

Optimización del Manejo del Nitrógeno en Sistemas Arroceros del Sur Latinoamericano¹

R. J. Melgar*, M. A. Méndez*,
M. M. Figueroa*, M. C. Sanabria*

RESUMEN

El manejo del nitrógeno (N) es el factor más importante en el aumento en los rendimientos del arroz (*Oryza sativa* L.) bajo riego en las regiones arroceras argentinas, así como en las de Brasil y Uruguay. Para optimizar la eficiencia de los fertilizantes, se condujeron ocho experimentos en varios sitios de Corrientes y se estudió el efecto de distintos momentos de aplicación y fraccionamiento de niveles de N sobre el rendimiento de grano, materia seca total (MST) y recuperación del fertilizante. El N (urea) se aplicó en tres niveles (50, 100 y 150 kg/ha) y en tres momentos: siembra, pre-inundación y diferenciación de panícula, combinando aplicaciones únicas y fraccionadas, en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Las aplicaciones fraccionadas tienen efecto lineal y aditivo, y las tempranas son más eficientes que las tardías. El fraccionar las aplicaciones no ofrece ventajas sobre los rendimientos pero se disminuye el riesgo de vuelco por las dosis más altas. El manejo recomendable de N es aplicar la dosis menor (50 kg/ha) en una única aplicación a la pre-inundación o en dos mitades a la siembra y a la pre-inundación. La recuperación del N aplicado fue en promedio cercano al 40 por ciento. Además, estas cifras de otras estimaciones presentadas, permitirían el cálculo de dosis óptimas económicas, una vez tomados en cuenta los diferentes costos de aplicación para cada momento y combinación.

Palabras clave: Recuperación de N, vuelco, fertilización fraccionada.

INTRODUCCIÓN

Se considera que la fertilización nitrogenada es una de las prácticas con más influencia en el aumento de los rendimientos de arroz irrigado. Sin embargo, su eficiencia está influida por muchos factores, tales como, dosis de nitrógeno (N), modo y momento de aplicación del fertilizante, variedad, manejo

ABSTRACT

Nitrogen (N) management is the most relevant agronomic factor determining grain yields of irrigated rice (*Oryza sativa* L.) in growing areas of Argentina, southern Brazil and Uruguay. Six methods for applying urea-N were evaluated in eight field trials in Corrientes to optimize fertilizer efficiency. Each N rate (50, 100 and 150 kg/ha) was applied combining single and split applications at planting, at pre-flooding and at panicle differentiation. Total dry matter and N uptake increased across the N rate evaluated, but maximum grain yield was associated with lowest N level applied. The effect of single applications are linear and additive. Splitting N did not result in higher yields, but decreased the risk of lodging. Early applications were more efficient than later ones. Recommended management should include a single low rate at planting or preflooding. Higher rates must be applied split at planting and preflooding. Average apparent recovery of applied N was estimated as 40 %. These figures, along others presented in this paper, would allow the estimation of optimum rates under different combinations, provided the application costs were taken into account.

Key words: N recovery, lodging, split N applications.

del agua y niveles de radiación solar entre los más importantes.

Los rápidos cambios físico-químicos que tienen lugar en el suelo debido a la inundación por riego y la movilidad y dinámica del N hacen que la aplicación tenga una especial importancia en la eficiencia del nitrógeno de fertilizantes (De Datta 1985). La absorción de N aumenta con la edad de la planta por el desarrollo más extenso de su sistema radicular, pero el efecto de una mayor disponibilidad de N al avanzar el desarrollo de la planta sobre el rendimiento de grano es menor, ya que el potencial de rendimiento se determina en estadios más tempranos. Si bien el fraccionamiento de las aplicaciones, como un método para aumentar la eficiencia de los fertilizantes, es usualmente recomendado, los resultados que los fundamentan son muy variables (Vlek y Fillery 1985).

¹ Recibido para publicar el 15 de junio de 1994.
Se agradece a los encargados de los establecimientos en los ensayos regionales, así como al personal de la Estación Experimental Corrientes y de las agencias de Santo Tomé y Mercedes, por su apoyo en los experimentos. Asimismo expresan su reconocimiento a Laura Giménez, por su participación en los análisis estadísticos en este trabajo.

* Investigadores de la Estación Experimental Corrientes, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), CC núm 57-3400, Corrientes, Arg

Por lo tanto, uno de los aspectos más estudiados de la tecnología de fertilizantes en el cultivo del arroz ha sido la sincronización de los mayores requerimientos de la planta con los momentos de mayor disponibilidad de N (Evatt y Hodges 1975; Reddy y Patrick 1976; De Datta 1986).

En Argentina, así como en el sur de Brasil y Uruguay, en los sistemas de producción de arroz de siembra de secano y riego de inundación entre los 20 y 30 días subsiguientes, la fertilización nitrogenada aparenta ser insuficiente y concentrada en aplicaciones de baja eficiencia. La mayoría de los productores aplica un promedio de 10 N kg/ha a la siembra, y lo complementa con 25 N kg/ha a la diferenciación de la panícula (Ligier y Roig 1992).

Experiencias previas mostraron que los rendimientos máximos estaban asociados a aplicaciones fraccionadas de 70 N kg/ha, con la mitad al inicio del riego y la otra a la diferenciación de la panícula (Melgar *et al.* 1990). Otros experimentos en Brasil con la variedad IRGA 409, la más ampliamente distribuida en la región, indican que los rendimientos más elevados se alcanzaron con 60 N kg/ha y que dosis superiores a 50 N kg/ha deberían fraccionarse, asegurando una mayor proporción al momento de diferenciación de la panícula (Lopes y Carmona 1986). En cambio, las recomendaciones sobre manejo del N en sistemas de cultivo similares en EE.UU sugieren concentrar la fertilización nitrogenada al inicio del riego, evitando aplicaciones a la diferenciación de panícula, de menor eficiencia (LSU 1987).

