

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

VALIDACIÓN DE CURVAS CRÍTICAS DE DILUCIÓN DE NITRÓGENO PARA
DOS IDEOTIPOS DE ARROZ EN URUGUAY

por

Guillermo FABINI

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO

URUGUAY

2018

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Jesús Castillo

Ing. Agr. Claudia Marchesi

Ing. Agr. Carlos Perdomo

Fecha: 18 de junio de 2018

Autor: -----

Guillermo Fabini Ameixeiras

AGRADECIMIENTOS

Al INIA, por permitirme llevar a cabo este trabajo experimental en la Estación Experimental Paso de la Laguna, donde me brindaron todos sus materiales e infraestructura para realizar este trabajo.

A todo el personal de INIA, por estar dispuestos a ayudar en todo momento. Especialmente a Alexandra, Beto, César, Santiago, Rubén, Damián y Fernando quienes me acompañaron en el campo.

A los Ing. Agr. Jesús Castillo y Claudia Marchesi, por el apoyo brindado y por ser mis guías en este mundo de la investigación.

A Sully Toledo, del personal de biblioteca de Facultad de Agronomía, por la ayuda ofrecida en todas las consultas y con la mejor disposición.

A Belky Mesones por la ayuda incondicional en cada momento que la necesité con la mejor voluntad.

A Noel, Laura, Claudio, María, Marco, Edison, Marcela y Andreas quienes me ayudaron a crecer en esta carrera.

A Tania por estar conmigo en todo el proceso.

A mi familia y amigos, por ser el soporte esencial que llevó a este trabajo, por el apoyo incondicional y por no dejar de insistir.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN SISTEMAS ARROCEROS	3
2.1.1 <u>Procesos en el suelo</u>	4
2.1.1.1 Dinámica en fase aeróbica.....	4
2.1.1.2 Dinámica en fase anaeróbica.....	6
2.1.1.3 Absorción de N.....	9
2.1.2 <u>Procesos del N en planta</u>	10
2.2 ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN N EN ARROZ.....	12
2.2.1 <u>Fertilización comercial a nivel mundial</u>	12
2.2.2 <u>Fertilización comercial en Uruguay</u>	13
2.2.3 <u>Fertilización basada en criterios objetivos</u>	15
2.2.3.1 Criterios basados en instrumental (LCC, SPAD, Green Seeker)	16
2.2.3.2 Curvas de dilución de N cultivos y forrajeras	18
2.2.3.3 INN	20
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	21
3.1 LOCALIZACIÓN	21
3.1.1 <u>Suelos</u>	21
3.1.2 <u>Clima</u>	21
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	23
3.3 MANEJO DEL EXPERIMENTO.....	24
3.4 DETERMINACIONES Y REGISTROS	25
3.4.1 <u>Determinación de población lograda</u>	25
3.4.2 <u>Determinación de la acumulación de M.S</u>	25
3.4.3 <u>Determinación de N en planta</u>	25

3.4.4	<u>Componentes del rendimiento</u>	26
3.4.5	<u>Rendimiento</u>	26
3.5	CURVAS UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN	26
3.5.1	<u>Curvas de dilución en ideotipo índica</u>	26
3.5.2	<u>Curvas de dilución en ideotipo japónica</u>	27
3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
3.6.1	<u>Hipótesis planteadas</u>	28
3.6.1.1	Hipótesis agronómica	28
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	29
4.1	RESPUESTA A FERTILIZACIÓN	29
4.1.1	<u>Acumulación de materia seca en INIA Merín</u>	29
4.1.2	<u>Acumulación de materia seca en Parao</u>	30
4.1.4	<u>Concentración de nitrógeno en INIA Merín</u>	31
4.1.5	<u>Concentración de nitrógeno en Parao</u>	32
4.1.6	<u>Rendimiento en grano</u>	33
4.2.1	<u>Curvas de dilución de N en INIA Merín</u>	36
4.2.2	<u>Curvas de dilución de N en Parao</u>	37
4.3	CURVAS DE DILUCIÓN Y RENDIMIENTO EN GRANO	38
4.3.1	<u>Curvas de dilución y rendimiento en grano para INIA Merín</u>	38
4.3.2	<u>Curvas de dilución y rendimiento en grano para Parao</u>	41
4.4	ADAPTABILIDAD DE LAS CURVAS CRÍTICAS DE DILUCIÓN	43
4.4.1	<u>Adaptabilidad de las curvas para INIA Merín</u>	43
4.4.2	<u>Adaptabilidad de las curvas para Parao</u>	45
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	49
6.	<u>RESUMEN</u>	51
7.	<u>SUMMARY</u>	53
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	54

