto a considerar por sobre al fraccionamiento interno a favor del isótopo liviano realizado por las plantas está relacionado con el suelo. En estos sitios, el contenido de arena fue de 47% y 51% (RT-APN y RB2-APL respectivamente) lo que en momentos de alta temperatura permiten un rápido secado del suelo favoreciendo la nitrificación del  $\text{NH}_4$  acumulado en la etapa de anaerobiosis (Breuer, Kiese y Butterbach-Bahl, 2002). Guindo, Wells y Norman (1994), sostienen que luego de la floración del arroz, un 20-30% del N que va al grano proviene principalmente de N del suelo. Por otro lado, Linquist et al. (2011), señalan para los cultivos de arroz, períodos de secado del campo de entre 10 y 12 días, con temperaturas moderadas, significan una acumulación de  $25 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ . En nuestro trabajo,

la finalización anticipada del riego de estos sitios ocurrió en febrero, por lo que la temperatura no debería haber limitado la nitrificación. Considerando los dos conceptos mencionados anteriormente es posible que el cultivo haya absorbido N de una fuente con la misma señal isotópica que el suelo y sobre el cual hayan operado los procesos internos en planta de discriminación a favor del  $^{14}\text{N}$ , dando como resultado la disminución en el valor de  $\delta^{15}\text{N}$  de esta respecto al suelo (Mariotti et al., 1980).

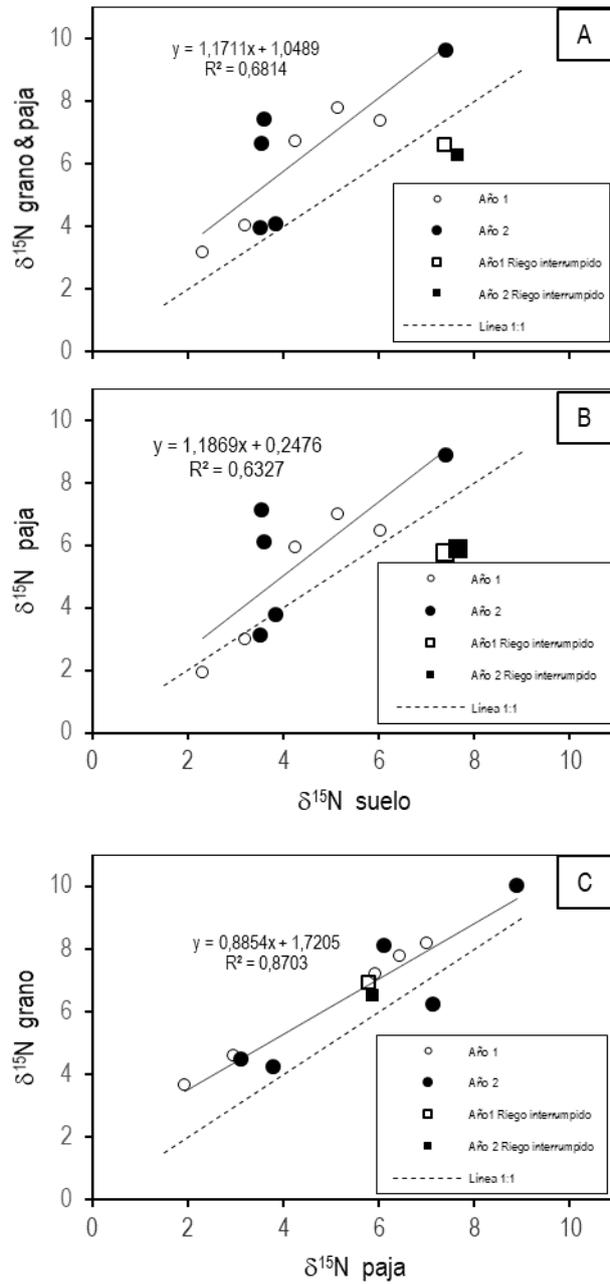


Figura 1.- Relación entre los valores a cosecha de  $\delta^{15}N$  en a) suelo y planta entera, b) suelo y paja de arroz y c) paja de arroz y grano. Estas relaciones corresponden a todas las localidades estudiadas para los tratamientos sin agregado de N.

También se observó una asociación positiva entre los valores de  $\delta^{15}N$  del suelo y de las malezas en los tratamientos sin agregado de N ( $P=0,026$  y  $0,042$  año 1 y 2

respectivamente), similar a la observada con el  $\delta^{15}\text{N}$  del arroz. Además, los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  de las malezas descendieron cuando estas crecieron en condiciones de secano posterior al retiro del riego (figura 2). Si bien las malezas fueron diferentes entre años (*Luziola peruviana* en el primero y *Alternanthera philoxeroides* en el segundo), las tendencias observadas en relación a los valores isotópicos fueron las mismas.

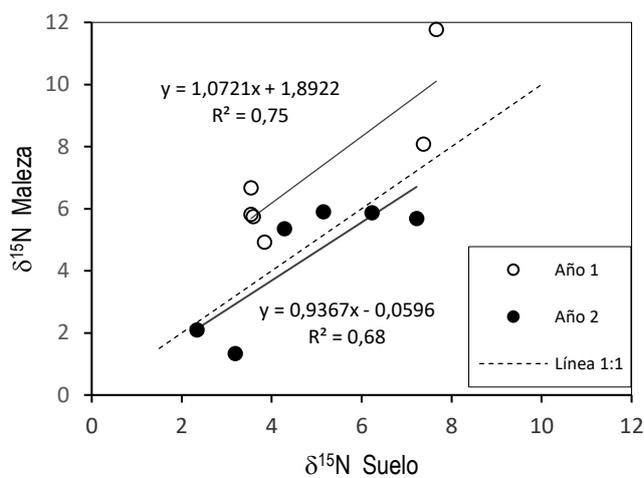


Figura 2.- Relación entre el  $\delta^{15}\text{N}$  de la maleza presente en cada año a la cosecha del arroz y el  $\delta^{15}\text{N}$  del suelo en los tratamientos sin agregado de N.

Estos resultados sugieren que la mayor contribución de N al cultivo fue realizada por el suelo y no por fijadores de N en vida libre como se hipotetizó en algún momento (Deambrosi y Blanco, 2008). Esta conclusión está basada en que, en condiciones de riego por inundación, los valores isotópicos de las plantas fueron superiores a los del suelo debido a la existencia de pérdidas de N por desnitrificación y volatilización, no existiendo evidencia de FBN. Por otro lado, cuando se retiró el riego antes de la cosecha, los valores isotópicos de las plantas fueron inferiores a los del suelo, siendo lo esperado en condiciones de secano debido a la translocación de N que favorece el movimiento del  $^{14}\text{N}$  por sobre el  $^{15}\text{N}$ . En estas condiciones este comportamiento es el esperado, no existiendo argumentaciones en la literatura de que la disminución de la señal isotópica en la planta sea causada por la FBN. La ausencia de diferencias en los valores isotópicos entre las malezas y el arroz indicaría además que en cada ambiente los mismos efectos de discriminación isotópica fueron observados en ambas

especies. Högber, (1997) menciona que, en aquellos casos donde se esté frente a la presencia de N derivado de la atmósfera deberían existir diferencias en  $\delta^{15}\text{N}$  mayores a 5 ‰ entre especies fijadoras y no fijadoras, aspecto que no sucedió en este trabajo al comparar la señal isotópica del arroz y las malezas (cuadro 3).

Al igual que en nuestra investigación, es extensa la literatura que muestra para una gran diversidad de ambientes, aportes de N proveniente del suelo al arroz debidos a la mineralización de la MO del orden de 70-90% (Bacon et al., 1989; Kealey et al., 1994; Méndez y Deambrosi, 2009). En función de los datos presentados hasta el momento queda planteada la incógnita respecto a si los procesos de fraccionamiento isotópico mencionados anteriormente y que se evidenciaron en este trabajo no pueden estar enmascarando pequeñas contribuciones de N vía fijación biológica. Este aspecto se discutirá más adelante.

### **2.5.3. Efecto de la fertilización N en el valor de $\delta^{15}\text{N}$ en planta**

Según Choi et al., (2002) el mezclado del N agregado con el N del suelo, asociado a los procesos de fraccionamiento, hacen que el  $\delta^{15}\text{N}$  en planta se desvíe de la señal  $^{15}\text{N}$  del N aplicado. El  $\delta^{15}\text{N}$  del fosfato de amonio y urea utilizados en esta investigación fueron de -0,52‰ y -0,63‰ en la primera zafra mientras que en la segunda fueron de -0,67‰ y -0,18‰. En términos absolutos, el tratamiento 22 N provocó un aumento del  $\delta^{15}\text{N}$  en planta respecto al tratamiento 0 N de 0,1‰ el primer año y 0,49‰ el segundo. Si bien estas diferencias fueron significativas solo en el año 2, en ambos casos los resultados sugieren la absorción de N enriquecido en  $^{15}\text{N}$ . Choi, Ro y Lee (2003), mencionan que el enriquecimiento de la fuente principal de N debido al fraccionamiento isotópico asociado a las transformaciones y pérdidas de N pueden provocar aumentos significativos de  $\delta^{15}\text{N}$  en planta en un corto período de tiempo. El mayor valor de  $\delta^{15}\text{N}$  en planta a cosecha en el tratamiento 22 N en el segundo año (cuadro 3) está explicado por la absorción de N enriquecido en  $^{15}\text{N}$  a macollaje previo a la inundación. En este momento, la absorción de N por un cultivo de escasa biomasa generó diferencias importantes de más de 3‰ en el  $\delta^{15}\text{N}$  a favor del tratamiento 22 N en comparación al testigo sin N (figura 3). Si bien estas diferencias tendieron a disminuir durante el ciclo del cultivo, se mantuvieron hasta la cosecha. La generación de un medio enriquecido en  $^{15}\text{N}$  se debió

probablemente a pérdidas por desnitrificación durante la fase de secano del cultivo entre la fertilización basal y la inundación definitiva. En función de los resultados presentados, estas pérdidas fueron importantes el segundo año y estuvieron asociadas al régimen de precipitaciones ocurridas ya que las mismas duplicaron en cantidad y triplicaron en frecuencia al primero (información no presentada). Según varios autores, la desnitrificación es de los procesos que causan un mayor fraccionamiento isotópico (Högberg, 1997; Robinson, 2001) lo que está en línea con los resultados encontrados.

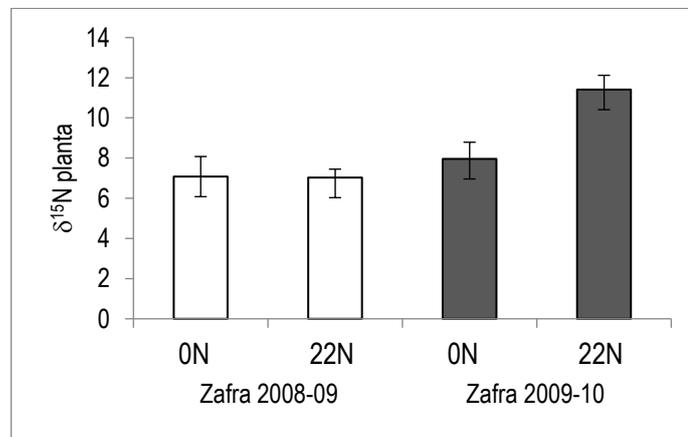


Figura 3.-  $\delta^{15}\text{N}$  en planta de arroz en el estadio de macollaje, previo a la inundación definitiva en las 2 zafras evaluadas. Zafra 2008-09 sin lluvias post fertilización basal, zafra 2009-10 con eventos de lluvia post fertilización basal.

El T68 mostró en la primera zafra una disminución del  $\delta^{15}\text{N}$  en planta entera a cosecha de  $-0,38\text{‰}$  y  $-0,48\text{‰}$  respecto a T0 y T22 respectivamente, siendo todos estadísticamente diferentes entre sí. En el año 2, con mayor lluvia en la etapa siembra-inundación y mayor desnitrificación, esta disminución no se evidenció, siendo los tratamientos T68 y T0 iguales. No obstante, una forma más precisa de constatar la disminución en la señal isotópica en planta a causa del agregado de la dosis completa de N es descontando el enriquecimiento previo experimentado por el T22 frente al T0. Este índice se denominó T68 Ajustado (T68Aj), y se estimó como  $\text{T68} - (\text{T22} - \text{T0})$ , y cuantifica el efecto sobre el valor  $\delta^{15}\text{N}$  de la planta del agregado de dos dosis de  $23 \text{ kg N ha}^{-1}$  (en macollaje y primordio floral) sin considerar el agregado en T22

(solo a la siembra). En este sentido en los dos años evaluados, el agregado de N en estos dos momentos generó una disminución significativa de la señal isotópica respecto al testigo ( $P=0,0004$  y  $P=0,0001$  año 1 y 2 respectivamente), demostrando que el cultivo se nutrió de una fuente de N empobrecida en  $^{15}\text{N}$  respecto al suelo, como lo es el fertilizante. Esta disminución, que estuvo entorno a los  $0,5\text{‰}$ , pareció estar asociada a la dosis de N utilizada en este caso. Efectos de mayor magnitud han sido observados cuando se agregaron dosis más altas de N. Yun et al. (2011) y Yoneyama, Kuono y Yazaki (1990), reportaron diferencias respecto a la señal isotópica del suelo de  $-1,3\text{‰}$  y  $-2,54\text{‰}$  con fertilizaciones equivalentes a  $110 \text{ kg N ha}^{-1}$  y mayores a  $500 \text{ kg N ha}^{-1}$  respectivamente. Si bien en las malezas analizadas no fueron detectadas diferencias significativas en la señal isotópica debido al agregado de N, existió correlación positiva entre el  $\delta^{15}\text{N}$  de las malezas y las plantas de arroz en cada año ( $R=0,99$  y  $R=0,95$  año 1 y 2 respectivamente).

Cuadro 3.-  $\delta^{15}\text{N}$  en plantas de arroz enteras y malezas a cosecha según los diferentes tratamientos de N en las 2 zafras.

Tratamiento	Zafra 2008-2009		Zafra 2009-2010	
	grano + paja	malezas	grano + paja	malezas
	----- $\delta^{15}\text{N}$ -----			
T0	5,92	4,50	6,33	7,61
T22	6,02	4,56	6,75	7,83
T68	5,54	4,26	6,25	7,28
T68Aj	5,47	4,18	5,84	7,06
	ANAVA T0-T22-T68			
P-valor	0,001	0,407	0,008	0,773
DMS (5%)	0,259	---	0,321	---
	ANAVA T0 vs. T68Aj			
P-valor	0,0004	0,199	0,0011	0,279
DMS (5%)	0,243	---	0,281	---

## 2.6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos sugieren que la principal fuente de N al cultivo de arroz provino de la mineralización de la M.O en función de la fuerte asociación que se encontró entre las señales isotópicas de las plantas de arroz a cosecha y el suelo.

La segunda fuente nitrogenada de importancia para la nutrición del cultivo fue el fertilizante agregado. La reducción del  $\delta^{15}\text{N}$  en la planta de arroz en los tratamientos que agregaron urea (T68), demostraron que el cultivo se nutrió de una fuente de N empobrecido en  $^{15}\text{N}$  como el fertilizante.

En ninguno de los experimentos pareció haber evidencia clara de que la FBN por parte de las pasturas mezcla con leguminosas hayan contribuido en forma importante con N al cultivo de arroz sembrado después de ésta, en función de los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en planta y suelo sobre este antecesor.

En función de esta información, y siendo identificado el suelo como la fuente de mayor aporte de N al cultivo, sería necesario desarrollar o ajustar índices que permitan predecir la respuesta del cultivo a la fertilización N en función de la oferta de N del suelo dada.

## 2.7. BIBLIOGRAFÍA

- Bacon, P.E., Lewin, L.G., Mc Garity, J.W., Hoult, E.H., Alter, D.** (1989). The effect of stubble management and N fertilization practices on the nitrogen economy under intensive rice cropping. *Australian Journal of Soil Research*, 27: 685-698.
- Baptista, R.B., de Morais, R.F., Leite, J.M., Schultz, N., Rodrigues Alves, B.J., Boody, R.M., Urquiaga, S.** (2014). Variations in the  $^{15}\text{N}$  natural abundance of plant available N with soil depth: Their influence on estimate of contributions of biological  $\text{N}_2$  fixation to sugar cane. *Applied Soil Ecology*, 73: 124-129.
- Biggs, I.M., Steward, G.R., Wilson, J.R, Critchley, C.** (2002).  $^{15}\text{N}$  natural abundance studies in Australian commercial sugarcane. *Plant and Soil*, 238: 21-30.
- Breuer, L., Kiese, R., Butterbach-Bahl, K.** (2002). Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils. *Soil Science Society of American Journal*, 66:834-844.

- Buresh, R., Peng, S., Huang, J., Yang, J., Wang, G., Zhong, X., Zou, Y.** (2004). Rice Systems in China with high nitrogen inputs. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.143-153). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Chen, M., Huang, J., Cui, K., Nie, L., Shah, F.** (2009). Genotypic variations in terms of NH<sub>3</sub> volatilization in four rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Asian Journal of Plant Sciences*, 8(5): 353-360.
- Choi, W.J., Arshad, M.A., Chang, S.X., Kim, T.H.** (2006). Grain <sup>15</sup>N of crops applied with organic and chemical fertilizers in a four-year rotation. *Plant and Soil*, 284: 165-174.
- Choi, W.J., Ro, H.M., Lee, S.M.** (2003). Natural <sup>15</sup>N abundance of nitrogen in soil treated with fertilizer and compost under changing soil moisture regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 1289-1298.
- Choi, W.J., Sang, M.L., Ro, H.M., Kim, K.C., Yoo, S.H.** (2002). Natural <sup>15</sup>N abundance of maize and soil amended with urea and composted pig manure. *Plant and Soil*, 245: 223-232.
- Da Silva, P.R.F., Stutte, C.A.** (1981a). Nitrogen volatilization from rice leaves. II. Effects of source of applied nitrogen in nutrient culture solution. *Crop Science*, 21: 913-916.
- Da Silva P.R.F., Stutte, C.A.** (1981b). Nitrogen Loss in Conjunction with Transpiration from Rice Leaves as Influenced by Growth Stage, Leaf Position, and N Supply 1. *Agronomy Journal*, 73(1): 38-42.
- Dart, P.J.** (1986). Nitrogen fixation associated with non-legumes in agriculture. *Plant and Soil*, 90:303-334.
- Deambrosi, E., Blanco, P.** (2008). Prólogo, En: *Fijación de nitrógeno por cianobacterias y fertilización en arroz*. Montevideo, Uruguay. INIA (Serie FPTA-INIA, 21).
- Deambrosi, E.** (2007). Rice production situation in Uruguay. *International Rice Commission Newsletter* (p. 84-85). 56.
- Deambrosi, E., Méndez, R.** (2007). *Respuesta de cultivares de arroz tipo Indica a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno en la zona este de Uruguay*. 36 p. Montevideo, Uruguay. INIA. (Serie Técnica, 167).