El inicio de las operaciones de riego concentra los recursos de los establecimientos arroceros. Es posible que la pérdida de eficiencia del N en aplicaciones tempranas, asociadas a la denitrificación (Fillery y Vlek 1982) o volatilización de amonio (Mikkelsen *et al.* 1978), o tardías, puede compararse económicamente con una única aplicación ante la disminución de costos, derivada de realizar una única operación a la siembra, especialmente en suelos donde las pérdidas por lixiviación sean escasas, como se presume de los suelos arroceros de Corrientes (Escobar *et al.* 1990). Las pérdidas pueden también limitarse con un adecuado manejo del riego.

Este trabajo se llevó a cabo para proveer información sobre respuestas alternativas de diferentes fraccionamientos y formas de aplicación de N, para optimizar la eficiencia de los fertilizantes. El objetivo específico fue

cuantificar la respuesta al N, aplicado en diferentes momentos y fraccionamientos, sobre el rendimiento arroz-cáscara, la producción de biomasa y la absorción de N por el cultivo para determinar el sistema de aplicación de N de mayor eficiencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se condujeron dos grupos de experimentos. El primer grupo o experimento principal fue llevado a cabo durante tres años consecutivos en un Ocracualfe típico de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Corrientes del INTA. El segundo grupo consistió en cinco experimentos regionales en diferentes años y localidades de Corrientes. Estos constituyeron una selección de los tratamientos probados en el experimento principal en la EEA Corrientes, con la finalidad de validar algunas tendencias, probándolas en escenarios climáticos y edáficos diferentes. En el Cuadro 1 se muestran las localidades y ubicación geográfica de los sitios de los experimentos y los suelos utilizados clasificados con nivel de gran grupo.

Caracterización de los sitios

El clima de la región ha sido clasificado como húmedo, mesotérmico y con poca o nula deficiencia de agua de acuerdo al sistema de Thornthwaite. Datos de series climáticas indican que las precipitaciones durante el ciclo de cultivo, de octubre a abril, totalizan entre 900 mm y 1000 mm en promedio en la región. Las temperaturas máxima y mínima en promedio durante ese período son de 30.8°C y 19.4°C en los alrededores de la EEA Corrientes, y de 29.5°C y 17.0°C para Paso de Libres, respectivamente (Castro *et al.* 1991).

Para la caracterización de los suelos, se realizaron determinaciones en muestras del horizonte arable (0 cm - 20 cm) tomadas en la siembra (Cuadro 1). Los cationes intercambiables fueron extraídos con acetato de amonio 1 M, determinando el Ca y Mg en el extracto por complejometría con EDTA, y el K y Na por fotometría de llama. El aluminio intercambiable se evaluó por titulación en un extracto de una suspensión de suelo con KCl 1 M. El fósforo asimilable, extraíble con la solución de Bray 1, se determinó por colorimetría. La materia orgánica se analizó por el método estándar de oxidación húmeda con H₂SO₄ y dicromato de potasio. El pH se midió en una suspensión 1:2.5 suelo:agua.

Cuadro 1. Localidades, clasificación de suelos y características fisicoquímicas de la capa arable del suelo utilizado en los experimentos.

Sitio/año	Lat.(S)	Long.(W)	Suelo	P (mg/kg)	pH	Cationes				Al
						M.O.	Ca (%)	Mg (cmol _c /kg)	K (cmol _c /kg)	
EEA Ctes /1990	58°46'	27°39'	Ocracualfe	3	5.4	2.2	4.4	1.1	0.19	0.01
EEA Ctes /1991	58°46'	27°39'	Ocracualfe	7	5.0	1.6	2.2	1.7	0.16	0.02
EEA Ctes /1992	58°46'	27°39'	Ocracualfe	4	5.6	2.3	3.0	0.6	0.45	0.01
Sto. Tome /1991	56°07'	28°32'	Umbracualfe	14	4.1	10.7	0.8	0.4	0.17	1.32
P. Libres /1991	57°09'	29°41'	Haplacuepte	21	4.6	4.5	1.5	0.7	0.18	0.11
EEA Ctes /1991	58°46'	27°39'	Argiudol	17	5.0	1.4	2.2	1.8	0.16	0.01
Itaibate /1992	58°46'	27°35'	Albacualfe	4	4.6	1.7	0.3	0.2	0.10	1.60
Mercedes /1992	58°01'	29°10'	Argiacuol	6	5.3	2.4	2.6	1.0	0.10	0.16

Cuadro 2. Características agronómicas y climáticas de los ambientes estudiados.

Sitio/Año	Siembra Fecha	N comp.(DP)	Cosecha	Días 9° °C	Rad.Sol.45d MJ/m ²
EEA Ctes /1990	21-Nov	26-Enero	26-Marzo	1 987	883.8
EEA Ctes /1991	17-Dic	12-Feb	22-Abril	1 828	694.7
EEA Ctes /1992	30-Dic	25-Feb	27-Mayo	1 924	557.7
Sto. Tome/1991	25-Nov	3-Feb	5-Abril	2 112	718.9
P. Libres/1991	24-Nov	2-Feb	16-Abril	2 082	739.6
EEA Ctes./1991	17-Dic	19-Feb	22-Abril	1 828	694.7
Itaibate/1992	8-Nov	17-Enero	20-Marzo	2 190	809.1
Mercedes/1992	14-Oct	15-Dic	5-Marzo	2 018	966.7

Experimentos de campo

Los tratamientos en el ensayo de la EEA Corrientes tenían estructura factorial de tres niveles de N (50, 100 y 150 kg/ha de N) aplicados como urea, en seis métodos; se incluyó un testigo control sin N, totalizando 19 tratamientos. Los seis métodos comprendieron tres aplicaciones únicas: a) a la siembra (S); b) a la pre-inundación (PI) y c) a la diferenciación de panícula (DP); y tres sistemas de aplicaciones fraccionadas en dos mitades d) a la siembra y pre-inundación (S-PI); e) a la pre-inundación y diferenciación de panícula (PI-DP) y f) a la siembra y diferenciación de panícula (S-DP). Estos tratamientos, esquematizados en el Cuadro 3, fueron arreglados en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

En los ensayos regionales, se incluyeron siete tratamientos. Una aplicación de 70 N kg/ha en cuatro formas: dos únicas, a la siembra (a) y a la pre-inundación (b), y dos fraccionadas: (d), (S + PI); y (e), (PI + DP), más un control sin nitrógeno. Incluyeron además dos niveles de N: 35 kg/ha y 105 kg/ha en una única aplicación a la siembra (a), para ajustar los rendimientos a una curva de respuesta. El diseño fue de bloques al azar con cuatro repeticiones.