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Detalle del manejo de los cultivos en el experimento.....	24
2. Ecuaciones de curvas críticas de dilución de N en índicas.....	27
3. Ecuaciones de curvas críticas de dilución de N en japónicas	27
4. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP, P y 50 DDP en INIA Merín según las dosis a macollaje (N _{mac} kg N ha ⁻¹).....	31
5. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP, 30 DDP y 50 DDP en INIA Merín según las dosis a primordio (N _{mac} kg N ha ⁻¹).....	31
6. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP, P y 30 DDP en Parao según las dosis a macollaje (N _{mac} kg N ha ⁻¹).	33
7. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP y 30 DDP en Parao según las dosis a primordio (N _{mac} kg N ha ⁻¹).	33
8. Rendimiento (kg ha ⁻¹) de INIA Merín y Parao según los tratamientos a aplicados.	35
9. Rendimiento en grano alcanzado según el tratamiento para INIA Merín.	39
10. Rendimiento en grano alcanzado según el tratamiento para Parao.....	41

Figura No.	
1. Evolución de la precipitación (mm) y temperatura media (°C) durante la zafra en estudio (2016-17) y en la serie histórica (1973-2017) para los meses desde septiembre a abril.	21
2. Evolución de la heliofanía (hs. sol día ⁻¹) y la radiación (cal/cm2/día) durante la zafra en estudio (2016-17) y en la serie histórica (1973-2017) para los meses desde septiembre a abril.	22
3. Acumulación de MS (kg ha ⁻¹) de la variedad INIA Merín desde 15 días antes de primordio floral (15 DAP) hasta 50 días después de primordio floral (50 DDP) en función de la dosis de N.	29
4. Acumulación de MS (kg ha ⁻¹) de la variedad Parao desde 15 días antes de primordio floral (15 DAP) hasta 30 días después de primordio floral (30 DDP) en función de la dosis de N.	30

5. Comparación de curvas críticas de dilución de N reportadas internacionalmente y la curva de dilución de la variedad INIA Merín para los tratamientos 0+0, 25+25, 50+50 y 100+100.	36
6. Comparación de curvas críticas de dilución de N reportadas internacionalmente, y la curva de dilución de la variedad Parao para los tratamientos 0+0, 25+25, 50+50 y 100+100.	37
7. Comparación de curvas críticas de dilución de N internacionalmente y la curva de dilución de la variedad INIA Merín para para los rendimientos que superaron el 95% del rendimiento relativo.	40
8. Comparación de curvas críticas de dilución de N reportadas internacionalmente y la curva de dilución de la variedad Parao para los tratamientos que superaron el 95% del rendimiento relativo.	42
9. Rendimiento relativo de la MS acumulada a R3 en INIA Merín según las dosis de N (kg ha^{-1}).	43
10. Índice de nutrición nitrogenada en función de la acumulación de MS (kg ha^{-1}) para INIA Merín.	44
11. Rendimiento relativo de la MS acumulada a R3 en Parao según las dosis de N (kg ha^{-1}).	46
12. Índice de nutrición nitrogenado según la acumulación de MS (kg ha^{-1}) para Parao.	47

1. INTRODUCCIÓN

Según MGAP. DIEA (2017) en la cosecha 2017 se produjeron 1.409 miles de toneladas, con un rendimiento promedio de 8571 kg/ha, ubicando a Uruguay también dentro de los países con más alta productividad y calidad de grano.

Dentro de los cultivos extensivos en el país, el arroz es el que invierte más capital por hectárea; por el alto costo del cultivo (semilla, fertilizantes, herbicidas, combustibles, mano de obra, agua, etc.), y porque requiere altas inversiones en: maquinaria y equipos, instalación de estaciones de bombeo, canales, drenajes, caminos, puentes, construcción de represas para riego, etc. Esto, acompañado de un escenario desfavorable de precios como el actual, provoca la baja rentabilidad y el alto riesgo del cultivo.

En las últimas décadas la tasa de incremento en rendimiento se ha situado en los 176 kg ha⁻¹año⁻¹, sustentada principalmente por un ajuste en el manejo del cultivo, acompañado de una mejora en material genético pero de menor incidencia. Este ajuste en el manejo del cultivo está asociado a una fuerte adopción de tecnología, característica que diferencia al sector arrocero uruguayo por sobre otros rubros. No obstante, aspectos como el manejo de la fertilización del cultivo han experimentado muy pocos cambios, siendo utilizada en gran parte del área cultivada la propuesta de fertilización definida hace varias décadas atrás, la cual estaba basada en la utilización de fósforo y nitrógeno (N). Producto de la información generada y de lo observado a nivel productivo las dosis aplicadas de N han tendido a aumentar, en los últimos años especialmente (Castillo, 2017). Estos aumentos en dosis acompañados de mejoras a nivel de material genético han generado un incremento de rendimiento.