- Evans, D.** (2001). Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends in Plant Science*, 8(3): 121-1126.
- Fernández Valiente, E., Quesada, A., Prospero, C., Nieva, M., Leganes, F., Ucha, A.** (1997). Short-and long-term effects of ammonium on photodependent nitrogen fixation in wetland rice fields of Spain. *Biology and fertility of soils*, 24(4): 353-357.
- Giller, K.E., Chalk, P., Dobermann, A., Hammond, L., Heffer, P., Ladha, J.K., Nyamudeza, P., Maene, L., Ssali, H., Freney, J.** (2004). Emerging Technologies to Increase the Efficiency of Use of Fertilizer Nitrogen. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.35-55). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Guindo, D., Wells, B.R., Norman, R.J.** (1994). Cultivar and nitrogen rate influence on nitrogen uptake and partitioning in rice. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3): 840-845.
- Hayashi, K., Nishimura, S., Yagi, K.** (2008). Ammonia volatilization from a paddy field following application of urea: Rice are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia. *Science of the Total Environment*, 390: 485-494.
- Hirczak, A.R., Rodriquez, M.J.** (2005). *Efecto de la fertilización fosfatada en un mejoramiento forrajero sobre rastrojo de arroz*. Tesis (Ing. Agr.) Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 81 pp.
- Hobbie, E.A., Macko, S.A., Williams, M.** (2000). Correlations between foliar  $\delta^{15}\text{N}$  and nitrogen concentrations may indicate plant-mycorrhizal interactions. *Oecologia*, 122: 273-283.
- Högberg, P.** (1997). Transley Review N°95.  $^{15}\text{N}$  natural abundance in soil-plant systems. *New Phytology Journal*, 137: 179-203.
- Jha, M.N., Prasaad, A.N., Sharma, S.G., Bharati, R.C.** (2001). Effect of fertilization rate and crop rotation on diazotrophic cyanobacteria y paddy field. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17(5):463-468.
- Kealey, L.M., Humphreys, E., Black, A.S., Muirhead, W.A.** (1994). Presowing nitrogen fertilizer management for aerial sown rice on puddled soil. *Australian Journal of experimental Agriculture*, 34(7): 1013-1020.
- Kumagai, E., Araki, T., Hamaoka, N., Ueno, O.** (2011). Ammonia emission from leaves of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Plant Production Science*, 14(3): 249-253.

- Kundu, D.K., Ladha, J.K.** (1995). Efficient management of soil and biologically fixed N<sub>2</sub> in intensively-cultivated rice fields. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(5): 431-439.
- Ladha, J.K., Reddy, P.M.** (2003). Nitrogen fixation in rice systems: state of knowledge and prospects. *Plant and Soil*, 252:151-167.
- Linquist, B., Koffler, K., Hill, J.E., van Kessel, C.** (2011). Rice field drainage affects nitrogen dynamics and management. *California Agriculture*, 65 (2):80-84.
- Littell, R.C., Milliken, R.G., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D.** (1996). *SAS system for mixed models*. Cary: SAS Institute. 633.
- Makarov, M.I.** (2009). The nitrogen isotopic composition in soil and plants: Its use in environmental studies (a review). *Eurasian Soil Science*, 42(12): 1335-1347.
- Mallarino, A.P., Wedin, W.F., Goyenola, R.S., Perdomo, C.H., West, C.P.** (1990). Legume species and proportion effects on symbiotic dinitrogen fixation in legume-grass mixtures. *Agronomy Journal*, 82: 785-789.
- Mariotti, A., Mariotti, F., Amarger, N., Pizelle, G., Ngambi, J.M., Champigny, M.L., Moyose, A.** (1980). Fractionnements isotopique de l'azotelsors des processus d'absorption des nitrates et de fixation de l'azote atmospherique par les plants. *Physiologie Vegetale*, 18: 163-181.
- Meints, V.W., Boone, L.V., Kurtz, L.T.** (1975). Natural <sup>15</sup>N abundance in soil, leaves, and grain as influenced by long term additions of fertilizer N at several rates. *Journal of Environmental Quality*, 4(4): 486-490.
- Méndez, R., Deambrosi, E.** (2009). *Coberturas nitrogenadas para la producción de arroz. Parte I Eficiencia de aplicación*. 38 p. Montevideo, INIA. (Serie Técnica, 179).
- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias).** (2017). *Encuesta de arroz zafra 2016/17*. Montevideo, Uruguay. DIEA. 25 p. (Serie Encuestas, 346)
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca).** (1979). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1000000*. Montevideo, División Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.
- Mikkelsen, D.S.** (1987). Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plant and Soil*, 100: 71-97.

- Mori, C.** (2009). *Cambios en la abundancia natural de  $^{15}\text{N}$  debido a la perturbación agrícola*. (tesis magister en ciencias agrarias). Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 74p.
- Peoples, M.B., Angus, J.F., Swan, A.D., Dear, B.S., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., Ryan, M.H., Virgona, J.M.** (2004). Low-Input Systems. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.103-114). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Robinson, D.** (2001).  $\delta^{15}\text{N}$  as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology and Evolution*, 16(3): 153-162.
- Roger, P.A., Ladha, J.K.** (1992). Biological  $\text{N}_2$  fixation in wetland rice fields: Estimation and contribution to nitrogen balance. *Plant and Soil*, 141: 41-55.
- Schulz, S., Keatinge, J.D.H., Wells, G.J.** (1999). Productivity and residual effects of legumes in rice-based cropping systems in a warm-temperate environment I. Legume biomass production and N fixation. *Field Crops Research*, 61(1):23-35.
- Thomas, R.J.** (2000). Nitrogen fixation by forage legumes as a driving force behind the recuperation and improvement of soil quality in tropical agricultural systems: Opportunities for wider use of forage legumes? En: F.O. Pedrosa, M. Hungria, M.G. Yates, W.E. Newton (eds). *Nitrogen Fixation: From Molecules to Crop Productivity*. (p.539-540). Dordrecht: Springer.
- Watanabe, I., Liu, C.C.** (1992). Improving nitrogen-fixing systems and integrating them into sustainable rice farming. En: J.K. Ladha, T. George, B.B. Bohlool. (eds.). *Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture*. (pp.57-67). Dordrecht: Springer (Developments in Plant and Soil Sciences, 49).
- Watanabe, I., Yoneyama, T., Padre, B., Ladha, K.** (1987). Difference in natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in several rice (*Oryza sativa* L.) varieties: application for evaluating  $\text{N}_2$  fixation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 33(3): 407-415.
- Yoneyama, T., Ito, O., Engelaar, W.M.** (2003). Uptake, metabolism and distribution of nitrogen in crop plants traced by enriched and natural  $^{15}\text{N}$ : progress over the last 30 years. *Phytochemistry Reviews*, 2(1): 121-132.

- Yoneyama, T., Kuono, K., Yazaki, J.** (1990). Variation of natural  $^{15}\text{N}$  abundance of crops and soils in Japan with special reference to the effect of soil conditions and fertilizer application. *Soil Science and Plant Nutrition*, 36(4): 666-675.
- Yun, S.I., Lim, S.S., Lee, G.S., Lee, S.M., Kim, H.Y., Ro, H.M., Choi, W.J.** (2011). Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of paddy rice (*Oryza sativa* L.) grown with synthetic fertilizer, livestock manure compost, and hairy vetch. *Biology and Fertility of Soils*, 47: 607-617.
- Zhou, W., Hu, Ch.S., Li, J., Christie, P., He, X.H., Ju, X.T.** (2013). Natural  $^{15}\text{N}$  abundance in winter wheat amended with urea and compost: A long-term experiment. *Pedosphere*, 23(6): 835-843.

### **3. EFICIENCIA DE USO DEL N EN EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY I: ESTUDIO NO ISOTÓPICO**

**Castillo Jesús, Terra José A., Perdomo Carlos H.**

#### **3.1. RESUMEN**

En Uruguay se producen aproximadamente 100 kg de grano por kg N agregado, valor superior a lo reportado en otros sistemas arroceros del mundo. Si bien esto indica un factor de productividad parcial (FPP) del N agregado alto, poco se conoce de los demás parámetros de eficiencia de uso del N, siendo su cuantificación el objetivo de este trabajo. Durante dos zafras se instalaron seis ensayos/año, en cuatro localidades, sobre diferentes tipos de suelo. En cada localidad se instaló un experimento sobre antecesor de pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas (APL) y otro sobre antecesor de gramíneas nativas (APN), evaluándose 3 tratamientos de N (T0, T22 y T68). Se cuantificaron el FPP, las eficiencias de recuperación aparente (ERA), fisiológica (EFIS), agronómica (EA), de uso interno (EUI), y la respuesta relativa a la fertilización N ( $RF_N$ ). En el primer año (climáticamente más favorable), el rendimiento alcanzado fue 23% superior al segundo, mientras que la absorción total de N, y la acumulación de materia seca fueron 36% y 22 % respectivamente. En promedio, la siembra sobre APL alcanzó un 13% más de productividad frente al APN y una absorción de N 9% superior. Los valores promedio calculados para la  $RF_N$ , ERA, EFIS, EA y EUI y fueron de 15 y 40%, 41, 17 y 58 kg kg<sup>-1</sup> respectivamente, presentando variaciones entre años. Salvo la ERA, que presentó valores superiores, los demás indicadores fueron similares a lo reportado internacionalmente. La alta EUI del T0 explicó la baja EFIS y el alto FPP observados.

**Palabras clave:** Índices de eficiencia de uso del N, Respuestas agronómicas, Eficiencia de recuperación aparente

### 3.2. SUMMARY

In Uruguay, approximately 100 kg of grain per kg N added are produced, a higher value than that reported for other rice systems worldwide. While this indicates a high partial factor productivity (PFP) of added N, little is known about the other N use efficiency parameters, being its quantification the aim of this work. During two growing seasons, six-year field trials were installed in four different locations with different soil types. At each location, an experiment over a mixed grass and legumes pasture antecedent (LPA) and other over native grass antecedent (NPA) were installed, and three N treatments were evaluated (T0, T22 and T68). The PFP, the apparent N recovery efficiency (ARE), the physiological (PHISE), the agronomic (AE), the internal use (IUE) and the relative response to N fertilization ( $FR_N$ ) were quantified. The first year (better climatically), reached yield was 23% higher than second, while total N absorption and dry matter accumulation were 36 and 22% respectively. On average, sowing over LPA reached 13% more productivity compared with APN and a N absorption 9% higher. Calculated average values of  $FR_N$ , ARE, PHISE, AE and IUE were 15 and 40%, 41, 17 and 58 kg kg<sup>-1</sup> respectively, showing variations in the indices among years. Except for the ARE, which showed higher values than reported, the other parameters were like international data. High IUE of T0 explained both, the low PHISE and the high PFP observed

**Keywords:** N use efficiency indices, Agronomic responses, Apparent recovery efficiency

### 3.3. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el nutriente de mayor importancia a la hora de incrementar el rendimiento de los cultivos. En arroz, el logro de altas productividades está asociado al agregado de N vía fertilizantes en cantidades que igualan (Snyder y Slaton, 2002; Harrell y Saichuk, 2009) o superan (Ji-Yun, Ronngui y Rongle, 2002) las necesidades totales de N del cultivo.

Generalmente, el agregado de grandes cantidades de N en este cultivo se asocia con pérdidas importantes (Peng et al., 2006), las que potencialmente genera problemas ambientales significativos, al afectar aguas superficiales, subsuperficiales, así como la atmósfera (Liu y Diamond 2005, Ju et al., 2009, Olesen et al., 2004). Paralelamente, otro aspecto negativo generado a partir de estas pérdidas es la disminución en la eficiencia de uso del N, así como su eficacia.

Cassman et al. (1998), mencionan una serie de índices agronómicos comúnmente utilizados para describir la eficiencia de uso del N. Un índice sencillo e integrador que permite hacer comparaciones entre sistemas productivos diversos es el factor parcial de productividad (FPP) que es el cociente entre el rendimiento en grano alcanzado, respecto a cierta dosis de N aplicada:

$$FPP = \frac{R}{N_f} \quad [1]$$

donde R es el rendimiento en grano obtenido a partir de una determinada dosis de fertilizante nitrogenado ( $N_F$ ). Debido a que el rendimiento en grano alcanzado con una dosis de N dada equivale a la suma del rendimiento logrado sin agregado de N ( $R_{0N}$ ) más el rendimiento en grano incremental resultante de la aplicación de N ( $\Delta R$ ), el FPP puede expresarse como:

$$FPP = \frac{R_{0N} + \Delta R}{N_F} = \frac{R_{0N}}{N_F} + \frac{\Delta R}{N_F} \quad [2]$$

En el primer término de la ecuación, el cociente entre  $R_{0N}$  y  $N_F$  relaciona la productividad alcanzada sin agregado de N en un sistema en particular con las alcanzadas con agregado del nutriente. Por ser un cociente, valores altos indicaran un ajustado manejo del N para esa situación o una adecuada eficiencia y eficacia del N agregado. En contraposición, bajos valores indicarán un exceso o un inadecuado suministro que no posibilita explorar altos rendimientos.

El segundo término ( $\Delta R/N_F$ ), refleja el rendimiento en grano incremental debido a la fertilización N y es conocido como la eficiencia agronómica (EA).

A su vez, la EA está compuesta por la eficiencia de recuperación aparente del N aplicado (ERA):

$$ERA = \frac{\Delta N_P}{N_F} \quad [3]$$

y la eficiencia fisiológica (EFIS), que es la producción incremental de grano ( $\Delta R$ ) a partir de los kg de N absorbidos del fertilizante agregado ( $\Delta N_P$ ):

$$EFIS = \frac{\Delta R}{\Delta N_P} \quad [4]$$

Entonces, por medio de la combinación de las ecuaciones 2, 3 y 4, el FPP puede representarse también como:

$$FPP = \frac{R_{0N}}{N_F} + EA = \frac{R_{0N}}{N_F} + ERA * EFIS \quad [5]$$

Otro índice que permite cuantificar la eficiencia de uso en forma general es la eficiencia de utilización interna (EUI), que se estima como la relación entre el R y la absorción de N para una situación dada, con o sin fertilización.

$$EUI = \frac{R}{Abs.N_T} \quad [6]$$

LA EFIS, a su vez, representa el  $\Delta EUI$  entre una situación sin fertilización y otra fertilizada ( $EUI_N - EUI_{0N}$ ).

Hasta el momento, Uruguay es uno de los 3 países de mayor rendimiento de arroz a nivel mundial (Zorrilla, 2015), alcanzando en el promedio de los últimos 10 años un rendimiento de 8 Mg ha<sup>-1</sup> (MGAP-DIEA, 2017), agregando para esto entre 70 y 80 kg N ha<sup>-1</sup> (Pittelkow et al., 2016). Esto indica un FPP mayor a 100 kg kg<sup>-1</sup>, lo que duplica (Ladha et al., 2005) y en ocasiones triplica (Buresh et al., 2004, Peng et al., 2010) al obtenido en otros países. Si bien este índice podría diferenciar comercialmente las exportaciones del arroz del país, restan aún cuantificar los parámetros ERA, EFIS, EA y EUI, que permitan visualizar en forma más global la eficiencia de uso del N de la producción de arroz en Uruguay. Esta información sería de utilidad para mejoras en las prácticas de manejo actuales, como ha sucedido en otros sistemas arroceros del mundo (Zhao et al., 2013; Peng et al., 2010; Dobermann y Cassman, 2002).

Para responder a esto, se plantearon una serie de experimentos a campo en situaciones comerciales de producción, situadas sobre diferentes tipos de suelo, antecesores y años contrastantes.

El objetivo del trabajo fue cuantificar los valores de los distintos parámetros de la eficiencia de uso del N, para explicar la alta productividad alcanzada con un relativo bajo agregado de N (FPP), que caracteriza al cultivo de arroz en Uruguay. Este objetivo se plantea sobre la hipótesis de que el alto FPP se debe a valores altos de los demás índices de la eficiencia de uso del N.

### **3.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.4.1. Sitios experimentales y tratamientos evaluados**

Durante los años agrícolas 2008-09 (año 1) y 2009-10 (año 2) se instalaron 12 ensayos de campo, sobre cultivos comerciales, en cuatro localidades de la cuenca arroceras este del país (Río Branco, Rincón de Ramírez, India Muerta y Ramón Trigo). Las características de los suelos de cada sitio experimental se muestran en el cuadro 1.

En cada localidad, se instalaron 2 sitios experimentales, los que diferían en el antecesor de pasturas inmediato. Uno de estos antecesores fue una pastura mezcla de gramíneas con leguminosas (APL) mientras que el otro fue pasturas nativas regeneradas (APN). Dentro de cada localidad, la mayoría de los sitios estuvieron separados por distancias de hasta 300 m, mientras que en una localidad (Ramón Trigo) lo estuvo a 4000 m.

Cuadro 1.- Análisis físico químico del suelo (0 – 15 cm) de los 12 sitios experimentales.