Las aplicaciones a la siembra se mezclaron con los 5 cm superficiales del suelo. Las aplicaciones de pre-inundación se realizaron al voleo, 24 horas antes del primer riego, el que fue llevado a cabo entre los 22 d y 29 d después de la emergencia. Las aplicaciones a la diferenciación de panícula se realizaron al voleo entre

los 57 d y 69 d de la emergencia, una vez drenadas las parcelas para facilitar la distribución del fertilizante. Las parcelas tenían 3 m x 7 metros.

Las parcelas recibieron una dosis única de 27 P kg/ha como superfosfato triple, y de 15 kg/ha de K como cloruro, incorporándose a la siembra. El riego se inició a los 30 d de la emergencia y continuó hasta la cosecha, manteniéndose una lámina de agua aproximada de 5 cm de espesor. Se realizaron aplicaciones de mezclas de herbicidas de post-emergencia en dosis y proporciones variables, según la necesidad de control de gramíneas, ciperáceas y/o malezas de hoja ancha.

La variedad utilizada fue 'IRGA 409' de grano largo fino, y de ciclo medio, en todos los casos excepto en el experimento regional denominado EEA Corrientes/1991, en que se utilizó 'Lemont', de ciclo más corto. En los experimentos regionales, los cultivos se condujeron con las técnicas de manejo de suelo, cultivo y riego de cada productor y se encuadraron dentro del rango de prácticas normales de la zona para ese año. No se registraron infestaciones graves de malezas, plagas o enfermedades.

Para cada experimento, se registraron las temperaturas acumuladas a partir de 9 °C, desde la emergencia a cosecha, así como la radiación solar acumulada desde los últimos 45 d antes de la cosecha (Cuadro 2). La cosecha se realizó entre los 115 d y 135 d, a la madurez fisiológica, cortando las plantas a ras del suelo en el centro de la parcela (2 m x 6 m).

El producto se trilló y se pesó por separado paja y grano para evaluar: a) rendimiento de arroz-cáscara y b) materia seca total (MST). Se tomaron submuestras para evaluar el contenido de agua y concentración de N en cada componente. Los resultados de arroz-cáscara se

expresaron en kilogramos por hectárea con 13% de humedad. Para determinar el contenido de N en los tejidos se extrajo una muestra compuesta por tratamiento, submuestreando cada repetición. Esta se secó a 60°C por 48 h y se molió y tamizó con una malla (1 mm). Una cantidad suficiente de este material se digirió en caliente con H₂SO₄ y se destiló por arrastre de vapor con la técnica de semi-micro Kjeldhal (Kenney y Nelson 1982). La incidencia del vuelco a la cosecha se evaluó en cada parcela de acuerdo a una escala de 1 (sin vuelco) a 9 (parcela totalmente volcada), modificada (CIAT 1983).

Recuperación del N aplicado

La materia seca total (MST) se define como la suma de arroz más paja, y el N absorbido por cada fracción; arroz y paja—producto del rendimiento por la concentración de N de cada fracción. El N absorbido por el cultivo es la suma del N absorbido en cada componente. El porcentaje de recuperación de N de un tratamiento determinado se define como la relación porcentual entre el N absorbido correspondiente a ese tratamiento, menos el N acumulado por el testigo, y la cantidad de N aplicado. El resultado expresa el porcentaje del N aplicado como fertilizante, recuperado por la planta por absorción. Se asume que el contenido de N en las raíces es constante para los tratamientos y que el N absorbido por el testigo representa el N suministrado por el suelo en condiciones naturales por procesos de mineralización (Terman y Brown 1968).

Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa SAS para computadoras personales

Cuadro 3. Fracción del total de N aplicado en cada momento para cada método.

Método	Aplicaciones	Momento de aplicación		
		Siembra	Pre-inundación	Diferenciación de panfcula
		Dosis total (%)		
a) S	Únicas	100	0	0
b) PI		0	100	0
c) DP		0	0	100
d) S + PI	Fraccionadas	50	50	0
e) PI + DP		0	50	50
f) S + DP		50	0	50

(SAS Institute 1988). Los resultados de los ensayos de la EEA Corrientes para las variables arroz-cáscara, MST y absorción de N, se analizaron estadísticamente de acuerdo al siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + c_k + b * c_{jk} + E_{ijk} \quad [1]$$

donde:

μ es el promedio general,

E es el error experimental,

a, b y c son los estimadores para el efecto de repeticiones, de tratamiento y de año, respectivamente.

La respuesta al agregado de N se evaluó por contrastes individuales entre el control y las parcelas fertilizadas. Las diferencias entre los métodos de aplicación también fueron evaluadas por contrastes individuales, oponiendo el efecto de aplicaciones: 1) únicas *versus* fraccionadas (S & PI & DP *vs.* S + PI & PI + DP & S + DP); 2) única a la siembra *vs.* pre-inundación (S *vs.* PI); 3) única a la siembra y pre-inundación *vs.* dif. panícula (S *vs.* PI & DP); 4) fraccionamientos contiguos *vs.* separados (S + PI & PI + DP *vs.* S + DP); y 5) fraccionamientos tempranos *vs.* tardías (S+PI *vs.* PI + DP).

Para estimar los coeficientes de respuesta en cada momento de aplicación para las mismas variables, el modelo considerado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + x_i + y_j + z_k + x * y_{ij} + x * z_{ik} + y * z_{jk} + E_{ijk} \quad [2]$$

donde:

x, y, z, son los estimadores del efecto lineal de N, agregado a la siembra, (S), a la pre-inundación (PI) y a la diferenciación de panícula (DP), respectivamente.

En los experimentos regionales, para las mismas variables, el modelo considerado fue:

$$Y_{ijl} = \mu + a_i + b_j + d_l + b * d_{jl} + E_{ijl} \quad [3]$$

siendo el coeficiente, d, estimador del efecto de localidad-año. En estos experimentos, las diferencias entre tratamientos se evaluaron por la prueba de rangos múltiples de Tukey al 0.05% de probabilidad

Para estimar la recuperación aparente de cada experimento se promediaron los tratamientos por método y se ajustaron mediante regresiones a las funciones lineal y de meseta según Anderson y Nelson (1987).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto en los rendimientos de arroz-cáscara

Experimento principal

Los cultivos tuvieron un comportamiento muy desigual según el año considerado, incidiendo en la diferente respuesta de los tratamientos. Por lo tanto, los resultados fueron analizados estadísticamente, considerando cada campaña por separado. Se omitió el análisis conjunto porque el efecto de la interacción año por tratamiento fue significativo al nivel de 0.01 de probabilidad, para las variables estudiadas: arroz, MST y N absorbido. En el Cuadro 4 se resumen los promedios de las variables del cultivo y la significancia del efecto de los tratamientos, los niveles de N y los métodos de aplicación, mientras que en el Cuadro 5 se presentan los rendimientos en promedio de cada tratamiento por campaña.

Los diferentes resultados obtenidos según los años se atribuyen a las distintas fechas de siembra, que resultaron en dispares niveles de radiación solar recibidos durante el llenado de granos, y a la variable climática de mayor incidencia en la respuesta al N (De Datta y Malabuyoc 1976) (Cuadro 2). El primer cultivo recibió mayor radiación solar con respuestas al N aplicado, pero aumentó el vuelco en las dosis mayores, lo que provocó una disminución de los rendimientos. En el tercer año, en cambio, la siembra más tardía y menores niveles de radiación produjeron principalmente menores rendimientos en general, debido a un deficiente llenado de granos, constituyendo éste, también, un efecto magnificado por niveles altos de nitrógeno. En el segundo año se observó una situación intermedia.

El agregado de N resultó en un aumento significativo de los rendimientos de arroz-cáscara en los tres años, lo que se evidenció cuando se compararon los testigos contra el resto de los tratamientos que recibieron N en cualquier forma (Cuadro 4). Sin embargo el efecto de N produjo, en todos los años, un efecto depresivo en los rendimientos de arroz, más allá del primer nivel de N agregado; por lo tanto, los mayores incrementos de rendimiento estuvieron asociados a la aplicación de 50 kg/ha de nitrógeno. Mayores niveles pueden resultar en mayores o menores rendimientos según el método de aplicación (Cuadro 5), y, en general, el efecto de las dosis fue mayor que el de los métodos de aplicación. Esa interacción determina que el efecto

Cuadro 4. Efecto de los tratamientos en el rendimiento de arroz-cáscara y materia seca total en el experimento principal.

	Arroz-cáscara			Materia seca total			Absorción de N		
	1990	1991	1992	1990	1991	1992	1990	1991	1992
	t/ha.						kg/ha		
Media general	5.02	7.52	5.73	14.5	16.2	18.0	120	132	135
C.M. Error	1.05	0.55	0.63	1.47	0.55	2.49	12.1	11.9	20.3
Control vs fertilidad	*	**	**	NS	**	NS	**	**	**
Niveles de N***									
N lineal	NS	**	**	NS	**	**	**	**	**
Método de fracc (****)	NS	**	*	NS	**	*	*	**	**
Niveles x método	**	**	**	**	**	**	*	**	NS
C.V. (%)	20.9	7.3	11.6	10.1	3.4	13.9	10.1	9.0	15.1

Notas: *, **, NS: Significativo al 0.05 y 0.01 nivel de probabilidad y no significativo respectivamente

***: El efecto del N cuadrático no fue significativo en ningún caso

****: 1) Únicas vs fraccionadas; 2) única a la PI vs DP; 3) única a la S vs PI y DP; 4) fraccionamientos contiguos vs separados; y 5) fraccionamientos tempranos vs tardíos

de los diferentes métodos de aplicación de 50 kg/ha de N sea diferente que al considerar dosis mayores.

Cuando se consideró solamente la dosis más efectiva en relación a las otras para cada campaña (Cuadro 6), las aplicaciones únicas superaron a las fraccionadas en las dos primeras campañas, pero no en el tercer año, debido a que las aplicaciones únicas tempranas fueron mucho más eficientes que en el tercer año. Las aplicaciones tempranas a la siembra o a la pre-inundación fueron igualmente efectivas, sin embargo hubo diferencias al comparar estas con aplicaciones a la diferenciación de panícula (Cuadro 6).

Entre las aplicaciones fraccionadas a la dosis más baja, las diferencias observadas a través de cada campaña varían cuando el contraste incluye aplicaciones de alta o de baja eficiencia. Mientras que en el primer y segundo año las aplicaciones más eficientes en términos de aumento de rendimiento fueron las tempranas, en el tercer año la aplicación más eficiente fue la más tardía. En cambio cuando se consideran los niveles más elevados de aplicación, el fraccionamiento fue ventajoso y dio rendimientos superiores a las aplicaciones únicas; entre éstas, a su vez, las aplicaciones tardías presentaron mejores rendimientos.

Los mejores rendimientos, asociados a las dosis menores de N probadas, determinaron que se considerara únicamente el primer nivel de N cuando se analizaron los rendimientos según el efecto parcial del N aplicado en distintos momentos. El modelo presentado en [2] fue simplificado porque las interacciones entre aplicaciones no fueron significativas, interpretándose que sus efectos son aditivos. Es decir puede haber respuesta a las aplicaciones tardías, independientemente de eventuales respuestas a aplicaciones más tempranas.

En el Cuadro 7 se presentan los estimadores de los efectos lineales del N aplicado. Estos estimadores son también considerados como indicadores de la eficiencia de la respuesta, cuantificando los kilogramos de arroz o materia seca total obtenidos, por cada kilogramo de N aplicado. Los momentos de aplicación más eficientes son los más tempranos: a la siembra y al inicio del riego, mientras que aplicaciones a la diferenciación de panícula son menos eficientes en los dos primeros años mientras que al tercer año es a la inversa. Se estima que las diferencias de radiación solar recibida durante el llenado de granos, en los distintos años, serían la causa de este efecto diferencial. Estos resultados coinciden con las investigaciones conducidas en Uruguay

Cuadro 5. Efecto de tres niveles de N aplicado en diferentes proporciones y momentos sobre el rendimiento de arroz-cáscara, materia seca total (MST) y N acumulado en la MST.