Año 1 (2008-2009)	Localización	Clasificación suelos	pH	K (int) cmol*kg <sup>-1</sup>	CT	NT ---- % ----	ARE	ARC
Río Branco APN (RB1-APN)	32°40' S - 53°20' O	Planosol Subéutrico	5,2	0,14	1,17	0,11	40	25
Río Branco APL (RB1-APL)	32°41' S - 53°19' O	Planosol Subéutrico	5,1	0,19	1,16	0,13	43	23
Ramón Trigo APN (RT-APN)	32°22' S - 54°40' O	Brunosol Subéutrico	5,1	0,22	1,96	0,21	51	17
Ramón Trigo APL (RT-APL)	32°20' S - 54°35' O	Brunosol Éutrico	6,1	0,29	2,36	0,24	58	31
India Muerta APN (IM1-APN)	33°43' S - 53°50' O	Gleysol Lúvico	5,2	0,37	3,64	0,37	23	24
India Muerta APL (IM1-APL)	33°39' S - 53°51' O	Gleysol Háplico	5,4	0,37	3,05	0,31	27	28
<b>Año 2 (2009-2010)</b>								
Río Branco APN (RB2-APN)	32°38' S - 53°21' O	Planosol Subéutrico	5,5	0,15	0,71	0,06	47	15
Río Branco APL (RB2-APL)	32°42' S - 53°19' O	Planosol Subéutrico	5,4	0,13	0,78	0,08	47	16
Rincón Ramírez APN (RR-APN)	32°50' S - 53°42' O	Planosol Subéutrico	5,7	0,27	1,08	0,12	36	26
Rincón Ramírez APL (RR-APL)	32°49' S - 53°42' O	Planosol Subéutrico	5,5	0,2	0,91	0,11	37	22
India Muerta APN (IM2-APN)	33°39' S - 53°53' O	Gleysol Háplico	5,9	0,46	1,79	0,19	20	30
India Muerta APL (IM2-APL)	33°40' S - 53°55' O	Gleysol Háplico	5,5	0,71	3,95	0,5	20	43

K (int)= potasio interambiable, CO= carbono orgánico, NT= nitrógeno total, ARE. = arena, ARC. = arcilla

En cada sitio se instaló un ensayo que evaluó 3 tratamientos de N que combinaron dosis y momento de aplicación: a) 0 kg ha<sup>-1</sup> = T0, b) 22 kg ha<sup>-1</sup> aplicado a la siembra = T22 y c) 68 kg ha<sup>-1</sup> (22 + 23 +23, aplicado a la siembra, macollaje y primordio floral respectivamente = T68) siendo la variedad utilizada fue EP 144.

### **3.4.2. Manejo de los experimentos, diseño experimental y determinaciones realizadas**

En cada sitio, previo a la aplicación de los tratamientos se fertilizó a la base con 55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y el manejo general de los experimentos fue realizado según las prácticas habituales del productor. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones y 3 tratamientos. El tamaño de cada bloque (cuadro de riego) fue de 13 x 50 m el que contenía 3 unidades experimentales de 6,2 m de ancho por 10 m de largo. Cada unidad experimental estuvo posicionada en zonas del cuadro de riego con una óptima población. El arroz se sembró

en suelo seco en hileras de 17 cm y previo a la instalación de los tratamientos fueron tomadas muestras de suelo para análisis químicos y físicos (cuadro1).

A madurez fisiológica fueron tomadas 4 muestras por parcela de 0,5 m de largo de planta entera cortada a ras del suelo, las que se secaron a 60°C durante 48 h. Posteriormente al secado, las muestras fueron separadas en grano y paja y molidas hasta pasar por tamiz de 1 mm. Se analizó la concentración de N en grano y paja según la metodología de Kjeldahl (Bremner, 1960) y se estimó la acumulación de biomasa en grano, paja y total. El rendimiento se terminó colectando 10,5 m<sup>2</sup> de la parte central de cada unidad experimental.

### **3.4.3. Cálculos realizados**

A partir de las ecuaciones 1, 3, 4 y 6 se calcularon los índices de eficiencia FPP, ERA, EFIS y EUI. El cálculo de la EA fue basado en el segundo término de la ecuación 2. La respuesta a la fertilización N ( $RF_N$ ), relativa al testigo sin agregado de N se calculó como:

$$RF_N(\%) = \left( \frac{R_N}{R_{0N}} - 1 \right) * 100 \quad [7]$$

donde  $R_N$  es el rendimiento en grano alcanzado con agregado de N y  $R_{0N}$  sin agregado.

### **3.4.4. Análisis estadístico**

Las respuestas agronómicas fueron evaluadas utilizando modelos mixtos (PROC MIXED) del paquete estadístico SAS (Littell, Stroup y Freund, 2002). En este modelo, los sitios, los tratamientos de N y sus interacciones fueron considerados como efectos fijos, mientras que los bloques anidados en sitios fueron considerados como efectos aleatorios. Para determinar la significancia estadística de los efectos fijos en todos los análisis se utilizó un test F con un  $P \leq 0.05$ .

### 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.5.1. Análisis de las respuestas agronómicas de los 12 experimentos

Existieron diferencias en la radiación solar entre años de experimentación (información no presentada). En el segundo, para un período de 40 días entorno a la floración del cultivo, se constató una disminución en la radiación solar del orden de 15% con respecto al primero, diferencia que aumentó a 34% cuando se analiza lo ocurrido entre el inicio de floración 20 días después (INIA, 2016; NASA-POWER, 2016). Esta disminución en la radiación significó, en el segundo año, una reducción de 18% en la biomasa total acumulada a fin de ciclo, afectando de igual forma al grano como a la paja (cuadro 2). En arroz, la radiación y las horas de sol existentes  $\pm$  20 días de la floración son factores clave para la obtención de altos rendimientos (Stansel, 1975), y además permiten lograr acumulaciones de biomasa óptimas (Williams, Lewin y Reinke, 1994) y una adecuada absorción de N. Recientemente Macedo (2014), identificó que la radiación solar existente 20 días post floración es la variable más asociada con la obtención de altos rendimientos. Según Steinmetz, Nunes Deibler y Baptista da Silva (2013), en variedades de ciclo medio, se han constatado incrementos de 6 kg de grano  $\text{ha}^{-1}$  por cada  $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$  adicional, lo que está alineado con la diferencia en rendimiento obtenida ( $1900 \text{ kg ha}^{-1}$ ), considerando una diferencia de radiación de  $190 \text{ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$  entre zafras.

También se encontraron diferencias significativas en la absorción total de N a fin de ciclo entre años (cuadro 3). En el primero, el cultivo absorbió  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  más que el segundo año, explicado por la cantidad de N absorbida en grano. Esto se explicó no solo por un mayor rendimiento sino también por una mayor concentración de N ( $P < 0,0001$ ) siendo estos valores de 1,30% y 1,06% (primer y segundo año respectivamente). Esto no sucedió a nivel de paja, donde la mayor acumulación de N estuvo explicada por una mayor cantidad de biomasa, sin variaciones en la concentración de N (0,68% vs. 0,67%). En términos generales, las cantidades de N que absorbieron estos cultivos ( $190$  y  $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  primer y segundo año respectivamente), concuerdan con los valores estimados a partir de la relación entre rendimiento y absorción de N para este cultivo reportada por IPNI (2013).

Existió un efecto del antecesor inmediato sobre la respuesta agronómica observada. Se encontró un incremento del 13, 20 y 15% para la MS en grano, paja y total respectivamente

cuando el arroz fue sembrado sobre APL respecto a APN (cuadro 2). Solo la absorción de N en grano presentó diferencias significativas a favor del APL mientras que las absorciones de N en paja y total mostraron una tendencia ( $P=0,084$  y  $0,072$  respectivamente). El efecto del antecesor sobre el rendimiento pudo haberse debido tanto a un mayor aporte de N producto de la FBN en la etapa de pastura, a un efecto físico de mejor estructura del suelo luego de la pastura o a ambos. Si este efecto se hubiera debido a una mayor disponibilidad de N, es posible que la misma hubiera provocado solo un aumento del rendimiento y no de la concentración de N en planta, debido a la dilución del nutriente en la MS. No obstante, estos resultados son también compatibles con la hipótesis de que el aumento de rendimiento fuese provocado por mejoras en la condición física del suelo, las que en forma indirecta permitan alcanzar una mayor productividad como lo infieren en su trabajo Mahapatra y Sharma (1989). Sin embargo, es variada la literatura que sostiene que el efecto de los antecesores o rotaciones que incluyen leguminosas contribuye al aumento de los rendimientos de arroz en parte por un aumento del N disponible del suelo, luego de que los restos de estos antecesores son incorporados (Buresh y De Datta, 1991; Schulz, Keatinge y Wells, 1999).

No se detectaron diferencias entre los tratamientos T0 y T22, ni en el rendimiento alcanzado, ni en la acumulación total de N a fin de ciclo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Esto pudo estar causado por un aporte de N nativo del suelo alto que permitió concretar una alta productividad del tratamiento ON, por que haya existido una desincronización entre la oferta de N basal del T22 y la demanda del cultivo, o porque la dosis de N agregada con el T22 no haya sido suficiente para cambiar este resultado. Si bien es difícil discernir entre cual efecto predominó, es claro que en todos los sitios experimentales la productividad alcanzada por el T0 fue elevada lo que demuestra el alto aporte de N del suelo. Cuando la contribución del N nativo del suelo es baja, difícilmente se superen los  $5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Fitts et al., 2014). Solo el T68 que combinó dosis y momentos de agregado de N fue diferente estadísticamente de los demás tratamientos, alcanzando los mayores registros para los parámetros evaluados. Según Ladha et al. (2005), cultivos de altos rendimientos requieren de grandes cantidades de N, las que pueden provenir tanto de fuentes orgánicas como inorgánicas. En términos generales, es la mineralización de la MO la principal fuente de N para el cultivo, siendo el N inorgánico agregado como fertilizante una fuente de disponibilidad rápida y complementaria (Dourado-Neto et al., 2010).

Cuadro 2.- Efecto del año, antecesor y tratamiento de N sobre la biomasa acumulada (MS), y la concentración y absorción de N de todos los experimentos.

	MS grano	MS paja	M.S total	N grano	N paja	N total
Año evaluación	----- kg ha <sup>-1</sup> -----					
1	8555	12315	21016	110	81	190
2	6954	10321	17256	74	66	140
<i>P-valor</i>	0,0002	0,0385	0,001	<0,0001	0,0341	<0,0001
<i>DMS (5%)</i>	609	1869	1885	9,5	14,0	17,8
<b>Antecesor</b>						
Pasturas con leguminosas (APL)	8210	12358	20493	96	79	172
Pasturas naturales (APN)	7298	10278	17780	87	68	158
<i>P-valor</i>	0,0036	0,0113	0,0012	0,037	<i>ns</i>	<i>ns</i>
<i>DMS (5%)</i>	609	1599	1617	8,5	---	---
<b>Tratamiento N</b>						
T0	7701	10879	18281	91	72	160
T22	7141	10400	18113	83	63	147
T68	8422	12676	21015	103	85	188
<i>P-valor</i>	0,0009	0,0001	<0,0001	0,0006	<0,0001	<0,0001
<i>DMS (5%)</i>	665	1064	1100	10	9,1	16,6

### **3.5.2. Efecto de la fertilización N en el rendimiento, absorción de N y en la respuesta en rendimiento de los diferentes sitios y años**

En el primer año, el análisis dentro de sitios mostró diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) en el rendimiento alcanzado frente al agregado de N en las localidades de IM1-APN e IM1-APL. A su vez, a nivel de tendencia ( $P < 0,1$ ), se observaron diferencias en la absorción de N entre tratamientos (T0 vs. T68) en 4 de las 6 localidades (cuadro 3). Por otro lado, en el segundo año, la respuesta en rendimiento frente al agregado de N en cada sitio presentó diferencias significativas en 5 de los 6 casos mientras que en 3 de estos 5 también se observaron diferencias ( $P < 0,05$ ) en la absorción de N (cuadro 3).

Para el promedio de los sitios del año 1, la  $RF_N$  fue de 991 kg ha<sup>-1</sup> detectándose para este parámetro diferencias entre sitios ( $P < 0,05$ ). Estas se debieron a la baja  $RF_N$  del sitio RT-

APN frente a las demás. Éste sitio presentó en términos absolutos las menores variaciones en rendimiento y absorción de N entre tratamientos de fertilización en comparación a los demás sitios, explicado por la finalización anticipada del riego. En etapas finales del cultivo, la ausencia de riego puede significar un menor rendimiento asociado a esterilidad de panículas y disminución del peso de los granos (Botwright et al., 2008) y, por lo tanto, disminuir la  $RF_N$  por disminución de diferencias entre T0 y T68. En el segundo año la  $RF_N$  promedio de todos los sitios presentó valores superiores en términos absolutos frente al primero (1182 kg ha<sup>-1</sup>), sin ser estadísticamente diferentes. Tanto la  $RF_N$  en valores absolutos, así como la frecuencia de casos con respuesta significativa al agregado de fertilizante, fueron mayores en el año de menores rendimientos medios (cuadro 3). Según Peng et al. (2010),  $RF_N$  menores a 1500 kg ha<sup>-1</sup> sobre situaciones sin agregado de N podrían considerarse bajas. No obstante, las menores respuestas en rendimiento encontradas en este trabajo respecto a lo señalado por estos autores podrían explicarse debido a la alta productividad alcanzada por el tratamiento sin agregado de N.

Cuadro 3.- Respuesta en rendimiento y absorción total de N a fin de ciclo en cada sitio y año de evaluación.

AÑO	Tratamiento N	Rendimiento ----- kg ha <sup>-1</sup> -----	Absorción N	RF <sub>N</sub> %	
2008-09	RB1-APN	T0	7350	143	--
	RB1-APL	T68	8185	165 *	14,10
		T0	10286	217	--
	RT-APN	T68	11172	257 *	8,83
		T0	9549	161	--
	RT-APL	T68	9800	168	2,90
		T0	10751	202	--
	IM1-APN	T68	12196	218	18,37
		T0	11393	191	--
	IM1-APL	T68	12554 **	216 *	10,98
		T0	9539	153	--
		T68	10909 **	174 *	14,65
	P-valor ( $\bar{X}$ sitios)		<0,0001	<0,0001	0,0001
	D.M.S (5%)		1001	21	14,29
2009-10	RB2-APN	T0	8859	127	--
	RB2-APL	T68	9734 **	153	9,93
		T0	8200	136	--
	RR-APN	T68	8944 **	132	9,08
		T0	7044	90	--
	RR-APL	T68	8549 **	124**	21,40
		T0	8681	133	--
	IM2-APN	T68	9363	159 *	8,13
		T0	5456	149	--
	IM2-APL	T68	7597 **	198 **	39,85
		T0	8939	152	--
		T68	10086 **	204 *	13,08
	P-valor ( $\bar{X}$ sitios)		<0,0001	<0,0001	<0,0001
	D.M.S (5%)		519	24	6,86

\*; \*\* diferencias significativas dentro de sitio para la comparación de tratamientos de N con  $\alpha$  0,1 y 0,05 respectivamente

### **3.5.3. Índices de eficiencia de uso del N calculados**

#### **3.5.3.1. Eficiencia interna de uso del N (EUI)**

La relación entre la absorción de N y el rendimiento alcanzado en cada sitio y año es la EUI. Esta presentó diferencias ( $P=0,05$ ) entre años, siendo 55 y 64  $\text{kg kg}^{-1}$  en el primer y segundo año respectivamente siendo considerados valores altos (Dobermann y Fairhurst, 2000). En el segundo año no se incluyó en el cálculo el sitio IM2-APN, donde una inundación total del cultivo a fin de ciclo afectó el potencial de rendimiento. El menor valor de EUI del primer año se debió a la respuesta tipo cuadrática encontrada entre el rendimiento y la absorción de N. El modelo ajustado mostró un máximo físico en el rendimiento con 190 y 221  $\text{kg N ha}^{-1}$  absorbidos para T0 y T68 respectivamente, valor por encima del cual el incremento en rendimiento fue negativo (figura 1a). Igual comportamiento experimentó la EUI, la que aumentó hasta los 61 y 62  $\text{kg kg}^{-1}$  (T68 y T0 respectivamente), alcanzadas con absorciones de 171 y 194  $\text{kg ha}^{-1}$  de N para los mismos tratamientos, decreciendo por encima de esta absorción. El comportamiento cuadrático en este año se debió a un alto aporte de N, llegando el cultivo a experimentar situaciones de consumo de lujo, disminuyendo los rendimientos y la EUI a la vez que la absorción de N continuaba aumentando. A pesar de la tendencia cuadrática en la relación, de todas maneras, existió un claro aumento tanto de la absorción de N como del rendimiento en grano entre tratamientos de N (figura 1a). Cuando a los T0 se le agregó la diferencia promedio de absorción de N y rendimiento entre tratamientos de fertilización N (promedio tratamientos T68- promedio tratamientos T0), se tendió a reconstruir la curva del T68 (figura 1a). Esto significó a nivel de rendimiento y absorción de N, que el efecto de la fertilización N fue igual en todas las localidades del año 1, manteniéndose los valores de EUI entre tratamientos ( $55 \text{ kg ka}^{-1}$ ).

El segundo año se observó un comportamiento diferente entre estas variables. Los incrementos de rendimiento y los de absorción de N fueron constantes e iguales en todo el rango de absorción de N, presentando un ajuste lineal (figura 1b). A diferencia del año 1, el agregado de la diferencia promedio de absorción de N y rendimiento entre tratamientos de N (promedio tratamientos T68 -promedio tratamientos T0) a los T0, no reprodujo los mismos

resultados en el segundo año, tendiendo los valores calculados a sobrestimar el rendimiento y absorción de N alcanzada debido a la fertilización N (figura 1b).

La EUI fue mayor en situaciones limitantes de disponibilidad de N. Esto se pudo apreciar en la comparación entre tratamientos de N del año 2 (61 y 67 kg kg<sup>-1</sup> para T68 y T0 respectivamente, P=0,09), y entre la comparación del año 2 con los sitios del año 1 que experimentaron una absorción de N excesiva (figura 1a).

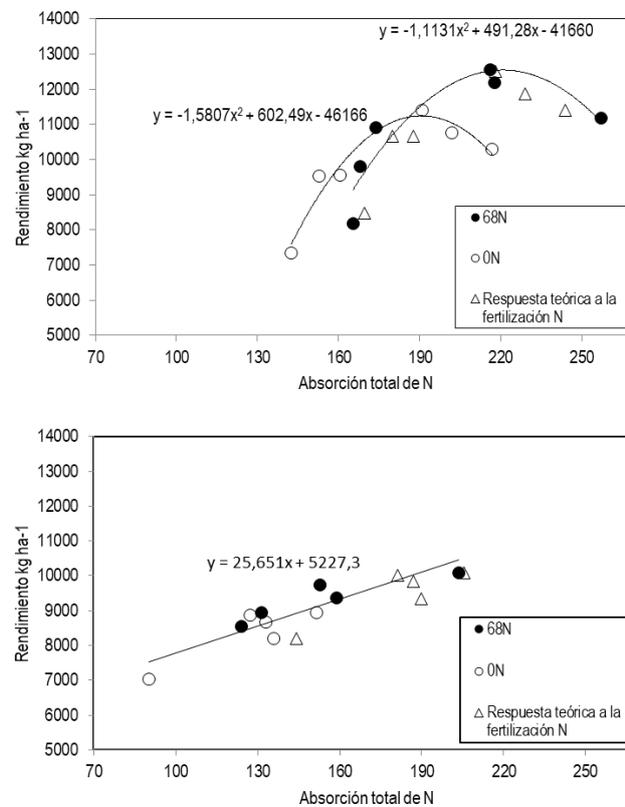


Figura 1. Relación entre la absorción total de N y el rendimiento en grano (EUI) alcanzada por los tratamientos T0 y T68 en el primer (a) y segundo año (b) respectivamente.