Método	1990				1991				1992			
	Nivel de N aplicado				Nivel de N aplicado				Nivel de N aplicado			
	50	100	150	Media	50	100	150	Media	50	100	150	Media
arroz-cáscara (t/ha)												
Control	3.84				6.62				5.59			
100-0-0	7.23	4.96	3.98	5.39	7.72	8.18	7.96	7.96	6.27	5.32	3.80	5.13
0-100-0	5.94	5.01	4.41	5.12	8.23	5.91	7.17	7.10	5.91	4.49	3.78	4.73
0-0-100	4.65	4.48	5.10	4.74	7.07	6.32	6.20	6.53	6.80	6.35	6.20	6.45
50-50-0	6.50	5.70	5.32	5.84	8.23	8.88	8.02	8.37	5.98	5.14	4.04	5.06
50-0-50	3.64	5.50	5.30	4.81	8.18	8.22	6.81	7.74	6.78	6.83	5.71	6.44
0-50-50	4.31	4.41	5.16	4.63	8.01	7.81	7.43	7.75	6.64	6.70	6.50	6.61
Media		5.38	5.01	4.88		7.90	7.55	7.26		6.40	5.81	5.00
M. S. T. (t/ha)												
Control	14.6				12.2				15.8			
100-0-0	16.3	12.8	12.1	13.7	15.7	17.6	18.4	17.2	15.3	19.0	20.1	18.1
0-100-0	15.3	14.1	16.7	15.3	17.7	11.3	17.0	15.3	18.2	19.7	21.7	19.8
0-0-100	14.0	14.3	14.3	14.2	14.5	16.4	16.9	15.9	15.3	15.5	17.7	16.1
50-50-0	16.5	14.8	13.7	15.0	16.4	19.7	16.7	17.6	17.4	18.3	20.2	18.6
0-50-50	13.7	15.1	15.1	14.6	15.6	17.6	15.2	16.1	19.3	18.4	18.0	18.5
50-0-50	14.3	15.5	13.0	14.2	15.4	16.1	16.6	16.0	15.9	17.3	18.1	17.1
Media		15.0	14.4	14.1		15.9	16.5	16.8		16.9	18.0	19.3
M. S. T. (kg/ha N)												
Control	95				78				93			
100-0-0	106	126	134	122	91	144	172	136	95	138	144	125
0-100-0	107	99	139	115	144	115	153	137	115	158	144	154
0-0-100	115	124	152	130	103	170	215	163	119	149	177	148
50-50-0	117	118	131	122	120	101	147	123	114	104	138	119
0-50-50	113	136	127	125	140	153	141	145	131	154	171	152
50-0-50	110	108	122	113	79	129	120	109	113	139	162	138
Media		111	119	134		112	136	158		114	140	164

Nota: Porcentaje del total aplicado a la siembra, al inicio de la inundación o diferenciación de panícula

(Chebataroff y Deambrosi 1985) y Brasil (Gomes y Vahl 1978). En estos trabajos, se menciona la fecha de siembra y la consecuente radiación solar recibida durante el período de llenado de granos, como el factor con más incidencia sobre las respuestas observadas ante el nitrógeno.

La disminución observada en los rendimientos a niveles altos de N se debió principalmente a una mayor incidencia del vuelco del cultivo. Las relaciones entre vuelco y rendimiento son complejas, ya que cuando éste supera un límite, como resultado de una mayor disponibilidad de N, aumenta la susceptibilidad al

Cuadro 6. Significado de los contrastes entre métodos de aplicación por nivel de N en cada campaña sobre el rendimiento de arroz-cáscara.

Contrastes	N aplicado (kg/ha)								
	50			100			150		
	1990	1991	1992	1990	1991	1992	1990	1991	1992
1) únicas vs fraccionadas	*	*	NS	NS	**	**	NS	NS	**
Aplicaciones únicas									
2) S vs PI	NS	NS	NS	NS	**	**	NS	*	NS
3) S & PI vs. DP	*	**	**	NS	**	**	NS	**	**
Aplicaciones fraccionadas									
4) Contiguas vs. separadas	*	NS	NS	NS	**	**	NS	N	**
5) Tempranas vs. tardías	*	NS	**	NS	*	**	NS	**	**

Notas: * ** NS: Significativo al 0.05 y 0.01 nivel de probabilidad y no significativo, respectivamente.

vuelco; pero cuando es muy intenso y prolongado, la pérdida de rendimiento es significativa.

En general, el vuelco fue mayor en la primera campaña que en la segunda: los índices en promedio del total del experimento fueron respectivamente 1.18 y 0.6. En el tercer año no hubo vuelco, pero el efecto negativo de las altas dosis de N sobre el rendimiento se observó como resultado de un aumento proporcional de la esterilidad en las panojas ("vaneo").

El efecto del aumento en los niveles de N en la incidencia de vuelco es determinante (Fig. 1). Para las dosis mínima, media y máxima, la incidencia de vuelco

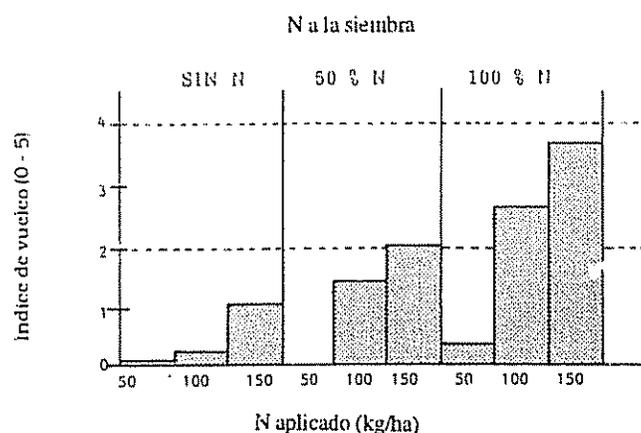


Fig. 1. Efecto del nivel y proporción de N aplicado a la siembra en la incidencia del vuelco en ensayos de arroz (Promedio de dos años).

con promedio de dos años aumentó linealmente de 0.1 a 0.9 y a 1.7 con los niveles de nitrógeno. La mayor incidencia de vuelco es también el resultado de una mayor proporción de las aplicaciones de N a la siembra. Considerando el promedio de todos los niveles de N, cuando el total de N se aplicó a la siembra, resultó en el máximo índice de vuelco (2.1); en cambio cuando la aplicación de N se redujo a la mitad de la dosis total, el promedio disminuyó a 1.1, y a 0.4 cuando no se aplicó N a la siembra. La interacción entre dosis y porcentaje de N a la siembra fue significativa en los dos años, siendo el vuelco despreciable a los niveles óptimos de N aplicado, asociado a los máximos rendimientos de arroz.

Ensayos regionales

Los resultados en promedio de estas pruebas llevados a cabo en las diferentes localidades también fueron marcadamente diferentes (valor de F para el efecto de la interacción localidad x año = 101.7**), como resultado de las diferencias de fertilidad de suelo u otros factores de sitio, afectando además también las respuestas al N de los tratamientos. Los resultados de los tratamientos fueron equivalentes en los distintos sitios, confirmando algunos efectos observados en el experimento principal (Cuadro 8). Se observaron tendencias similares a los efectos observados en el experimento principal en cuanto a un efecto lineal de la aplicación de N a la siembra y ausencia de diferencias significativas entre los distintos

modos de aplicación del N, tanto en los rendimientos de arroz como de materia seca total —datos de materia seca total no presentados.

Efecto en la recuperación del N aplicado

En general, los métodos de aplicación de N tuvieron un efecto menor en la producción de MST y la absorción del N, siendo mayor el efecto de la dosis que el efecto del momento de la aplicación. Pero a la inversa del efecto producido en el rendimiento de arroz, el N provoca un aumento lineal en el rendimiento de la biomasa (Cuadro 5). También se observó que la absorción de N por el cultivo aumentó linealmente con la aplicación de N en todos los experimentos, como resultado del aumento de la MST y de la concentración de N, tanto en la paja como en el grano.

La pendiente de las rectas de regresión indican la recuperación de una fracción entre 0.24 y 0.58 kg N por kilogramo de N aplicado en el experimento principal de la Estación Experimental. En los experimentos regionales, la variación fue entre el 0.22 y 0.64, y los promedios, aproximadamente similares en los dos grupos (0.43 y 0.40) (Fig. 2). Estos valores representan la recuperación porcentual aparente del N aplicado y la mayoría dentro del rango de 30% al 50% (Sánchez 1976) para el arroz irrigado. En la Fig. 2 los valores de la ordenada en el origen de las rectas (89 y 74 kg/ha N, promedio de cada grupo), estimados a partir de la absorción del N por los tratamientos que no recibieron N, representan la contribución del N suministrado al cultivo por la mineralización del N orgánico del suelo.

Las investigaciones conducidas por Stanford y Legg (1984) indican que la producción máxima en la

mayoría de los cultivos requiere una cantidad mínima de N en la MST, conocida como requerimiento interno de nitrógeno. Estos autores observaron que este requerimiento interno específico es aproximadamente constante a lo largo de una gran variedad de localidades, climas, cultivares y rendimientos máximos. Los valores sugeridos en el caso del arroz, en Louisiana (Reddy y Patrick 1976) y Arkansas (Wells y Shockley 1975), ubican 8.5 g N por kilogramo de MST. Los valores en promedio de los experimentos conducidos en la EEA aumentaron linealmente de 6 a 9, aproximadamente, con el N aplicado. Como los rendimientos de arroz disminuyeron con las dosis crecientes de N, esta tendencia indica que la remobilización y translocación del N de las partes vegetativas al grano, podría estar restringida debido a los bajos niveles de radiación solar (De Datta y Malabuyoc 1976; Seshu y Cady 1984), limitando los rendimientos de una manera diferente al efecto del vuelco mencionado.

Los valores en promedio de contribución del N del suelo, los índices de cosecha y eficiencias de absorción o recuperación, citados en este trabajo, podrían utilizarse para calcular los requerimientos de fertilización nitrogenada, de acuerdo con los procedimientos de Stanford y Legg (1984), una vez definida la absorción máxima de N por el cultivo, a su vez determinado por el rendimiento potencial de arroz. La fuerte influencia de la fecha de siembra a través de la determinación de la cantidad de radiación solar durante el periodo de llenado de granos, dificulta una generalizada aplicación del procedimiento debido a su influencia en el índice de cosecha.

Los niveles de N, asociados a los rendimientos de arroz más elevados, no son muy diferentes de los calculados en otros grupos de experimentos en la región (Lopes y Carmona 1986; Melgar *et al.* 1990). Sin

Cuadro 7. Estimadores del efecto de respuesta lineal al agregado de N en aplicaciones a la siembra, pre-inundación y diferenciación de la panícula sobre el rendimiento de arroz y MST.

Efecto del N	Arroz				MST			
	1990	1991	1992	Media	1990	1991	1992	Media
	kg arroz/kg N				kg MST/kg N			
Siembra	55 **	26 **	11 NS	30 **	35 *	70 **	-7 NS	42 **
Pre-inundación	40 *	36 **	5 NS	29 **	13 NS	104**	66 *	72 **
Diferencia de panícula	-3 NS	15 *	23 *	13 NS	-26NS	44 *	7 NS	17 NS

Nota: *, **, NS: Significativo al 0.05 y 0.01 nivel de probabilidad y no significativo, respectivamente