También se encontró un ajuste lineal de EUI entre años respecto a mejoras en el manejo (antecesor o fertilización). Esta fue mayor en el año climáticamente desfavorable y sin manejo mejorado que en el año climáticamente bueno, con fertilización o antecesor de leguminosas (figura 2). En términos agronómicos la interpretación es diferente, la mayor productividad y absorción de N se logró en el año climáticamente mejor y con mejor condición de oferta de N tanto del fertilizante como por medio del antecesor.

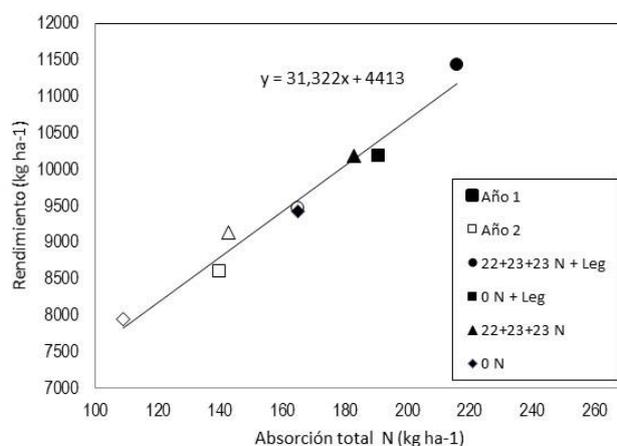


Figura 2. Relación entre la absorción total de N y el rendimiento alcanzado (EUI) en los diferentes sitios según tratamientos de N y antecesores, para los 2 años de evaluación.

### 3.5.3.2. Eficiencia fisiológica de uso del N (EFIS)

Para un mismo sitio, la diferencia entre valores de EUI de las diferentes dosis (T0 y T68) representa la EFIS (figuras 1a y 1b). No se encontraron diferencias en la EFIS ni entre años, localidades, ni antecesor, si bien existieron diferencias en valores absolutos. Mientras que el primer año, climáticamente mejor al segundo, la EFIS fue de 50 kg kg<sup>-1</sup>, en el segundo fue de 32 kg kg<sup>-1</sup> (cuadro 5). El valor negativo de EFIS de RB2-APL se debió a una menor absorción de N del T68 frente al T0 por la finalización anticipada el riego que alteró su desarrollo en etapas tardías. Debido a que este es un índice que cuantifica la habilidad del cultivo en transformar en grano el N adicional absorbido, es esperable entonces que el año de mejor condición climática, por lo tanto, mejores condiciones para el desarrollo vegetal, permita alcanzar una EFIS mayor. No obstante, estos valores fueron menores a los reportados por Spiertz (2009), entre 50 y 80 kg kg<sup>-1</sup>. Seguramente esto se deba a la alta EUI del T0, no lográndose incrementos importantes de grano por la fertilización, generando una baja EFIS.

### 3.5.3.3. Eficiencia de recuperación aparente (ERA)

La ERA no presentó diferencias estadísticas entre años ni localidades, si bien varió asociada al manejo. Los sitios con finalización anticipada del riego RT-APN (año 1) y RB2-APL (año 2), fueron los de menor ERA, mientras que los mayores valores para este índice se encontraron en IM2-APN e IM2-APL. Estos sitios correspondieron a las localidades de mayor CO del suelo (cuadro 1,) por lo que es probable que el tratamiento fertilizado haya absorbido más N nativo del suelo que la situación control, cuantificándose como N proveniente del fertilizante, tendiendo a sobreestimar la ERA en función de lo reportado por Jenkinson, Fox y Rayner (1985).

Para las restantes localidades, este índice fue similar entre años (37 y 42% año 1 y 2 respectivamente) lo que está alineado con la bibliografía. Según Ladha et al. (2005), es esperable encontrar valores de ERA del orden de 31 % en ensayos conducidos en cultivos comerciales, con manejo general de los productores los que ascienden hasta 46% en estaciones experimentales cuando todos los factores son controlados.

Debido a que la EA depende de la EFIS y la ERA, las 2 localidades con finalización anticipada del riego (RT-APN y RB2-APL, cuadro 5), no fueron consideradas para el análisis de este índice. Considerando a los restantes sitios, la EA alcanzada fue de 17 y 18 kg ka<sup>-1</sup> (primer y segundo año respectivamente). Si bien se obtuvo un valor similar entre años, en el primero, la EA se relacionó con la EFIS (R=0,73) mientras que en el segundo lo estuvo con la ERA (R=0,75). Por lo tanto, en el año climáticamente bueno (año 1), la EA se asoció a la capacidad de la planta de convertir en grano el N proveniente del fertilizante, y en el segundo dependió de la eficiencia con que se recuperó el N del fertilizante agregado, posiblemente por existir más pérdidas de N. No se encontraron diferencias para este índice entre antecesores. Para una gran diversidad de ambientes y situaciones, son reportados valores promedios de EA en torno a 22 kg kg<sup>-1</sup> (Ladha et al., 2005) con rangos entre 6 kg kg<sup>-1</sup> (Buresh et al., 2004; Peng et al., 2010) y 35 kg kg<sup>-1</sup> (Singh et al., 2012; Zhao et al., 2013), por lo que los valores encontrados en este trabajo fueron de medios a bajos.

#### 3.5.3.4. Factor de productividad parcial del N agregado (FPP)

Se detectaron diferencias en el FPP entre años ( $P=0,05$ ), no detectándose diferencias entre antecesores. Para el promedio de los sitios, el FPP del año 1 fue superior al del segundo ( $159$  vs.  $133 \text{ kg kg}^{-1}$ ), presentando estas últimas diferencias ( $P=0,0001$ ) según la localidad evaluada (cuadro 5). Independientemente de las diferencias entre años y/o sitios encontrados, en todos los casos los valores alcanzados fueron considerados altos frente a los reportes de la bibliografía proveniente de sistemas intensivos y similares a aquellos de menor intensidad de uso. Dentro del primer tipo de sistema, los trabajos de Buresh et al. (2004); Giller et al. (2004), conducidos en Asia en situaciones muy intensivas, reportan valores para el FPP entre  $30$  y  $50 \text{ kg kg}^{-1}$ , los que fueron obtenidos a nivel comercial con agregados de N de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ . Por otro lado, para sistemas productivos menos intensivos donde el arroz rota con pasturas u otros cultivos, Quinteros et al. (2011), Zhao et al. (2013), mencionan valores de este indicador entorno a los  $90$ - $140 \text{ kg kg}^{-1}$ . Los resultados de este trabajo fueron similares a los reportados por estos últimos autores y están explicados en parte por el aporte relativamente alto del N nativo del suelo, el que permitió alcanzar una alta productividad aún sin agregado de N (cuadro 4). Debido a que un componente del FPP es la productividad alcanzada en el tratamiento 0N (ecuación 2), aquellas situaciones donde la contribución del N nativo del suelo permita alcanzar altas productividades y no se agreguen cantidades excesivas de N como fertilizante, se asociarán directamente con valores altos del FPP. Esto pudo apreciarse en los sitios de RT-APN y RB2-APL, donde, un problema de manejo como la finalización anticipada del riego alteró las respuestas en el cultivo, lo que se reflejó tanto en la  $RF_N$  como en la absorción incremental de N (cuadro 4 y 5). En ambos sitios, el FPP alcanzado fue alto ( $138 \text{ kg kg}^{-1}$  promedio), lo que se explicó principalmente por la productividad del tratamiento sin agregado de N, más que por los efectos de la fertilización.

Por lo tanto, si bien este índice puede ser calculado en forma sencilla a partir de datos productivos y de agregado de N, su utilización para comparar sistemas puede no estar considerando aspectos como la sustentabilidad o la real eficiencia de uso del N en el largo plazo.

Esto es, puede haber situaciones donde un alto valor del FPP no refleje el empobrecimiento que puede estar experimentando un sistema debido al agregado de

cantidades menores de N que las que salen del sistema. Según el EU Nitrogen Expert Panel (2015), estos casos de una aparente muy alta eficiencia de uso de N, cuantificada por ejemplo a través del FPP, podría estar indicando un empobrecimiento de N, comprometiendo la productividad futura. El caso de Uruguay podría estar transitando este camino a juzgar por la productividad alcanzada y la cantidad de N agregado (Pittelkow et al., 2016), para aquellas situaciones que no incluyan leguminosas. Incluso en este trabajo, el balance aparente promedio de todas las situaciones (salidas de N en grano – entrada de N como fertilizante) fue negativo ( $-24 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Posiblemente, que se continúen alcanzando altos valores de FPP y al mismo tiempo, generándose balances de N negativos, sea la baja intensidad del cultivo en la rotación ya que, la inclusión de leguminosas en las pasturas de la rotación que podrían mejorar los balances de N, son realizadas en el 25% del área únicamente.

Cuadro 4. Índices de la eficiencia de uso del nitrógeno según localidad y año de evaluación. Salvo para EUI T0, los demás índices son para la dosis de N del T68.

AÑO	Sitio	EUI T0	EUI T68	EFIS	ERA	EA <sub>N</sub>	FPP
		kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>	%	kg kg <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>
2008-09	RB1-APN	51,6	49,4	36,4	33,6	12,3	120,4
	RB1-APL	47,4	43,4	22,0	59,2	13,0	164,3
	RT-APN	59,4	58,3	34,6	10,5	3,7	144,1
	RT-APL	53,3	56,0	91,1	22,3	21,5	177,4
	IM1-APN	59,7	58,0	45,9	37,1	17,1	184,6
	IM1-APL	62,3	62,8	66,1	30,4	20,2	160,4
	P-valor	ns	ns	ns	ns	ns	0,0004
	D.M.S (5%)	---	---	---	---	---	23,2
2009-10	RB2-APN	69,7	63,7	34	37,8	12,8	143,1
	RB2-APL	60,4	68,0	-170	-6,4	10,9	131,5
	RR-APN	78,2	68,9	44	50,2	22,1	125,7
	RR-APL	65,2	58,9	26	37,9	10,0	137,7
	IM2-APN		37,1	36	88,2	31,5	111,7
	IM2-APL	59	49,5	22	76,6	16,8	148,3
	P-valor	ns	ns	ns	ns	0,0051	0,0001
	D.M.S (5%)	---	---	---	---	10,72	11,8

### 3.6. CONCLUSIONES

El efecto año, definido como la oferta de radiación solar en etapas avanzadas del cultivo tuvo una relación positiva y directa con el potencial de rendimiento alcanzado, siendo superior en el primero respecto al segundo. La fertilización N completa (T68), la siembra sobre APL y su combinación, permitieron aumentar la productividad en ambos años. Contrariamente al mayor potencial alcanzado en el primer año, la frecuencia de situaciones con respuesta en rendimiento frente al agregado de N fue mayor en el segundo, climáticamente peor. No obstante, la  $RF_N$  promedio fue de 14%, pudiéndose considerar baja, estando explicada por la alta productividad y absorción de N alcanzada en todos los T0 (alto EUI).

Por su parte, la alta EUI del T0 (61 kg kg<sup>-1</sup>), contribuyó en gran medida para alcanzar un FPP ampliamente superior (146 kg kg<sup>-1</sup>) a lo reportado internacionalmente ya que, salvo la ERA (43%), la que presento valores similares y levemente superiores a los registros internacionales, los parámetros EA (17 kg kg<sup>-1</sup>) y EFIS (46 kg kg<sup>-1</sup>) fueron algo menores a la información internacional. En parte, los valores de estos dos últimos parámetros se debieron a que se estuvo en la porción de la curva de respuesta entre rendimiento y absorción de N con incrementos decrecientes.

Si bien la EA fue similar entre años, las condiciones climáticas alteraron los componentes de esta eficiencia. Mientras que en el año climáticamente favorable la EA se correlacionó a la EFIS, en el año desfavorable climáticamente lo hizo con la ERA. Esto dió pistas para futuros trabajos de cómo aumentar la EA por medio del uso de genotipos más eficientes (EFIS) y/o de prácticas de manejos tendientes a maximizar la ERA.

### 3.7. BIBLIOGRAFÍA

- Botwright, A., Latte, T.L., Latte, H.R., Wade, L.J.** (2008). Genotype and environment interactions for grain yield of upland rice backcross lines in diverse hydrological environments. *Field Crops Research*, 108(2): 117-125.
- Bremner, J.M.** (1960). Determination of nitrogen in soil by Kjeldhal method. *The Journal of Agricultural Science*, 55(1):11-33.

- Buresh, R., Peng, S., Huang, J., Yang, J., Wang, G., Zhong, X., Zou, Y.** (2004). Rice Systems in China with high nitrogen inputs. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.143-153). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Buresh, R.J., De Datta, S.K.** (1991). Nitrogen dynamics and management in rice-legume cropping systems. *Advances in Agronomy*, 45:1-59.
- Cassman, K.G., Peng, S., Olk, D.C., Ladha, J.K., Reichardt, W., Dobermann, A., Singh, U.** (1998). Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crop Research*, 56:7-39.
- Dobermann, A., Cassman, K.G.** (2002). Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 247:153-175.
- Dobermann, A., Fairhurst, T.** (2000). *Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management*. Handbook Series. (191 p.) Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute. Philippine.
- Dourado-Neto, D., Powlson, D., Bacchi, O.O.S., Basanta, M.V., thi Cong, P., Keerthisinghe, G., Ismaili, M., Rahman, S.M., Reichardt, K., Safwat, M.S.A, Sngakkara, R., Timm, L.C., Wang, J.Y., Zagal, E., van Kessel, C.** (2010). Multiseason Recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. *Soil Science Society of American Journal*, 74: 139-152.
- EU Nitrogen Expert Panel.** (2015). *Nitrogen use efficiency (NUE)-an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems*. Wageningen University, Alterra, PO Box 47, NL-6700 Wageningen, Netherlands.
- Fitts, P.W., Walker, T.W., Krutz, L.J., Golden, B.R., Varco, J.J., Gore, J., Corbin, J.L., Slaton, N.A.** (2014). Nitrification and yield delayed-flood rice as affected by a nitrification inhibitor and coated urea. *Agronomy Journal*, 106 (5):1541-1548.
- Giller, K.E., Chalk, P., Dobermann, A., Hammond, L., Heffer, P., Ladha, J.K., Nyamudeza, P., Maene, L., Ssali, H., Freney, J.** (2004). Emerging Technologies to Increase the Efficiency of Use of Fertilizer Nitrogen. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.).

- Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.35-55). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Harrell, D., Saichuk, J.** (2009). Soil, plant nutrition and fertilization. En: J. Saichuk (ed.). Louisiana production handbook. Louisiana, LSU Ag Center, (3): 24-34.
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria).** (2016). *Banco datos agroclimáticos*. [En línea]. 28 agosto 2016. <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>.
- IPNI (International Plant Nutrition Institute).** (2013). *Calculador de remoción de nutrientes*. [En línea]: 30 agosto 2013. <https://www.ipni.net/app/calculator/home> .
- Jenkinson, D.S., Fox, R.H., Rayner, J.H.** (1985). Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen-the so-called “priming” effect. *Journal of Soil Science*, 36(3):319-486.
- Ji-Yun, J., Ronggui, W., Rongle, L.** (2002). Rice production and fertilization in China. *Rice production*, 16: 26-29.
- Ju, X.T., Xing, G.X., Chen, X.P., Zhang, S.L., Zhang, L.J., Liu, X.J., Cui, Z.L., Yin, B., Christie, P., Zhu, Z.L., Zhang, F.S.** (2009). *Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. [En línea]. 06 octubre 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902655106>.
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., van Kessel, C.** (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87:85-156.
- Littell, R., Stroup, W., Freund, R.** (2002). *SAS for Linear Models, Fourth Edition*. (470 p.). Cary: SAS Institute.
- Liu, J., Diamond, J.** (2005). China’s environment in a globalizing world. *Nature*, 435:1179-1186.
- Macedo, I.** (2014). *Incidencia de factores climáticos en el rendimiento de cultivares elite de arroz*. (tesis Ing. Agr.) Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 75 p.
- Mahapatra, B.S., Sharma, G.L.**(1989). Integrated management of Sesbania, Azolla and urea nitrogen in lowland rice under a rice–wheat cropping system. *The Journal of Agricultural Science* 113(2): 203 – 206.

- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias).** (2017). *Encuesta de arroz zafra 2016/17*. Montevideo, Uruguay. DIEA. 25 p. (Serie Encuestas, 346).
- NASA-POWER (National Aeronautics and Space Administration-Prediction of Worldwide Energy Resources).** (2016). *Climatology Resource for Agroclimatology*. [En línea]. 02 julio 2016. <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa> .
- Olesen, J.E., Sorensen, P., Thomsen, I.K., Eriksen, J., Thomsen, A.G., Bernsten, J.** (2004). Integrated Nitrogen Input Systems in Denmark. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.129-140). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Zhong, X., Zou, Y., Yang, J., Wang, G., Liu, Y., Hu, R., Tang, Q., Cui, K., Zhang, F., Dobermann, A.** (2010). Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. *Agronomy Sustainable Development*, 30: 649-656.
- Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., Wang, G., Zhang, F.** (2006). Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice system in China. *Field Crops Research*, 96: 37-47.
- Pittelkow, C.M., Zorrilla, G., Terra, J.A., Ricetto, S., Macedo, I., Bonilla, C., Roel, A.** (2016). Sustainability of rice intensification in Uruguay from 1993 to 2013. *Global Food Security*, 9: 10-18.
- Quinteros, C.E., Prats, F., Zamero, M.D.L., Arévalo, E.S., Spinelli, N.B., Boschetti, G.N.** (2011). Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego. *Ciencia del suelo*, 29(2), 233-239.
- Schulz, S., Keatinge, J.D.H., Wells, G.J.** (1999). Productivity and residual effects of legumes in rice-based cropping systems in a warm-temperate environment: II. Residual effects on rice. *Field Crops Research*, 61(1):37-49.
- Singh, B., Shing, V., Singh, Y., Thind, H.S., Kumar, A., Gupta, R.K., Kaul, A., Vashistha, M.** (2012). Fixed time adjustable dose site specific fertilizer nitrogen management in transplanted irrigated rice (*Oryza sativa* L.) in south Asia. *Field Crop Research*, 126:63-69.

- Snyder, C.S., Slaton, N.A.** (2002). Rice production in the United States; an overview. *Rice Production*, 16:30-35.
- Spiertz, J.H.J.** (2009). Nitrogen sustainable agriculture and food security: A review. En: E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, C. Alberola (eds.). *Sustainable agriculture*. (pp. 635-651). Dordrecht. Springer.
- Stansel, J.** (1975). *Effective utilization of sunlight. Six Decades of Rice Research in Texas*. College Station, Texas A&M University. (pp.43-50). Press. (Research Monograph nº 4).
- Steinmetz, S., Nunes Deibler, A., Baptista da Silva, J.** (2013). Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. *Ciência Rural*, 43 (2):206-211.
- Williams, R., Lewin, L., Reinke, R.** (1994). Increasing yield potential of rice cultivars in NSW: A whole crop physiological approach. (pp. 651-655). Yanco Agricultural Institute.
- Zhao, G., Miao, Y., Wang, H., Su, M., Fan, M., Zhang, F., Jiang, R., Zhang, Z., Liu, C., Liu, P., Ma, D.** (2013). A preliminary precision rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. *Field Crop Research*, 154:23-30.
- Zorrilla, G.** (2015). Uruguayan Rice: the secrets of a success story. *Rice Today*, 14: 18-19.

## **4. EFICIENCIA DE USO DEL N EN EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY II: ESTUDIO ISOTÓPICO**

**Castillo Jesús, Terra José A., Perdomo Carlos H.**

### **4.1. RESUMEN**

Con el objetivo de conocer la eficiencia del fertilizante agregado del arroz en Uruguay, se condujeron cuatro experimentos microparcenarios, en dos localidades que combinaron tipo de suelo y antecesor de pasturas nativas o mezcla con leguminosas. Se agregaron 75 kg N ha<sup>-1</sup> marcados con <sup>15</sup>N, fraccionados en partes iguales en uno de los siguientes momentos: siembra, macollaje o primordio floral, utilizándose N convencional en los restantes momentos. Se determinó la eficiencia de recuperación isotópica (ERI), total y parcial (según momento de fertilización) por parte del cultivo, el reciclaje de N (REC<sub>N</sub>) a fin de ciclo y el movimiento en profundidad del <sup>15</sup>N remanente en suelo. El N marcado no contabilizado en el sistema suelo planta a fin de ciclo se definió como N perdido. La ERI promedio fue de 45%, mientras que el REC<sub>N</sub> a cosecha (N derivado del fertilizante remanente en suelo + paja) fue un 49% respecto al N agregado. La ERI parcial fue mayor con las fertilizaciones de macollaje (52%) y primordio floral (58%) y la menor con la de siembra (25%). A pesar de la alta ERI con la fertilización a primordio floral, se observó que las pérdidas estuvieron asociadas a este estadio, posiblemente por la aplicación de N directamente sobre el agua de riego, que en ese momento cubre parte del cultivo, disminuyendo la cantidad de N reciclado al suelo. En promedio las pérdidas fueron de 24%. En ningún experimento se encontró fertilizante marcado con <sup>15</sup>N por debajo de 20 cm del suelo.

**Palabras clave:** <sup>15</sup>N, recuperación N, reciclaje N, pérdidas N, movimiento N en profundidad

## 4.2. SUMMARY

To know the added fertilizer efficiency to rice in Uruguay, four microplots experiments were conducted, in two locations that combined soil type and antecessor of native pasture or mixed with legumes. A total of 75 kg N ha<sup>-1</sup> labeled with <sup>15</sup>N was added, divided equally in one of these stages: sowing, tillering or panicle initiation, while conventional N was used on the other moments. Total or partial (according to the fertilization stage) isotopically recovery efficiency (IRE) by the crop, N recycling (REC<sub>N</sub>) at the end of the crop and remaining soil <sup>15</sup>N depth movement were determined. Labeled N not accounted for was defined as N lost. Average IRE was 45%, while REC<sub>N</sub> at harvest (soil remaining and stubble N derived from fertilizer) was 49% respect to added N. Partial IRE was greater with tillering (52%) and panicle initiation (58%) fertilizations and the lowest with the sowing (25%). Despite the high IRE with panicle initiation fertilization stage, it was observed that loses were associated to this stage, possibly for the N application over the irrigation water, which partially cover the crop at this stage, reducing the N amount recycled to the soil. On average, loses were 24%. No labeled <sup>15</sup>N fertilizer was detected in the soil bellow 20 cm in none of the experiments

**Keywords:** <sup>15</sup>N, N recovery, N recycling, N loses, depth N movement

### 4.3. INTRODUCCIÓN

El desarrollo agrícola contemporáneo está vinculado fuertemente al agregado de N inorgánico, siendo identificado como el insumo que ha permitido aumentar la productividad de los cereales en general (Ladha et al., 2016). En muchos casos, el agregado de cantidades elevadas de este nutriente ha generado problemas en el ambiente, asociados a una baja eficiencia de uso del N en la producción (Peng et al., 2006; Ju et al., 2009), por lo que, entender los procesos y factores que determinan la eficiencia de recuperación del N por el cultivo y/o sistema son clave para mejorar la eficiencia de uso. En este tipo de estudios, la utilización como trazador de fertilizante enriquecido artificialmente con  $^{15}\text{N}$  ha resultado ser una herramienta de gran utilidad permitiendo detectar y cuantificar la fracción del N derivado del fertilizante (Nddf) agregado que se encuentra tanto en las diferentes estructuras del cultivo como en el suelo (Powlson y Barraclough, 1993).

Utilizando este tipo de técnicas, se ha cuantificado para una gran diversidad de ambientes productores de arroz, eficiencias de recuperaciones isotópicas (ERI) por parte del cultivo entre 32% (Krupnik et al., 2004) y 44% (Ladha et al., 2005), las que están inversamente relacionadas con los niveles de pérdidas existentes. En arroz irrigado, las pérdidas por volatilización son reconocidas como las de mayor importancia (Mikkelsen, De Datta y Obcemaie, 1978), siendo reportados para el primer año valores de 33% del  $^{15}\text{N}$  agregado (Bronson et al., 2000). El porcentaje de  $^{15}\text{N}$  restante suele quedar en el suelo existiendo reportes que señalan que luego de la cosecha del primer año, es esperable encontrar entre un 22 y 56% (Cao, De Datta y Fillery, 1984). Tanto el Nddf remanente en suelo como el que se reincorpora de la paja del cultivo son utilizados en un porcentaje bajo en subsiguientes cultivos (Dourado-Neto et al., 2010), por lo que este reciclaje actúa directamente sobre la reposición de N del sistema.

Los sistemas agrícolas de alto rendimiento se asocian generalmente con un alto agregado de insumos, N entre ellos, un uso ineficiente de recursos y un alto costo ambiental (Foley et al., 2011). Por el contrario, la producción arrocería uruguaya alcanzó en términos promedio en la última década, una alta productividad ( $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), sorteando aparentemente los aspectos negativos mencionados. Dos premisas sustentan este enfoque. La primera se asocia

a la rotación del arroz con pasturas, sugiriendo que esto ha permitido aumentar los rendimientos a la vez que se mantiene la calidad del suelo minimizando la dependencia del N agregado (Deambrosi, 2003) y la segunda sostiene que los altos rendimientos alcanzados se debieron a ajustes en las prácticas de manejo que contribuyeron a aumentar la eficiencia de uso del N al igual que la de otros insumos (Zorrilla et al., 2010). Si bien esto no está documentado, se cree que aspectos como la realización de la primera cobertura de N en suelo seco con posterior inundación del cultivo como se ha comenzado a realizar en la última década, ha mejorado la eficiencia de recuperación del N como lo reporta por Norman et al. (2009).

Para el sistema arrocero uruguayo, poco se conoce respecto a la eficiencia de uso del N, no existiendo información de la dinámica de este nutriente en el sistema suelo, planta atmosfera que permita identificar los puntos altos o de mejora en este sistema productivo a través de la readecuación de las prácticas de manejo.

En tal sentido, en el segundo artículo de esta serie (Castillo, Terra y Perdomo, 2018), se cuantificaron en forma indirecta, a través del método de la diferencia (Novoa y Loomis, 1981), una serie de índices de eficiencia de uso del N que permitieron tener un entendimiento general de la eficiencia de los sistemas arroceros uruguayos, así como realizar una primera aproximación al entendimiento de las causas que posibilitan hasta el momento alcanzar altas productividades con bajo agregado de N. El objetivo de este tercer artículo es cuantificar en forma directa por medio de la técnica de enriquecimiento artificial  $^{15}\text{N}$ , la eficiencia de recuperación isotópica (ERI) total y parcial (en función del momento de fertilización) del fertilizante marcado agregado, tanto desde el punto de vista del cultivo, como del reciclaje de N ( $\text{REC}_\text{N}$ ) del sistema (suelo + planta). Además, el  $^{15}\text{N}$  no encontrado permitirá conocer las pérdidas de este nutriente fuera del sistema. La hipótesis de trabajo fue que la ERI y el  $\text{REC}_\text{N}$  son altos y que las pérdidas de N no son importantes.

#### **4.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

##### **4.4.1. Diseño experimental, manejo general y tratamientos $^{15}\text{N}$ evaluados**

En la zafra 2009-2010, se seleccionaron dos localidades, contrastantes en términos edáficos, cada una de ellas con un sitio con antecesor de pasturas mezcla de gramíneas con

leguminosas (APL) y otro solo con pasturas gramíneas nativas (APN) (cuadro 1). Previo a la instalación de los experimentos micro parcelarios y el agregado de los tratamientos isotópicos, se fertilizó en la línea del cultivo con 55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. En estos sitios fueron instalados 4 ensayos micro parcelarios (imagen 1) donde se aplicó fertilizante nitrogenado en forma de urea, enriquecida con 10 at. %<sup>15</sup>N. La urea marcada fue disuelta en agua destilada hasta lograr un volumen de 300 mL para favorecer una distribución homogénea.

Cuadro 1.- Análisis físico químico del suelo (0 – 0.15 m) de los 4 sitios experimentales seleccionados para experimentos micro parcelarios isotópicos.

Año 2009-2010	Localización	Clasificación suelos	pH	K cmol kg <sup>-1</sup>	C O	NT ----- % -----	ARE	ARC
Río Branco APN (RB2-APN)	32°38'S - 53°21'O	Planosol Subéutrico	5,5	0,15	0,71	0,06	47	15
Río Branco APL (RB2-APL)	32°42'S - 53°19'O	Planosol Subéutrico	5,4	0,13	0,78	0,08	47	16
India Muerta APN (IM2-APN)	33°39'S - 53°53'O	Gleysol Háplico	5,9	0,46	1,79	0,19	20	30
India Muerta APL (IM2-APL)	33°40'S - 53°55'O	Gleysol Háplico	5,5	0,71	3,95	0,51	20	43

K (int)= potasio interambiable, CO= carbono orgánico, NT= nitrógeno total, ARE. = arena, ARC. = arcilla

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 4 repeticiones y 3 tratamientos. En cada ensayo, 3 microparcels isotópicas por bloque fueron instaladas dentro de un área sin agregado de N. Debido a que se utilizó un diseño sin interacción (Zapata, 1990), cada una de estas microparcels recibió el agregado de 25 kg N ha<sup>-1</sup> marcados con <sup>15</sup>N en solo uno de los tres momentos definidos: siembra o macollaje o primordio floral, utilizándose una solución de urea no enriquecida con <sup>15</sup>N a la misma dosis en los 2 momentos restantes (cuadro 2). Este diseño generó tratamientos con igual dosis total de N (en este caso 75 kg ha<sup>-1</sup>) donde solo varía el momento de agregado del fertilizante enriquecido en <sup>15</sup>N, lo que permite estudiar la eficiencia parcial de uso de los 25 kg N marcado y la eficiencia total de los 75 kg ha<sup>-1</sup> fraccionados en 3 momentos, sin la interacción del fertilizante agregado con las plantas.

Cuadro 2. Diseño de tratamientos de N marcados con  $^{15}\text{N}$  sin interacción planta-fertilizante.

Tratamiento	Momento de marcación con $^{15}\text{N}$		
	Siembra	Macollaje	Primordio Floral
	----- kg N ha <sup>-1</sup> -----		
i	25*	25	25
ii	25	25*	25
iii	25	25	25*
<i>N total</i>	75	75	75

\*fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$

La microparcela consistió en una doble estructura de chapa galvanizada siendo la dimensión del área exterior de 40000 cm<sup>2</sup> y la interior de 10000 cm<sup>2</sup>. Estas dos estructuras tuvieron una altura total de 35 cm de los cuales 15 cm estuvieron enterrados en el suelo (imagen 1).

Imagen 1. Doble estructura de metal utilizadas en los ensayos de enriquecimiento  $^{15}\text{N}$



#### **4.4.2. Determinaciones realizadas**

En los estadios de macollaje, diferenciación panicular y 50% de floración, fueron extraídas plantas de arroz para cuantificar la absorción de  $^{15}\text{N}$  de las fertilizaciones con urea enriquecida a siembra, macollaje y diferenciación panicular respectivamente. Éstas muestras fueron tomadas de la microparcela interior ( $10000\text{ cm}^2$ ) del espacio comprendido entre el centro de la micro parcela interior ( $3400\text{ cm}^2$ ) y los bordes de ésta. Se estimó rendimiento en grano por medio de corte total de las plantas contenidas en el cuadrado central de la micro parcela comprendido por 4 líneas de cultivo ( $17\text{ cm}$  entrelínea) por  $50\text{ cm}$  de largo, separándose en grano y paja. Para evitar contaminación cruzada, las plantas provenientes de tratamientos marcados con  $^{15}\text{N}$  fueron procesadas en forma separada de las provenientes de parcelas no isotópicas, procesando siempre en primer lugar a las muestras no isotópicas.

Posterior a la cosecha, se tomaron con un calador de  $40\text{ mm}$  de diámetro, muestras de los intervalos de 0-5, 5-10, 10-20 y 20-40  $\text{cm}$  de profundidad del suelo para cuantificar el N remanente en cada momento de fertilización con  $^{15}\text{N}$ . Se utilizó agua destilada para lavar el muestreador entre tomas de suelo de cada profundidad.

La molienda de plantas se realizó, primero con un molino de cuchillas fijas y móviles (Marca Thomas, Modelo ED-5) hasta pasar malla de  $1\text{ mm}$  y luego con en un molino rotatorio (Marca SampleTek, Modelo 200 vial Rotator), hasta alcanzar el tamaño granulométrico necesario para análisis de  $^{15}\text{N}$  por espectrometría de masa (consistencia talco). Las muestras de suelo fueron secadas a  $40\text{ }^\circ\text{C}$  y molidas en dos etapas, la primera con un molino rotatorio de cuchillas fijas marca Thompson modelo SR-1 y la segunda utilizando el mismo instrumental que en las muestras vegetales, previo a la realización de los análisis químicos e isotópicos. Cada muestra fue pesada dentro de cápsulas de estaño, y éstas fueron dispuestas en un analizador elemental Flash EA 112 acoplado a un espectrómetro de masa Finnigan MAT DELTA<sup>plus</sup> XL (Bremen, Alemania), donde se determinó la composición isotópica del material analizado y la concentración de N.

### **4.2.3. Cálculos realizados**

Se determinó la cantidad total de N absorbido ( $N_{ABS}$ ) como el producto entre la materia seca acumulada (MS) expresada en  $kg\ ha^{-1}$  y la concentración de N de la MS expresada en porcentaje (%N) como se muestra en la ecuación 1.

$$N_{ABS} = \frac{MS * \%N}{100} \quad [1]$$

A partir de los  $kg\ MS\ ha^{-1}$ , la concentración de N de la muestra, así como con el enriquecimiento  $^{15}N$  (% At. Exceso  $^{15}N$  por encima de su abundancia natural 0,3667), fue posible calcular el  $N_{ABS}$  en grano o paja de arroz ( $kg\ ha^{-1}$ ) y la fracción del N derivado del fertilizante (Nddf) (Hardarson y Danso, 1990).

$$Nddf (\%) = \frac{\%At.exceso^{15}N\ muestra}{\%At.exceso^{15}N\ fertilizante} * 100 \quad [2]$$

mientras que la cantidad total de N marcado en planta a partir del fertilizante marcado agregado se calculó a partir de la combinación de las ecuaciones 1 y 2.

$$Nddf (kg\ ha^{-1}) = N_{ABS} * Nddf (\%) \quad [3]$$

Finalmente, a partir de los  $kg\ ha^{-1}$  de Nddf en el grano y la paja, se calculó la eficiencia de recuperación isotópica (ERI) por parte del cultivo, expresada como porcentaje del fertilizante  $^{15}N$  agregado. Del mismo modo, el reciclaje de N ( $REC_N$ ) se calculó como la suma del Nddf remanente en la paja del cultivo y el suelo a cosecha.

### **4.2.4 Análisis estadístico**

Las diferencias entre medias de los tratamientos fueron analizadas utilizándose modelos generales lineales del paquete estadístico SAS (Littell, Stroup y Freund, 2002) con un nivel de significancia de 5%. Cuando el análisis fue realizado dentro de sitio se utilizó un modelo de

bloques completos al azar mientras que cuando se integraron los sitios se utilizaron modelos mixtos (PROC MIXED).

### **4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.3.1. Eficiencia de recuperación isotópica (ERI)**

El análisis de las variables detectó diferencias significativas en la cantidad de N derivado del fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$  (Nddf) encontrado en grano, así como en la ERI entre sitios. Las diferencias encontradas en el Nddf en grano estuvieron explicadas por el sitio IM2-APN (cuadro 6), el que tuvo una inundación total del cultivo posterior al agregado del fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$  a primordio floral, lo que pudo haber disminuido la cantidad encontrada. Comparada a las demás localidades, la ERI del sitio IM2-APN fue un 41% inferior, similar a lo reportado por Mubarak et al. (2003), luego de ocurrida una fuerte lluvia posterior a la aplicación de  $^{15}\text{N}$ . Sin considerar al sitio de IM2-APN, la ERI promedio de las restantes localidades fue de 44,8 % (cuadro 6).