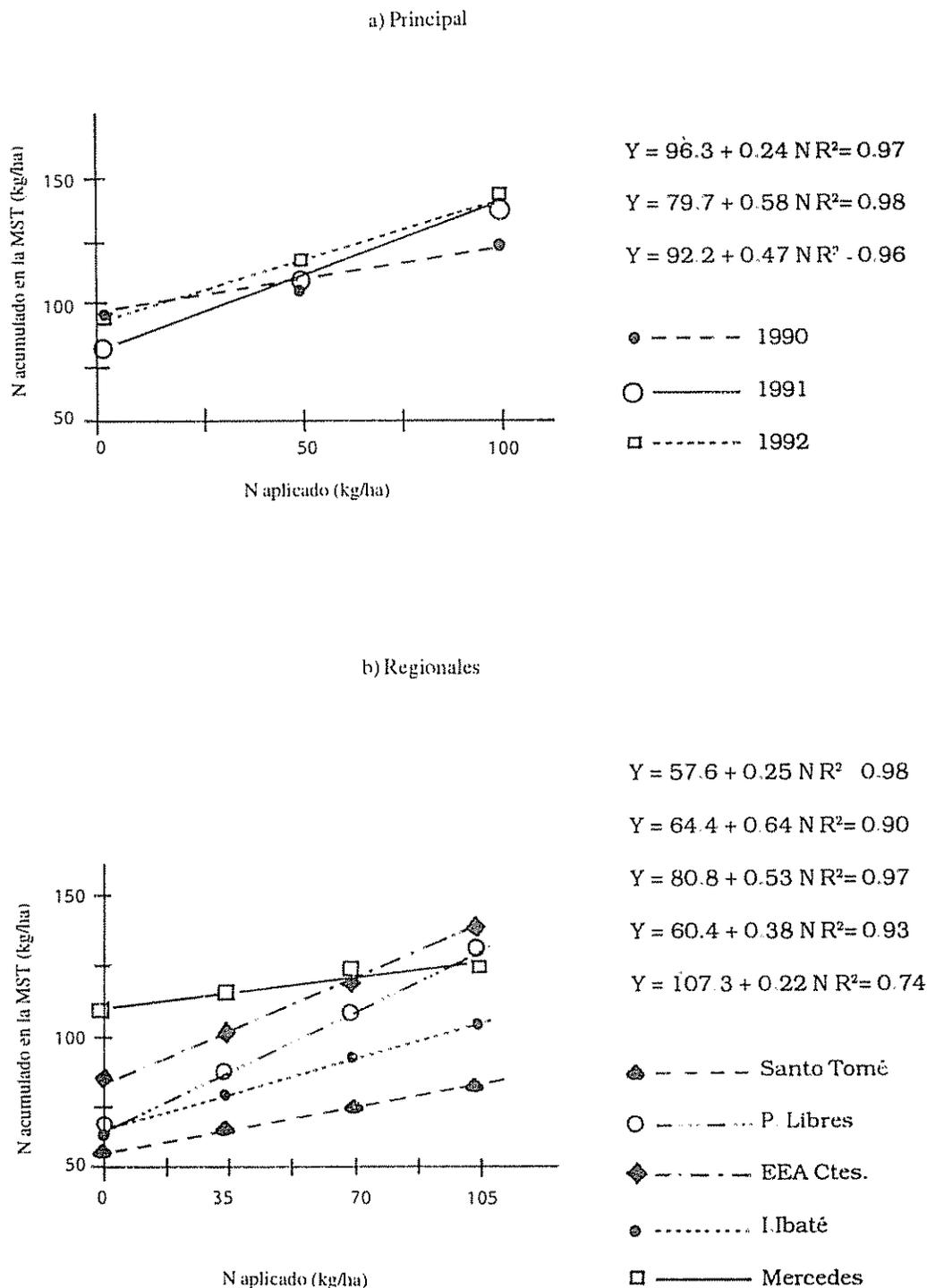


Fig. 2. Efecto del N aplicado sobre el N absorbido por el cultivo en los experimentos: a) Estación Experimental Corrientes; b) en los regionales.

Cuadro 8. Efecto de las aplicaciones de N en diferentes niveles y momentos sobre el rendimiento de arroz-cáscara en los experimentos regionales.

Tratamiento	Sitio (&)					
	S. Tome	P. Libres	EEA Corrientes	Itaibate	Mercedes	Media
(kg/ha) (#)	t/ha arroz-cáscara (*)					
0 (control)	3 55d	5 22c	5 45d	4 03c	5 41a	4 73d
35 100-0-0	4 03cd	5 10c	6 67c	4 63bc	6 09a	5 30c
70 100-0-0	5 31a	5 81ab	7 16bc	4 75bc	6 20a	5 85ab
105 100-0-0	5 33a	6 08a	7 99a	4 69bc	5 75a	5 97a
70 50-50-0	4 96ab	5 51bc	7 47ab	4 72bc	5 23a	5 58b
70 0-50-50	4 30bc	5 45bc	8 03a	5 00ab	6 09a	5 77b
70 0-100-0	4 78ab	5 49bc	7 80ab	5 82a	5 61a	5 90ab
Efecto lineal de N	**	**	**	NS	NS	**
C V (%)	18 6	10 1	11 0	13 2	11 8	13 2
C M Error	0 86	0 56	0 80	0 48	0 68	0 72

Notas: (*): Letras iguales en los tratamientos dentro de cada experimento indican ausencia de diferencia estadística al nivel de 0.05 de probabilidad

(&): El efecto de los sitios y su interacción con los tratamientos fueron altamente significativos.

(#): Porcentaje del total de N aplicado en cada momento

*, **, NS: Significativo al 0.05 y 0.01 nivel de probabilidad y no significativo, respectivamente

embargo, las recomendaciones locales con referencia al manejo del N sugieren que debería aplicarse en dosis de 50 kg/ha una vez, en la plantación o pre-inundación. Las dosis más elevadas deben dividirse en mitades y aplicarse a la pre-inundación. Las aplicaciones a la diferenciación de panícula deberían evitarse a menos que no pudieran realizarse otras previamente. Debido a las diferencias encontradas en cuanto a la efectividad, la dosis óptima económica debe considerarse tomando en cuenta los diferentes costos de aplicación para cada momento y combinación. La única posibilidad de aplicar N después de la inundación es mediante un avión, que encarece sensiblemente el costo de la fertilización y que —junto a la menor eficiencia de las aplicaciones tardías— disminuye aún más la rentabilidad de la operación. Por esta razón se enfatiza la recomendación de hacer aplicaciones tempranas de N como opciones adecuadas para el manejo de la fertilización en arroz.

CONCLUSIONES

Los rendimientos de arroz aumentaron por efecto del N aplicado hasta el primer nivel de N, mientras que

la producción de MST y N absorbido por el cultivo se lograron a lo largo del rango probado de N aplicado. Las dosis más elevadas de N provocaron disminuciones de rendimiento de arroz por vuelco o "vaneo".

El efecto de las dosis es mayor que el efecto del momento o el fraccionamiento de las aplicaciones, y no se recomiendan aplicaciones superiores a 50 kg/ha de nitrógeno. Con base en la recuperación del N aplicado, el uso de una eficiencia de 0.40 es adecuado para los balances y recomendar su empleo.

El fraccionar las aplicaciones no ofrece ventajas sobre los rendimientos de arroz, pero disminuye el riesgo de vuelco por dosis excesivas de nitrógeno. El efecto del fraccionamiento del N es lineal y aditivo a los niveles más bajos probados.

La eficiencia en promedio de cada momento disminuye a medida que se retrasa la aplicación. En consecuencia, la práctica recomendada para la región es concentrar las aplicaciones antes del riego, evitando las aéreas a la diferenciación de la panícula.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, R.L.; NELSON, L.A. 1987. Linear-plateau and plateau-linear-plateau models: Useful in evaluating nutrient responses. Technical Bulletin North Carolina Research Service (EE UU, Raleigh, NC) no 283
- CASTRO, G.O.; PÉREZ, C.E.; ARROYO, J. 1991. Provincia de Corrientes: Caracterización agroclimática. 1ra y 2da etapas. Buenos Aires, Arg., Consejo Federal de Inversiones. 5 tomos.
- CHEBATAROFF, N.; DEAMBROSI, E. 1985. Fertilización nitrogenada en arroz. In Jornadas de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (1985, Concepción del Uruguay, Entre Ríos) p 11-33.
- CIAT (CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL) 1983. Sistema de evaluación estándar para arroz. Col., Cali, Centro Internacional de Agricultura Tropical 61 p.
- DE DATTA, S.K.; MALABUYOC, J. 1976. Nitrogen response of lowland and upland rice in relation to tropical environment conditions. In Climate and rice. Los Baños, Filipinas, International Rice Research Institute p 509-539
- DE DATTA, S.K.; MALABUYOC, J. 1985. Availability and management of nitrogen in lowland rice in relation to soil characteristics. In Wetland soils: Characterization, classification and utilization. Los Baños, Filipinas. IRRI p. 247-267
- DE DATTA, S.K.; MALABUYOC, J. 1986. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia. Fertilizer Research (EE UU.) 9:171-186
- ESCOBAR, E.H.; LIGIER, H.D.; MATTEIO, H.R. 1990. Provincia de Corrientes. In Atlas de suelos de la República Argentina. Buenos Aires, Arg., Ministerio de Agricultura/INTA, Proyecto PNUD Arg 019/85.
- EVATT, N.S.; HODGES, R.J. 1975. Developing efficient systems of fertilization of rice. In Six decades of rice research in Texas. Texas A & M University, College Station. Research monograph no 4 p 31-36.
- FILLERY, I.R.P.; VLEK, P.L.G. 1982. The significance of denitrification of applied nitrogen in fallow and cropped rice soils under different flooding regimes. Plant Soil 65:153-169
- GOMES, A.S.; VAHAL, L.C. 1978. Respostas de cultivares de arroz irrigado a níveis e épocas de aplicação de nitrogênio. In Reunión Anual de Arroz (8, Porto Alegre) Anais Pelotas, RS, EMBRAPA/UEPAE p 84-90
- KEENEY, D.R.; NELSON, D.W. 1982. Nitrogen: Inorganic forms. In Methods of soil analysis 2nd ed. A.L. Page (Ed.) Agronomy 9:643-698
- LIGIER, H.D.; ROIG, H. 1992. Relevamiento de demandas del sector arrocero. INTA, EEA Corrientes. Proyecto Arroz 44 p.
- LOPES, M.S.; CARMONA, P.S. 1986. Níveis e épocas de aplicação de nitrogênio em genótipos de arroz irrigado. In Reunião da cultura do arroz irrigado. (15, 1986) Anais R.S., Bra., Porto Alegre.
- LSU (LOUISIANA STATE UNIVERSITY). 1987. Rice production handbook. Baton Rouge, LA., Agricultural Center 62 p.
- MELGAR, R.J.; MANOILOFF, I.T. DE; LIGIER, H.D. 1990. Niveles y factores de respuesta del arroz a los fertilizantes en el norte de Corrientes. Ciencia del Suelo 8:64-72.
- MIKKELSEN, D.S.; DE DATTA, S.K.; OBCEMEA, W.N. 1978. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. Soil Science Society of America Journal 42:725-730
- REDDY, K.R.; PATRICK, W.H. JUNIOR. 1976. Yield and nitrogen utilization by rice as affected by method and time of application of labelled nitrogen. Agronomy Journal 68:965-969
- SÁNCHEZ, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics: Nitrogen 6. New York, John Wiley p 184-222
- SAS INSTITUTE INC. 1988. SAS/STAT guide for personal computers: Version 6.03. Cary, NC, SAS Institute.
- SESHU, D.V.; CADY, F.B. 1984. Response of rice to solar radiation and temperature estimated from international yield trials. Crop Science 24:649-654
- STANFORD, G.; LEGG, J.O. 1984. Nitrogen and yield potential. In Nitrogen in crop production. Madison, WI., ASA, CSSA, SSSA. p. 63-272
- TERMAN, G.L.; BROWN, M.A. 1968. Crop recovery of applied fertilizer nitrogen. Planta and Soil 29:48-65
- VLEK, L.G.; FILLERY, I.R.P. 1985. Improving nitrogen efficiency in wetland rice soils. Fert. Soc. of London 230:2-35
- WELLS, B.R.; SHOCKLEY, P.A. 1975. Conventional and controlled release nitrogen sources for rice. Soil Science Society of America Proceedings 39:549-551