La ERI fue similar a la ERA promedio del año 2 (41,9%) (ver artículo 2 de esta serie), en aquellos sitios con manejos comparables. Esto significa que no fueron considerados en el cálculo, la localidad con finalización anticipada del riego (RB2-APL) ni los sitios con suelos muy orgánicos (IM2-APN e IM2-APL), donde posiblemente existió una interacción positiva con el N agregado (Jenkinson, Fox y Rayner, 1985) que alteraron los valores de ERA. Una extensa síntesis sobre la ERI y la ERA de arroz de varias partes del mundo fue realizada por Krupnik et al. (2004), los que reportaron valores de eficiencias de 32 y 36% respectivamente, valores inferiores a los encontrados en este trabajo y en el segundo artículo (Castillo, Terra y Perdomo, 2018).

Para el promedio de los sitios experimentales, la cantidad de fertilizante enriquecido con  $^{15}\text{N}$  encontrada en suelo posterior a la cosecha fue de  $26,7 \text{ kg ha}^{-1}$ , correspondiendo a un 36% del N total agregado. Del total del Nddf recuperado en el suelo, se encontró que el mayor porcentaje estuvo en los primeros 5 cm de profundidad. Estos valores fueron de 94, 82, 66 y 69% para los sitios de IM2-APL, IM2-APL, RB2-APN y RB2-APL respectivamente. Estos

porcentajes ascendieron a 100, 100, 96 y 97% cuando se analizaron los primeros 10 cm (figura 1).

En 2 sitios se encontró fertilizante enriquecido con  $^{15}\text{N}$  en el intervalo 10-20 cm. Estos fueron RB2-APN y RB2-APL, sitios de textura más liviana en el horizonte A (47% arena y 15 % arcilla vs. 20 % arena y 37% arcilla, RB e IM respectivamente). No obstante, las cantidades encontradas fueron de escasa magnitud (figura 1). En ninguna de las localidades estudiadas fue encontrado fertilizante marcado por debajo de los 20 cm, lo que indicó un bajo movimiento en profundidad, aún con la presencia de la lámina de agua de riego durante varios meses. El horizonte B textural de este tipo de suelos es sin dudas una condición de gran ayuda para impedir o entretener el movimiento en profundidad, ya que en experimentos similares se encontró  $^{15}\text{N}$  por debajo de 90 cm. Si bien los suelos de ese estudio tenían una textura similar en el horizonte superficial (30 cm), no contaban con un horizonte rico en arcilla que impida el flujo de agua y nutrientes en profundidad (Zhang et al., 2012; Rose et al., 2016). Estos autores han cuantificado un porcentaje de N en suelo a fin de ciclo respecto al N agregado de entre 17 y 20% lo que es levemente inferior al encontrado en el presente trabajo. En la estación de crecimiento lluviosa, De Datta et al. (1987), en suelos livianos y moderadamente profundos, reportaron porcentajes de N remanente en suelo respecto al agregado de 30%. El Nddf remanente en suelo a fin de ciclo, luego de su aplicación, pasa a integrar formas orgánicas que tienen una alta vida media (Jensen, 1997), similar a la del humus del suelo.

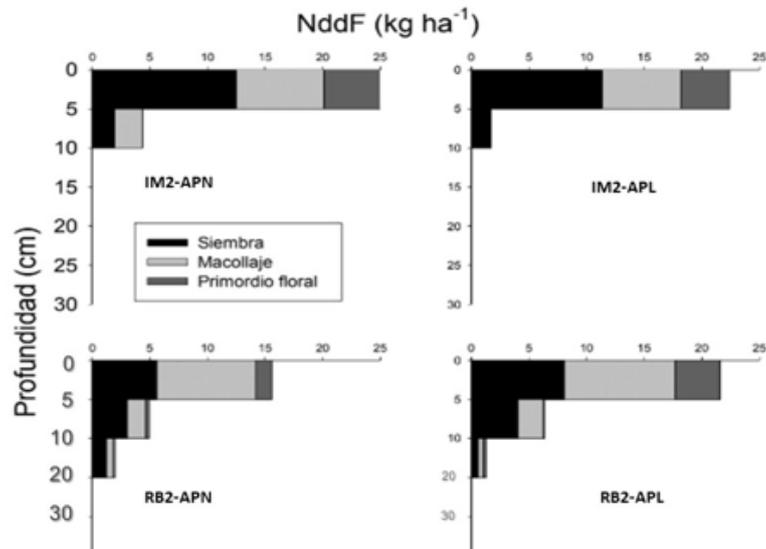


Figura 1. Nitrógeno derivado del  $^{15}\text{N}$  y estratificación en suelo a cosecha según momento de agregado de fertilizante marcado. IM=India Muerta, IML= India Muerta antecesor leguminosas, RB Río Branco, RBL= Río Branco antecesor leguminosas.

A pesar de los problemas de manejo del sitio IM2-APN, se encontró una clara tendencia a que el porcentaje de Nddf en suelo disminuyó cuando más tarde se realizó la fertilización. Los valores fueron de 49, 37 y 17% del para la fertilización de siembra, macollaje y primordio floral respectivamente. La mayor pérdida de N asociado a la fertilización de primordio floral (en agua), que generó una menor cantidad de N encontrada en suelo a fin de ciclo podría disminuirse en parte. El uso de fuentes de N con inhibidor de la ureasa NBTP [N-(*n*-butyl) thiophosphorictriamide], ha sido propuesto para disminuir las pérdidas en este tipo de situaciones (Buresh et al., 1988; Norman et al., 2009).

El Nddf contenido en la paja del cultivo y el suelo a fin de ciclo se definió como N de reciclaje ( $\text{REC}_\text{N}$ ), ya que pasar a integrar el pool de N del sistema. Al igual que el del suelo, el Nddf en paja luego de su incorporación será inmovilizado rápidamente pasando a formar estructuras de alta estabilidad y baja mineralización. No se encontraron diferencias en los kg de Nddf contenidos en la paja del cultivo y suelo a cosecha en las diferentes localidades, siendo estas en promedio de 49%. Si bien el  $\text{REC}_\text{N}$  significó en este estudio la mitad del N agregado, Dourado-Neto et al. (2010), en una serie de experimentos con  $^{15}\text{N}$  encontraron que no es

esperable recuperar por la planta más de un 5-6% transcurridos 6 cultivos. Esto muestra la estabilidad del N reciclado en el mediano plazo y su rol como reponedor de los pools de N del suelo (Jenkinson et al., 2004). Otro punto de vista es propuesto por Ladha et al. (2016), quienes basados en un enfoque de balance general de N, sostienen que cada año la fracción de este nutriente que no es tomado por el cultivo en función de lo agregado está sujeta a potenciales pérdidas. Esto se observa en sistemas de cultivos donde la concentración de N en suelo permanece constante en el tiempo, no habiendo ganancias netas de este nutriente. Por lo tanto, lo que reingresa al sistema tiene un rol fundamental en compensar las pérdidas naturales de N del suelo.

Por su parte, el Nddf que no fue encontrado en la planta ni el suelo a fin de ciclo, se lo definió como pérdidas de N del sistema. Para el conjunto de las localidades, no se logró cuantificar un 24,7 % del fertilizante enriquecido en  $^{15}\text{N}$  agregado, valor que desciende a 21% si no se considera a IM2-APN, lugar que experimentó condiciones que favorecieron pérdidas de N asociadas a la última cobertura. El hecho de que en nuestro estudio no se consideró la biomasa de raíces, por lo tanto, el  $^{15}\text{N}$  retenido en estas, hace que estemos frente a una sobrestimación de las pérdidas de N del sistema. Existen reportes que indican que el porcentaje retenido en esta estructura en función del N agregado puede ser de tan solo un 1,4% (De Datta et al., 1987) hasta un 7% (Zhang et al., 2012). Independientemente de esto, las pérdidas observadas en este trabajo fueron inferiores a lo reportado internacionalmente (entre 33 y 43 %). Estas pérdidas están explicadas principalmente por volatilización y desnitrificación (Diekmann, De Datta y Ottow, 1993; Cassman et al., 1998; Kramer et al., 2002). Posiblemente los niveles de pérdidas reportados internacionalmente se deban a que se trata de arroz de transplante, donde las condiciones de manejo hacen que en ciertos momentos haya una baja sincronización entre la demanda y oferta de N al cultivo. En el sistema productivo uruguayo, el hecho de realizar la cobertura N de macollaje en suelo seco con posterior inundación hace que aumente la eficiencia de absorción dejando menos N que potencialmente pueda perderse, como lo reportado en los trabajos de Norman et al. (2009).

Cuadro 6. Rendimiento en grano, absorción total de N, N derivado del fertilizante en planta y suelo, reciclaje, pérdidas de N y EUF<sup>15</sup>N de los diferentes sitios experimentales.

Sitio	Rendimiento	Abs-N	kg ha <sup>-1</sup>					EUF <sup>15</sup> N
			Nddf G	Nddf P	Nddf S	N-R	N-P	
RB2-APN	10973	149,7	20,6	13,0	23,5	36,2	17,9	44,6
RB2-APL	9610	145,9	20,8	10,9	29,6	40,6	13,5	41,9
IM2-APN	9620	159,3	12,2	6,7	29,7	36,6	26,2	25,4
IM2-APL	11523	149,4	26,0	10,1	24,2	34,2	14,7	48,1
(P<F)	0,0045	ns	0,033	ns	ns	ns	ns	0,014
DMS 5%	1232	---	5,8	---	---	---	---	12,5

Abs-N: absorción total de N; Nddf G, P y S: Nitrógeno derivado del fertilizante marcado encontrado en grano, paja y suelo respectivamente; N-R: nitrógeno reciclado; N-P: nitrógeno perdido; EUF<sup>15</sup>N: eficiencia de uso del fertilizante marcado con <sup>15</sup>N

#### **4.3.2. Eficiencias de recuperación isotópica (ERI) parciales**

Se analizó la ERI parcial en función del momento de fertilización. Para esto, se agruparon los sitios con suelos de similares características fisicoquímicas (cuadro 1). En el grupo compuesto por RB2-APN y RB2-APL, no se detectaron interacciones significativas para los parámetros evaluados, entre el momento de marcación y estas localidades. La mayor ERI se obtuvo cuando la marcación se realizó a macollaje y la menor a siembra (cuadro 7). Estas diferencias ( $P < 0,05$ ), se explicaron por una mayor cantidad de Nddf encontrado en la paja, aunque también existió una tendencia ( $P = 0,071$ ) a encontrar mayores cantidades de Nddf en grano. Si bien la comparación de estos momentos no detectó diferencias entre las cantidades de Nddf en suelo, la variación encontrada en paja provocó diferencias significativas en el  $REC_N$  (paja + suelo). Las menores pérdidas de N (0,8%) se observaron cuando la fertilización se realizó a macollaje (cuadro 7). Iguales resultados son reportados por Norman et al. (2009) quienes indican que la fertilización N a macollaje en suelo seco con inundación permanente inmediata, tiene una mayor eficiencia de uso y menores pérdidas de N. No existieron diferencias en la ERI entre la marcación a primordio floral y macollaje, pero sí en la cantidad de Nddf en el suelo y en el  $REC_N$  (cuadro 7) a favor de este último momento. Las mayores pérdidas

de N observadas con la marcación a primordio floral se debieron posiblemente a volatilización de amoníaco, ya que las cantidades encontradas en planta fueron iguales que con la fertilización a macollaje. Según Jayaweera y Mikkelsen (1991), esta pérdida se asocia a la lámina de riego, las que generalmente tienen valores de pH y temperatura del medio que la predisponen.

Posiblemente entonces, el hecho de haber alcanzado una ERI similar entre momentos (macollaje y primordio floral), aún con un factor predisponente de pérdidas por volatilización como lo es el agua de riego, esté explicada por una alta sincronización entre la demanda de N por parte del cultivo y la oferta de N producto de la fertilización, según lo mencionado por Dourado-Neto et al. (2010).

Cuadro 7. Componentes de la eficiencia de uso parcial del fertilizante en los sitios de Rio Branco (RB2-APN y RB2-APL), según momento de fertilización con fertilizante marcado <sup>15</sup>N.

Momento fertilización <sup>15</sup> N (25 kg N ha <sup>-1</sup> )	Nddf G	Nddf P	Nddf S	N-R	N-P	ERI
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----					%
Siembra	5,3	2,2	11,3	13,6	6,2	29,9
Macollaje	8,4	4,9	11,5	17,5	0,2	53,6
Primordio Floral	6,8	4,8	2,9	7,7	10,5	46,4
ANAVA						
Momento	(0,071)	0,022	<0,0001	0,0001	0,0017	0,035
Sitio	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Momento x Sitio	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DMS Momento (5%)	---	2,1	5,9	3,5	5,4	18,5

Nddf G, P y S: Nitrógeno derivado del fertilizante marcado encontrado en grano, paja y suelo respectivamente; N-R: nitrógeno reciclado; N-P: nitrógeno perdido; EUF<sup>15</sup>N: eficiencia de uso del fertilizante marcado con <sup>15</sup>N

Por otra parte, el grupo conformado por los sitios de IM e IML, presentó el mismo comportamiento respecto al Nddf en suelo a cosecha y en el REC<sub>N</sub> en función del momento de agregado del fertilizante marcado. El Nddf encontrado en el suelo a fin de ciclo según la fertilización de siembra, macollaje y primordio floral fue de 56, 32 y 20% respectivamente, siendo el primer momento de fertilización diferente estadísticamente a los otros dos. Para estos mismos momentos de fertilización, el REC<sub>N</sub> a fin de ciclo fue de 64, 48 y 32% (siembra,

macollaje y primordio floral respectivamente). Los valores de  $REC_N$  con la fertilización a siembra fueron diferentes a la de primordio floral, mientras que la fertilización a macollaje presentó valores de  $REC_N$  intermedios.

Los valores del Nddf encontrado en el grano y paja, así como las pérdidas de N y la ERI, fueron significativos para la interacción entre el momento de fertilización con N marcado y el sitio (cuadro 8). El evento de inundación total del sitio IM2-APN provocó alteraciones en el normal desarrollo de la planta generando la interacción. Esta estuvo dada por menores valores del Nddf en paja, así como mayores pérdidas de N de este sitio respecto IM2-APL, cuando se agregó el N marcado a primordio floral (cuadro 8). Este momento, fue el más cercano a la inundación total, alterando los valores mencionados. Esto significó también que la ERI decayese en forma importante en comparación a IM2-APL. Analizando el sitio sin inundación, la tendencia general para la ERI fue similar a los sitios de RB2-APN y RB2-APL con las fertilizaciones de siembra y macollaje. Diferió la eficiencia en primordio floral la que fue 65% superior a los sitios de RB2-APN y RB2-APL. Posiblemente la presencia de una cantidad importante de Nddf en este sitio se debió a que el cultivo continuó absorbiendo N durante más tiempo, llegando hasta las etapas finales del ciclo.

Cuadro 8. Componentes de la eficiencia de recuperación parcial del fertilizante en la localidad de India Muerta en ambos antecesores (APN y APL) según momento de fertilización<sup>15</sup>N.

Momento fertilización <sup>15</sup> N (25 kg N ha <sup>-1</sup> )	Nddf G		Nddf P		N-P		ERI	
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----						%	
	IM2 APN	IM2 APL	IM2 APN	IM2 APL	IM2 APN	IM2 APL	IM2 APN	IM2 APL
Siembra	3,9	13,8	2,9	1,1	3,6	7,6	27,8	17,5
Macollaje	4,7	8,9	2,8	3,7	7,6	5,5	29,8	50,6
Primordio Floral	3,6	3,3	1,0	5,3	15,1	1,6	18,6	76,4
	ANAVA							
Momento	<0,0001		ns		ns		0,0001	
Sitio	<0,0001		0,023		ns		<0,0001	
Momento x Sitio	<0,0001		0,0002		0,017		<0,0001	
DMS Momento x Sitio (5%)	2,1		1,6		7,8		12,3	

#### 4.4. CONCLUSIONES

Los estudios isotópicos mostraron una ERI de 45%, similar a la ERA reportada en el artículo 2, calculada de forma no isotópica y que no incluyeron los sitios con alteraciones en el manejo. Del total del fertilizante  $^{15}\text{N}$  agregado, se encontró un 35% en el suelo posterior a la cosecha el que sumado al  $^{15}\text{N}$  que se retuvo por la paja del cultivo permitió un  $\text{REC}_\text{N}$  de 49%.

La ERI fue mayor cuando se fertilizó a macollaje o a primordio floral, en comparación a la fertilización  $^{15}\text{N}$  a la siembra. No obstante, cuando la fertilización fue realizada a primordio floral se observó una menor cantidad de N en suelo, lo que disminuyó el  $\text{REC}_\text{N}$ , debido a que en este momento las pérdidas fueron más importantes.

Estos datos brindan información para el ajuste del manejo en pro de aumentar la ERI. En situaciones donde no es esperable que exista inmovilización neta de N, prescindir de la fertilización a siembra podría ser una práctica recomendable, debido a su muy baja ERI. Análisis de carbono orgánico soluble podrían ayudar en esta línea. La segunda es realizar la segunda cobertura de N vía agregado de fuentes de N con inhibidores que minimicen pérdidas de N.

En ninguna de las situaciones se encontró fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$  por debajo de 20 cm de suelo, aspecto de importancia en términos ambientales.

#### 4.5. BIBLIOGRAFÍA

- Bronson, K., Hussain, F., Pasuquin, E., Ladha, J.K.** (2000). Use of N-labeled soil in measuring nitrogen fertilizer recovery efficiency in transplanted rice. *Soil Science Society of America Journal*, 64(1): 235-239.
- Buresh, R.J., De Datta, S.K., Padilla, J.L., Samson, M.I.** (1988). Field evaluation of two urease inhibitors with transplanted low-land rice. *Agronomy Journal*, 80: 763-768.
- Cao, Z.H., De Datta, S.K., Fillery, I.R.P.** (1984). Nitrogen-15 balance and residual effects of urea-N in wetland rice fields as affected by deep placement techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 48(1): 203-208.

- Cassman, K.G., Peng, S., Olk, D.C., Ladha, J.K., Reichardt, W., Dobermann, A., Singh, U.** (1998). Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crop Research*, 56:7-39.
- Castillo, J., Terra, J.A., Perdomo, C.H.** (2018). *Eficiencia de uso del N en el cultivo de arroz en Uruguay I: abordaje no isotópico*. Capítulo 3 de este trabajo. [Datos sin publicar].
- De Datta, S.K., Fillery, I.R.P., Obcema, W.N., Evangelista, R.C.** (1987). Floodwater properties, nitrogen utilization, and nitrogen-15 balance in a calcareous lowland rice soil. *Soil Science Society of America Journal*, 51:1355-1362.
- Deambrosi, E.** (2003). *Rice production system in Uruguay and its sustainability*. En: International conference of temperate rice (3º, 2003, Punta del Este, Uruguay). Proceedings. INIA. 67-70.
- Diekmann, K.H., De Datta, S.K., Ottow, J.C.G.** (1993). Nitrogen uptake and recovery from urea and green manure in lowland rice measured by <sup>15</sup>N and non-isotope techniques. *Plant and Soil*, 148:91-99.
- Dourado-Neto, D., Powlson, D., Bacchi, O.O.S., Basanta, M.V., thi Cong, P., Keerthisinghe, G., Ismaili, M., Rahman, S.M., Reichardt, K., Safwat, M.S.A., Sngakkara, R., Timm, L.C., Wang, J.Y., Zagal, E., van Kessel, C.** (2010). Multiseason Recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. *Soil Science Society of American Journal*, 74: 139-152.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brouman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M.** (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478: 337-342.
- Hardarson, G., Danso, S.K.A.** 1990. Use of <sup>15</sup>N methodology to assess biological nitrogen fixation. En: G. Hardarson (ed.). *Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships*. Training course series N°2. (pp. 129-160). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Jayaweera, G.R., Mikkelsen, D.S.** (1991). Assessment of ammonia volatilization from flooded soil systems. En: N.C. Brady (ed.). *Advances in Agronomy*. (pp. 303-356). San Diego: Academic Press 45.

- Jenkinson, D.S., Poulton, P.R., Johnston, A.E., Powlson, D.S.** (2004). Turnover of nitrogen-15-labeled fertilizer in old grassland. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 865-875.
- Jenkinson, D.S., Fox, R.H., Rayner, J.H.** (1985). Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen-the so-called "priming" effect. *Journal of Soil Science*, 36(3):319-486.
- Jensen, E.S.** (1997). Nitrogen immobilization and mineralization during initial decomposition of 15N-labelled pea and barley residues. *Biology and Fertility of Soils*, 24: 39-44.
- Ju, X.T., Xing, G.X., Chen, X.P., Zhang, S.L., Zhang, L.J., Liu, X.J., Cui, Z.L., Yin, B., Christie, P., Zhu, Z.L., Zhang, F.S.** (2009). *Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. [En línea]. 06 octubre 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902655106>.
- Kramer, A.W., Doane, T.A., Jorwarh, J., van Kessel, C.** (2002). Short-term recovery vs. long-term total soil N gains in conventional and alternative cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 34:43-50.
- Krupnik, T.J., Six, J., Ladha, J.K., Paine, M.J., van Kessel, C.** (2004). An assessment of fertilizer nitrogen recovery efficiency by grain crops. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.193-207). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Ladha, J.K., Tirol-Padre, A., Reddy, C.K., Cassman, K.G., Verma, S., Powlson, D.S., van Kessel, C., Richter, D., Chakraborty, D., Pathak, H.** (2016). Global nitrogen budgets in cereals: a 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. *Scientific reports*, [En línea]. 12 Diciembre 2017. [www.nature.com/scientificreports/](http://www.nature.com/scientificreports/).
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., van Kessel, C.** (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87:85-156.
- Littell, R., Stroup, W., Freund, R.** (2002). *SAS for Linear Models, Fourth Edition*. (470p.) Cary: SAS Institute.
- Mikkelsen, D.S., De Datta, S.K., Obcemaie, W.N.** (1978). Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 725-730.

- Mubarak, A.R., Rosenani, A.B., Anuar, A.R., Siti Zauyah, D.** (2003). Recovery of nitrogen from maize residue and inorganic fertilizer in a maize-groundnut rotation system in humid tropics of malaysia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34 (17-18): 2375-2394.
- Norman, R.J., Wilson Jr., C.E., Slaton, N.A., Griggs, B.R., Bushong, J.T., Gbur, E.E.** (2009). Nitrogen fertilizer sources and timing before flooding dry-seeded, delayed-flood rice. *Soil Science Society of America Journal*, 73 (6): 2184-2190.
- Novoa, R., Loomis, R.S.** (1981). Nitrogen and plant production. *Plant and Soil*, 58: 177-204.
- Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., Wang, G., Zhang, F.** (2006). Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice system in China. *Field Crops Research*, 96: 37-47.
- Powlson, D.S., Barraclough, D.** (1993). Mineralization and assimilation in soil-plant systems. En: Knowles R, Blackburn TH (Eds.). Nitrogen isotope techniques. San Diego. Academic Press. 209-242.
- Rose, T.J., Erler, D.V., Farzana, T., Van Zwieten, L.** (2016). Delayed permanent water rice production systems do not improve the recovery of <sup>15</sup>N-urea compared to continuously flooded systems. *European Journal of Agronomy*, 81:46-51.
- Zapata, F.** (1990). Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. En: Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Hardson G. (Ed.). Training course series N°2. Vienna: International Atomic Energy Agency. 61-127.
- Zhang, Q., Yang, Z., Zhang, H., Yi, J.** (2012). Recovery efficiency and loss of 15N-labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the yellow river basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158:118-126.
- Zorrilla, G., Martínez, C., Berrío, L., Corredor, E., Carmona, L., Pulver, E.** (2010). Improving rice productions systems in Latin America and the Caribbean. En: C.H. Hershey, P. Neate (eds.). *Eco-Efficiency: From vision to reality*. (pp. 162-170). Cali, Colombia. International Center for Tropical Agriculture (CIAT).

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los tres aspectos destacados del sistema arrocero uruguayo son: la alta productividad alcanzada ( $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), el relativo bajo agregado de N ( $70\text{-}80 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y el hecho de rotar con pasturas para pastoreo ganadero, de las cuales, aproximadamente en el 25% de la superficie incluyen leguminosas en su mezcla (MGAP-DIEA, 2017). En base a esa información, el único indicador de eficiencia de uso de N conocido es la productividad alcanzada respecto al N del fertilizante agregado, definido como FPP ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).

En este trabajo, para el promedio de 2 años y 12 localidades este índice alcanzó valores cercanos a los  $150 \text{ kg kg}^{-1}$ , superiores a los  $62 \text{ kg kg}^{-1}$  reportados por Ladha et al. (2005), para el promedio de 176 situaciones e incluso superior a lo reportado como óptimo (mayor a  $80 \text{ kg kg}^{-1}$ ) (Doberman et al., 2007). Tanto en la información reportada para Uruguay (Pittelkow et al., 2016) así como en este trabajo, se apreció que las cantidades de N extraídas en grano superaron al agregado como fertilizante. Este aspecto, llevó a pensar en el pasado, en la existencia de fuentes adicionales de N (fijadores en vida libre) que equilibren las demandas de N del cultivo con el agregado (Deambrosi y Blanco, 2008). En este trabajo, no se encontró evidencia de la contribución de ese tipo de fuentes. La relación encontrada entre los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en la planta de arroz a fin de ciclo y el suelo, indicó que la mayor contribución de N al cultivo la realizó este último. La segunda fuente de importancia para el cultivo fue el N del fertilizante, en función de la disminución de la señal isotópica del arroz, lo que indicó que utilizó una fuente empobrecida en  $^{15}\text{N}$  como lo es el fertilizante.

Por su parte, para el promedio general, la ERA calculada fue de 40%, valor cercano e incluso levemente superior a lo reportado internacionalmente. Posiblemente esto esté explicado por la contribución en la eficiencia de recuperación que hace la fertilización de macollaje, en suelo seco y con posterior inundación (Norman et al., 2009), y por la utilización de dosis de N no tan altas. Por su parte, la EA y los índices de eficiencia relacionados a la transformación en grano del N adquirido (EFIS y EUI), presentaron valores medios a bajos comparados con los reportes internacionales. Estos fueron de 17,5, 41 y  $56 \text{ kg kg}^{-1}$  para la EA, EFIS e EUI respectivamente. Para estos mismos indicadores, Choi (2009), señala rangos de

referencia para la ERA, EA y EFIS de 30-40%, 30-60 kg kg<sup>-1</sup> y 50-80 kg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Debido a la relación entre la EA con la ERA y la EFIS ( $EA=ERA \times EFIS$ ), son esperables bajos valores de EA si alguno de los demás índices es bajo también. Debido a que la EFIS está asociada con la EUI, es probable que los bajos valores constatados se deban una alta EUI de la situación sin agregado de N (T0) que garantice una alta oferta de N sin presentar demasiada respuesta frente al agregado de N, haciendo que la EFIS presente valores bajos. Otro aspecto relacionado a esto es la variedad utilizada en este trabajo, definida como antigua, la que tal vez no haya sido seleccionada persiguiendo estos fines de eficiencia. Este punto puede verse también a través de la  $RF_N$  la que en promedio fue 14%. En la actualidad, existen variedades recientemente liberadas por INIA capaces de alcanzar los rangos reportados, comportándose como más eficientes en términos fisiológicos que la variedad aquí utilizada.

Por su parte, los estudios con fertilizante marcado mostraron una ERI de 46%, y un reciclaje (planta y suelo) del 49%. No se encontró el 24% del fertilizante <sup>15</sup>N agregado, el que se asumió como perdido. Tanto los valores de ERI como de pérdidas presentaron valores más auspiciosos que los reportados internacionales. Estos son de 36% para la ERI (Krupnik et al., 2004) y cercanos a 40% para las pérdidas (Diekmann, De Datta y Ottow, 1993; Kramer et al., 2002). Utilizado como trazador, el <sup>15</sup>N agregado en el fertilizante confirmó un buen valor de utilización del N agregado (similar a la ERA), mostró un porcentaje importante de  $REC_N$  a través de la paja del cultivo y el suelo, así como permitió visualizar su movimiento en profundidad. No se encontró <sup>15</sup>N por debajo de 20 cm del suelo, cuantificándose aproximadamente un 90% en los primeros 5 cm. El análisis de ERI parcial logró identificar los momentos de mayor eficiencia de uso, así como las prácticas de manejo que la disminuyen. Estas se muestran en el diagrama 2.

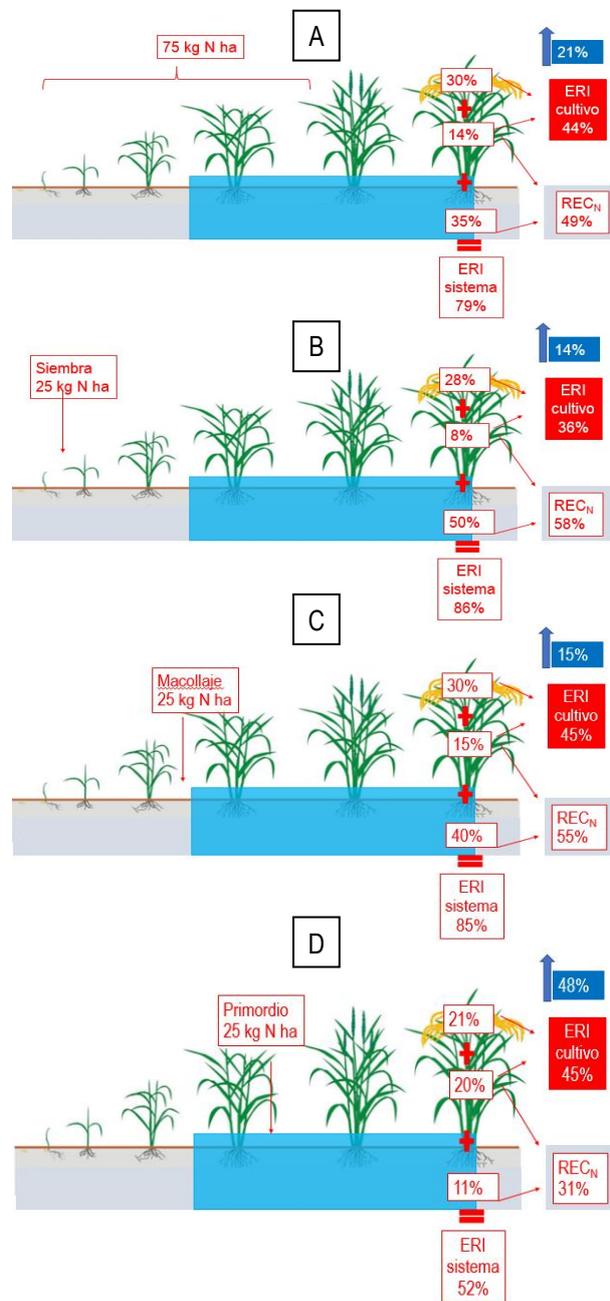


Diagrama 2. Eficiencia de recuperación isotópica (ERI %) del cultivo y sistema, reciclaje de N ( $REC_N$ ) (paja+ suelo) y pérdidas de N, totales (A) y parciales: siembra (B), macollaje (C) y primordio floral (D).

En función de los datos presentados, se podría afirmar que la muy alta eficiencia de uso del N, cuantificado a través del FPP, se explicó principalmente por aspectos propios del sistema de producción (alto aporte de N nativo del suelo), y en segundo lugar por aspectos relacionados al manejo de la fertilización N (2/3 de las coberturas realizadas en suelo seco con posterior inundación). Lo primero quedó demostrado por la asociación entre los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  del cultivo y el suelo y la productividad alcanzada en las parcelas sin agregado de N. El manejo de la fertilización en forma fraccionada y priorizando los momentos de fertilización en suelo seco, permitió alcanzar un buen porcentaje de fertilizante recuperado por el cultivo (ERA y ERI).

Por su parte, la EFIS parecería haber estado afectada por la EUI alcanzada aún por el tratamiento sin N y posiblemente por haber utilizado en este trabajo una variedad antigua.

Si bien se cuantificó una eficiencia de uso del N general alta, la generación de balances negativos de N debido a extracciones de N en grano mayores a las entradas parecería no ser sustentable en el mediano plazo. Para el promedio de las situaciones, el balance aparente de N fue negativo en ( $-24 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), lo que repetido en el tiempo y en un supuesto escenario de intensificación arrocerá, haría perder parte de las ventajas comparativas de este tipo de sistema productivo en comparación a los más intensivos y tradicionales. Visto desde otro punto de vista, existe una oportunidad para, aprovechando la situación actual, realizar ajustes al paquete de manejo como forma de mantener e incluso aumentar los rendimientos de arroz, manteniendo e incluso disminuyendo las entradas de N como fertilizante. En base a la información generada en este trabajo se plantean tres ejemplos ajustados a la forma de producción de estos sistemas y con foco en el cultivo de arroz.

1) Utilización de variedades modernas capaces de convertir más eficientemente en grano el N tomado, tanto del suelo como del fertilizante. En la actualidad este tipo de variedad está disponible y los primeros resultados muestran valores para la EUI, EFIS y  $\text{RF}_\text{N}$  superiores a las obtenidas en este trabajo (Castillo y Marchesi, 2018).

2) Momento de fertilización y fuentes inorgánicas de N. El estudio de eficiencia parcial de uso del fertilizante marcado ( $^{15}\text{N}$ ), identificó que las mayores ERI se alcanzaron con fertilizaciones de macollaje y primordio, si bien esta última presentó las mayores pérdidas. Se propone evitar la fertilización N basal debido a su menor eficiencia (24%) en aquellas situaciones donde no sea esperable la ocurrencia de inmovilización neta de N, mantener la cobertura N con urea a macollaje en suelo seco con posterior inundación del cultivo y en caso

de realizar una cobertura N a primordio floral, realizarla utilizando fuentes de N de lenta liberación como las que incluyen inhibidores de la ureasa, con el fin de retardar la hidrólisis de ésta en el agua del cultivo (Norman et al., 2009)

3) Utilización de especies leguminosas en la rotación como pulso de N al sistema. Esta práctica debe de ser generalizada a toda la superficie en rotación con arroz. Las mismas pueden ser pasturas perennes (similar al sistema actual) o por medio de cultivos anuales de alta FBN. Para esto se requiere la identificación de las especies de mejor adaptabilidad y la cuantificación de la FBN por estas especies realizada. Bajo este esquema, existirán etapas en la rotación donde sean admisibles balances levemente negativos, los que se repondrán en la etapa de pasturas/cultivo fijador neto de N. En función del balance de N general de la rotación se podrá evaluar la disminución de dosis de N agregado como fertilizante.

Respecto al manejo la fertilización N, identificado el suelo como el mayor contribuyente de N al cultivo, identificar algún parámetro que permita cuantificar la potencial oferta de N del suelo para suplementar con N del fertilizante, permitiría realizar las coberturas N más objetivamente que a dosis fija.

## **6. CONCLUSIONES**

La alta eficiencia de uso de N alcanzada en este trabajo, así como la reportada para la producción arrocería uruguaya, cuantificada a través del FPP, se explica por la alta contribución de N del suelo. El hecho de tratarse de un sistema productivo “joven” en relación con los principales del mundo y con una baja intensidad productiva, genera en este tipo de sistemas ventajas comparativas frente a los demás.

En términos de sustentabilidad, el balance de N negativo generado en el cultivo es un aspecto que considerar a mediano plazo como forma de conservar las ventajas de este tipo de sistemas. En función de los datos generados en este trabajo, la buena eficiencia de recuperación del N aplicado, el relativo bajo porcentaje de pérdidas de N, el alto reciclaje a fin de ciclo, asociados a la condición de baja intensidad agrícola, hacen que el balance negativo de N no sea hoy un problema detectable fácilmente. Aquellas situaciones que rotan con

pasturas con leguminosas podrían levantar esta limitante ya que no es esperable la entrada de N vía fijación de otro tipo al menos con los datos relevados en este trabajo.

Con esta información es posible definir un manejo de N para el sistema arrocerero como forma de aumentar el rendimiento y mejorar la eficiencia de uso del N en un marco de sostenibilidad. La misma incluye variedades modernas, manejo de la fertilización N de precisión y utilización de pasturas o cultivos leguminosas que agreguen cantidades importantes de N en algún momento de la rotación.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- Balasubramanian, V., Ladha, J.K., Gupta, R.K., Naresh, R.K., Mehla, R.S., Bijay-Singh.** (2003). Technology options for rice in the rice-wheat system in South Asia. En: J.K. Ladha, J.E. Hill, J.M. Duxbury, R.K. Gupta, R.J. Buresh (eds.). *Improving the productivity and sustainability of rice-wheat systems: issues and impacts*. (pp. 115-147). Madison. ASA special publication 65. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, *Soil Science Society of America*.
- Biggs, I.M., Steward, G.R., Wilson, J.R., Critchley, C.** (2002).  $^{15}\text{N}$  natural abundance studies in Australian commercial sugarcane. *Plant and Soil*, 238: 21-30.
- Blanco, P., Roel, A., Deambrosi, E., Bonilla, C., Cantou, G., Molina, F.** (2010). En: International Rice Congress/28th. International Rice Research Conference *Closing the yield gap in rice production in Uruguay: impacts of technological changes*. (3 $^{\circ}$ /28 $^{\circ}$ , 2010, Hanoi, China). Proceedings. Vietnam, China. International Rice Research Institute (IRRI). 1-4.
- Brentrup, F., Lammell, J.** (2016). *Nitrogen use efficiency, nitrogen balance, and nitrogen productivity – a combined indicator system to evaluate nitrogen use in crop production systems*. En: International Nitrogen Initiative Conference. Solutions to improve nitrogen use efficiency for the world. (7 $^{\circ}$ , 2016, Melbourne, Australia). Proceedings. [En línea]. 4 junio 2018. [www.ini2016.com](http://www.ini2016.com)
- Carranca, C., de Varennes, A., Rolston, D.E.** (1999). Biological nitrogen fixation estimated by  $^{15}\text{N}$  dilution, natural  $^{15}\text{N}$  abundance, and N difference techniques in a subterranean

- clover-grass sward under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 10:81-89.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T.** (2002). Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2):132-140.
- Cassman, K.G., Peng, S., Olk, D.C., Ladha, J.K., Reichardt, W., Dobermann, A., Singh, U.** (1998). Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crop Research*, 56:7-39.
- Castillo, J., Marchesi, C.** (2018). *Optimizando el manejo: INIA Merín*. Datos presentados en jornada anual arroz 2018. INIA Treinta y Tres. [Datos sin publicar].
- Choi, W.J., Ro, H.M., Lee, S.M.** (2003). Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of nitrogen in soil treated with fertilizer and compost under changing soil moisture regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 1289-1298.
- Conant, R.T., Aaron, B.B., Grace, P.R.** (2013). Patterns and trends in nitrogen use and nitrogen recovery efficiency in world agriculture. *Global Biogeochemical Cycles*, 27: 558-566.
- Dawson, T.E., Brooks, P.D.** (2001). Fundamentals of stable isotope chemistry and measurement. En: M. Unkovich, J. Pate, A. McNeill, D.J. Gibbs (eds.). *Stable Isotope Techniques in the Study of Biological Processes and Functioning of Ecosystems*. (pp. 1-18). Dordrecht, Holanda. Kluwer.
- Deambrosi, E., Blanco, P.** (2008). Prólogo, En: *Fijación de nitrógeno por cianobacterias y fertilización en arroz*. Montevideo, Uruguay. INIA (Serie FPTA-INIA, 21).
- Deambrosi, E., Méndez, R.** (2007). *Respuesta de cultivares de arroz tipo Indica a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno en la zona este de Uruguay*. Montevideo, Uruguay. INIA. 36 p. (Serie Técnica, 167)
- Deambrosi, E.** (2003). *Rice production system in Uruguay and its sustainability*. En: *International conference of temperate rice (3º, 2003, Punta del Este, Uruguay)*. Proceedings. INIA. 67-70.
- Diekmann, K.H., De Datta, S.K., Ottow, J.C.G.** (1993). Nitrogen uptake and recovery from urea and green manure in lowland rice measured by  $^{15}\text{N}$  and non-isotope techniques. *Plant and Soil*, 148:91-99.

- Dobermann, A.** (2007). Nutrient use efficiency-measurement and management. En: IFA international workshop on fertilizer best management practices. *General principles, Strategy for their adaptation and voluntary initiatives vs regulations*. (1º,2007, Brussels, Belgium). Proceedings. (pp.1-28). Paris, France. International Fertilizer Industry Association.
- Dobermann, A., Cassman, K.G.** (2005). Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption. *Science in China Series C: Life Sciences*, 48: 745-758.
- Dobermann, A., Fairhurst, T.** (2000). *Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management*. Handbook Series. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute. Philippine. 191.
- Dourado-Neto, D., Powelson, D., Bacchi, O.O.S., Basanta, M.V., thi Cong, P., Keerthisinghe, G., Ismali, M., Rahman, S.M., Reichardt, K., Safwat, M.S.A., Sngakkara, R., Timm, L.C., Wang, J.Y., Zagal, E., van Kessel, C.** (2010). Multiseason Recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. *Soil Science Society of American Journal*, 74: 139-152.
- Espe, M.B., Kirk, E., van Kessel, C., Horwath, W.H., Linnquist, B.A.** (2015). Indigenous nitrogen supply of rice is predicted by soil organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 569-576
- EU Nitrogen Expert Panel.** (2015). *Nitrogen use efficiency (NUE)-an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems*. Wageningen University, Alterra, PO Box 47, NL-6700 Wageningen, Netherlands.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).** (2018). *Food outlook*. Biannual report on global food markets. [En línea]. 25 julio 2018. [www.fao.org/3/CA0239EN/ca0239en](http://www.fao.org/3/CA0239EN/ca0239en)
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations).** (2017). *World fertilizer trends and outlook to 2020*. Summary report. Rome. [En línea]. 25 julio 2018. [www.fao.org/3/a-i6895e](http://www.fao.org/3/a-i6895e)
- FAOSTAT.** (2016). *Statistical database*. [En línea]. 18 febrero 2017. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

- Fixen, P., Brenttrup, F., Bruulsema, T., García, F., Norton, R., Zingore, S.** (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. En: P. Drechsel, P. Heffer, H. Magan, R. Mikkelsen, D. Wichelns (eds.). *Managin water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*. (pp. 1-30). Paris, France. International Fertilizer Industry Association (IFA)/International Water Management Institute (IWMI)/ International Plant Nutrition (IPNI)/International Potash Institute (IPI).
- Harmsen, K.** (2003). *A comparison of the isotope-dilution and the difference method for estimating fertilizer nitrogen recovery fractions in crops. I. Plant uptake and loss of nitrogen*. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 50 (3-4):321-347.
- Hart, P.B., Powlson, D.S., Pulton, P.R., Johnson, A.E., Jenkinson, D.S.** (1993). The availability of the nitrogen in the residues of winter wheat to subsequent crops. *The Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, 121:355-362.
- Heaton, T.H.E.** (1986). Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology*, 5: 87-102.
- Högberg, P.** (1997). Transley Review N°95. <sup>15</sup>N natural abundance in soil-plant systems. *New Phytology Journal*, 137: 179-203.
- IRRI (International Rice Research Institute).** (2013). *Ricepedia. The online authority of rice*. [En línea]. 31 Julio 2018. <http://ricepedia.org/rice-around-the-world>
- IRRI (International Rice Research Institute).** (1993). Rice Almanac. En: Maclean JL, Dawe DC, Hardy B, Hettel GP. (Eds.). Los Baños. International Rice Research Institute. 257.
- Jansson, S.J., Persson, J.** (1982). Mineralization and immobilization of soil Nitrogen. En: F. Stevenson (ed.) *Nitrogen in agricultural soils*. Agronomy Series N° 22. Soil Science Society of America. (pp. 229-251). Madison. Wisconsin. USA Inc. Publisher.
- Jenkinson, D.S., Poulton, P.R., Johnston, A.E., Powlson, D.S.** (2004). Turnover of nitrogen-15-labeled fertilizer in old grassland. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 865-875.
- Jenkinson, D.S., Fox, R.H., Rayner, J.H.** (1985). Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen-the so-called "priming" effect. *Journal of Soil Science*, 36(3):319-486.
- Jin, J.** (2012). Changes in the efficiency of fertilizer use in China. *Journal of Science and Food Agriculture*, 92:1006-1009.

- Keeler, B.L., Gourevitch, J.D., Polasky, S., Isbell, F., Tessum, C.W., Hill, J.D., Marshall, J.D.** (2016). The social cost of nitrogen. *Science Advances*, 2(10): 1-9.
- Kellman, L.M., Hillaire, M.C.** (2003). Evaluation of nitrogen isotopes as indicators of nitrate contamination sources in an agricultural watershed. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95: 87-102.
- Kramer, A.W., Doane, T.A., Jorwarh, J., van Kessel, C.** (2002). Short-term recovery vs. long-term total soil N gains in conventional and alternative cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 34:43-50.
- Krupnik, T.J., Six, J., Ladha, J.K., Paine, M.J., van Kessel, C.** (2004). An assessment of fertilizer nitrogen recovery efficiency by grain crops. En A. Mosier, J.K. Syers y J.R. Freney (eds.). *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (pp.193-207). Washington DC: Island Press. (Scientific Committee on Problems of the Environment, 65).
- Ladha, J.K, Tirol-Padre, A., Reddy, C.K, Cassman, K.G, Verma, S., Powelson, D.S, Van Kessel, C., Richter, D., Chakraborty, D., Pathak, H.** (2016). Global nitrogen budgets in cereals: a 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. *Scientific reports*, 6, 19355.
- Ladha, J.K., Kumar, V., Alam, M.M., Sharma, S., Gathala, M., Chandna, P., Saharawat, Y.S., Balasubramanian, V.** (2009). Integrating crop and resource management technologies for enhanced productivity, profitability, and sustainability of the rice-wheat system in South Asia. En: J.K Ladha, Y. Singh, O. Erenstein, B. Hardy (eds.) *Integrated crop and resource management in the rice-wheat system of South Asia*. (pp. 69-108). Los Baños. International Rice Research Institute.
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., van Kessel, C.** (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87:85-156.
- Mahajan, G., Kumar, V., Chauhan, S.** (2017). Rice production in India. En: B.S. Chauhan, K. Jabran, G. Mahajan (eds.). *Rice production worldwide*. (pp. 53-91). Cham: Springer International Publishing AG.

- Mallarino, A.P., Wedin, W.F., Goyenola, R.S., Perdomo, C.H., West, C.P.** (1990). Legume species and proportion effects on symbiotic dinitrogen fixation in legume-grass mixtures. *Agronomy Journal*, 82: 785-789.
- Mayer, B., Boyer, E.W., Goodale, C., Jaworski, N.A., van Breemen, N., Howarth, R.W., Seitzinger, S., Billen, G., Lajtha, K., Nadelhoffer, K., Van Dam, D., Hetling, L.J., Nosal, M., Paustian, K.** (2002). Sources of nitrate in rivers draining sixteen watersheds in the northeastern U.S.: Isotopic constraints. *Biogeochemistry*, 57/58:171-197.
- Meynard Banayo, N.P., Sta. Cruz, P.C., Aguilar, E.A., Badayos, R.B., Haefele, S.M.** (2012). Evaluation of biofertilizers in irrigated rice: effects on grain. *Agriculture*, 2:73-86.
- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias).** (2017). *Encuesta de arroz zafra 2016/17*. Montevideo, Uruguay. DIEA. 25 p. (Serie Encuestas, 346)
- Mohapatra, T., Nayak, A.K., Raja, R., Shahid, M.** (2013). *Vision 2050*. Central Rice Research Institute. Indian council of agricultural research, Cuttack. [En Línea]. 13 de Julio de 2018. [http://www.crii.nic.in/ebook\\_crrivision2050\\_final\\_16Jan13.pdf](http://www.crii.nic.in/ebook_crrivision2050_final_16Jan13.pdf)
- Norman, R.J., Wilson Jr., C.E., Slaton, N.A., Griggs, B.R., Bushong, J.T., Gbur, E.E.** (2009). Nitrogen fertilizer sources and timing before flooding dry-seeded, delayed-flood rice. *Soil Science Society of America Journal*, 73 (6): 2184-2190.
- Palmer, N.** (2012). Uruguay: a small country, big in rice. *Rice Today*, 11(3), 21-23
- Panda, D., Samantaray, R.N., Misra, A.K., Senapati, H.K.** (2007). Nutrient balance in rice. *Indian Journal of Fertilizers*, 3:33-38
- Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Zhong, X., Zou, Y., Yang, J., Wang, G., Liu, Y., Hu, R., Tang, Q., Cui, K., Zhang, F., Dobermann, A.** (2010). Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. *Agronomy Sustainable Development*, 30: 649-656.
- Peng, S., Buresh, R.J., Huang, J., Yang, J., Zou, Y., Zhong, X., Wang, G., Zhang, F.** (2006). Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice system in China. *Field Crops Research*, 96: 37-47.
- Pittelkow, C.M., Zorrilla, G., Terra, J.A., Ricchetto, S., Macedo, I., Bonilla, C., Roel, A.** (2016). Sustainability of rice intensification in Uruguay from 1993 to 2013. *Global Food Security*, 9: 10-18.

- Prasad, R., Shivay, Y.S., Kumar, D.** (2017). Current status, challenges and opportunities in rice production. En: B.S. Chauhan, K. Jabran, G. Mahajan (eds.). *Rice production worldwide*. (pp. 1-32). Cham: Springer International Publishing AG.
- Ramos, M.G., Villatoro, M.A., Urquiaga, S., Alves, B., Boddey, R.** (2001). Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using  $^{15}\text{N}$ -isotope techniques. *Journal of Biotechnology*, 91: 105-115.
- Recous, S., Machet, J.M., Mary, B.** (1992). The partitioning of fertilizer-N between soil and crop: Comparison of ammonium and nitrate applications. *Plant and Soil*, 144: 101-111.
- Riar, D.S., Norsworthy, J.K., Steckel, L.R., Stephenson, D.O.I.V., Eubank, T.W., Bond, J.** (2013). Adoption of best management practices for herbicide-resistant weeds in midsouthern United States cotton, rice, and soybean. *Weed Technology*, 27:788–797.
- Roberts, T.L., Janzen, H.H.** (1990). Comparison of direct and indirect methods of measuring fertilizer N uptake in winter wheat. *Canadian Journal of Soil Science*, 70(1): 119-124.
- Robinson, D.** (2001).  $\delta^{15}\text{N}$  as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology and Evolution*, 16(3): 153-162.
- Roger, P.A.** (1995). Biological  $\text{N}_2$ -fixation and its management in wetland rice cultivation. *Fertilizer research*, 42(2):261-276
- Roychoudhury, P., Pillai, G.R., Pandey, S.L., Krishna Murti, G.S.R., Venkataraman, G.S.** (1983). Effect of blue-green algae on aggregate stability and rice yield under different irrigation and nitrogen levels. *Soil Tillage Research*, 3: 61-66
- Schulz, S., Keatinge, J.D.H., Wells, G.J.** (1999). Productivity and residual effects of legume in rice-based cropping systems in a warm-temperate environment II. Residual effects on rice. *Field Crop Research*, 61: 37-49.
- Sharma, S.N., Prasad, R.** (1999). Effect of Sesbania green manuring and mungbean residue incorporation in productivity and nitrogen uptake of a rice-wheat cropping systems. *Bioresource Technology*, 67: 171-175.
- Singh, Y., Singh, B., Ladha, J.K., Bains, J.S., Gupta, R.K., Singh, J.** (2007a). On-farm evaluation of leaf color chart for need-based nitrogen management in irrigated transplanted rice in northwestern India. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 78:167–176.

- Singh, V., Singh, Y., Singh, B., Singh, B., Gupta, R.K., Singh, J.** (2007b). Performance of site specific nitrogen management for irrigated transplanted rice in northwestern India. *Archives of Agronomy and Soil Sciences*, 53: 567-579.
- Spiertz, J.H.J.** (2009). Nitrogen sustainable agriculture and food security: A review. En: E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, C. Alberola (eds.). *Sustainable agriculture*. (pp.635-651). Dordrecht. Springer.
- van Keulen, H.** (1982). Graphical analysis of annual crop response to fertilizer application. *Agricultural Systems*, 9:113-126
- Videla, C.** (2004). Mineralização bruta de nitrogênio em um Molisol do sudeste da província de Buenos Aires (Argentina). Tesis de doctorado. Piracicaba, SP, Brasil. Centro de Energía Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo. 124 pp.
- Watanabe, I., Yoneyama, T., Padre, B., Ladha, K.** (1987). Difference in natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in several rice (*Oryza sativa* L.) varieties: application for evaluating  $\text{N}_2$  fixation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 33(3): 407-415.
- Wongl, M.T.F., Nortcliff, S.** (1995). Seasonal fluctuations of native available N and soil management implications. *Fertilizer Research*, 42: 13-26.
- Workman, D.** (2018). *Rice exports by country*. World's Top Exports (WTEEx). [En línea]. 31 Julio 2018. <http://www.worldstopexports.com/rice-exports-country/>
- Xu, Y., He, J., Cheng, W., Xing, X., Li, L.** (2010). Natural  $^{15}\text{N}$  abundance in soils and plants in relation to N cycling in a rangeland in inner Mongolia. *Journal of Plant Ecology*, 3 (3): 201-207
- Yoneyama, T.** (1996). Characterization of natural  $^{15}\text{N}$  abundance of soils. En: T.W. Boutton, S.I. Yamasaki (eds.). *Mass Spectrometry of soils*. (pp. 205-223). New York. Marcel. Dekker.
- Yoneyama, T., Kouno, K., Yazaki, J.** (1990). Variation in natural  $^{15}\text{N}$  abundance of crops and soils in Japan with special reference to the effect of soil conditions and fertilizer application. *Soil Science and Plant Nutrition*, 36(4): 667-675.
- Yun, S.I., Lim, S.S., Lee, G.S., Lee, S.M., Kim, H.Y., Ro, H.M., Choi, W.J.** (2011). Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of paddy rice (*Oryza sativa* L.) grown with synthetic fertilizer, livestock manure compost, and hairy vetch. *Biology and Fertility of Soils*, 47: 607-617.

- Zapata, F.**, (1990). Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. In: Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. G. Hardson [ed.]. Training course series N°2. (pp. 61-127). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Zhang, A., Liu, R., Gao, J., Yang, S., Chen, Z.** (2014). Regulating N application for rice yield and sustainable eco-agro development in the upper reaches of yellow river basin, China. *Scientific World Journal*. [En línea]. 12 noviembre 2017. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4086425/>
- Zhao, G., Miao, Y. W. H., Su, M., Fan, M., Zhang, F., Jiang, R., Zhang, Z., Liu, C., Liu, P., Ma, D.** (2013). A preliminary precision rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Research*, 154:23-30.