Aumentos sostenidos en los rendimientos llevan a un incremento en la demanda de N por parte del cultivo. La demanda de N no es estable a lo largo del ciclo de vida del cultivo, sino que varían según sus necesidades. Este N debe ser aportado intentando sincronizar la demanda, evitando así pérdidas del nutriente, ineficiencia del uso del fertilizante y riesgo de contaminación ambiental. Lo importante sería poder sincronizar la demanda del cultivo con el suministro del suelo, monitoreando el estado nutricional del cultivo, y dividiendo las cantidades de fertilizante en distintos momentos para un aporte más acorde a las necesidades del mismo.

Dada la importancia del cultivo de arroz como rubro a nivel nacional, lo que implica mantener los altos rendimientos actuales e incluso aumentarlos (que a su vez implican grandes extracciones de nutrientes) y los altos costos, es importante maximizar la eficiencia del uso de los recursos. Para ello hay que

desarrollar indicadores para realizar las fertilizaciones con criterios objetivos, mejorando la rentabilidad, productividad y aprovechamiento de los insumos. Actualmente existe una propuesta de modelo para la fertilización nitrogenada que utiliza el potencial de mineralización del nitrógeno del suelo para definir las dosis en macollaje la cual ha mostrado resultados alentadores. No obstante para la recomendación posterior a este período no se han podido ajustar modelos robustos ni, principalmente, prácticos (Castillo et al., 2014).

Con el fin de aportar herramientas para un manejo más eficiente del N, este trabajo se centra en la utilización del modelo de curvas críticas de dilución de N como parámetro para regular la nutrición nitrogenada del cultivo. Con esto se pretende generar una evidencia del status nutricional del cultivo a partir de las curvas establecidas previamente a nivel internacional para el arroz, determinando las concentraciones críticas de nitrógeno en la planta que no limitan la producción de materia seca (MS), estudiando sus efectos sobre el rendimiento en grano.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El N es un macronutriente esencial y primario, debido a su nivel de absorción, su importancia a nivel metabólico, y su escasez relativa (junto con fósforo y potasio) respecto al resto de los macronutrientes. Cumple un rol central en el desarrollo de la planta constituyendo proteínas, clorofila, ácidos nucleicos, nucleósidos y nucleótidos. Comúnmente constituye del 1,5 al 5% aproximadamente del total de la planta (Haynes, 1986).

Este N se encuentra en el suelo de dos formas: orgánica (materia orgánica del suelo) o inorgánica (amonio, nitrito y nitrato). El 98% del N en el suelo se encuentra en la fracción orgánica, y para estar disponible para las plantas necesita sufrir los procesos de mineralización, y así poder absorberse como nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). El N inorgánico (2% del N total) presenta baja estabilidad (Stevenson 1982, Bertsch 1995, Frioni 2006), quedando disponible para una infinidad de procesos, desde reducción y oxidación hasta inmovilización (proceso contrario a la mineralización). Estos procesos provocan que el N inorgánico tenga corta vida en el suelo y la complejidad de estas reacciones interaccionando entre sí y con el medio ambiente (temperatura, humedad, material madre, vegetación, etc.), lleva a que sea difícil predecir la cantidad de N mineral disponible para las plantas en un momento dado (Perdomo y Barbazán, 2012).

Las cantidades de N demandadas por el cultivo de arroz aumentan cuando se incrementa el rendimiento o la acumulación de MS. Las concentraciones de N suelen ser mayores en tejidos jóvenes, por lo que cabe esperar que plantas más jóvenes tengan mayores porcentajes de concentración de N, y a medida que avanza el ciclo y acumulan MS, este N sufra un efecto de “dilución” (Perdomo y Barbazán, 2012).

Para poder estudiar bien este efecto es necesario conocer bien las dinámicas del N en el sistema, la capacidad de suministro de este nutriente por parte del suelo y las interacciones con el fertilizante, las necesidades del cultivo a lo largo de su ciclo, la capacidad de absorción de la planta, y los procesos de transformación de ese N disponible absorbido en rendimiento en grano.

2.1 DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN SISTEMAS ARROCEROS

Existen dos ecosistemas principales sobre los cuales se siembra arroz a nivel internacional: las tierras altas y bajas. El ecosistema de tierras bajas comprende el 80% del área cosechada a nivel mundial, y es el ecosistema en el que se basa la producción de arroz del Uruguay, sobre suelos nivelados y, a nivel nacional, dependiente de infraestructura de riego (Bijay-Singh y Singh, 2017). En Uruguay, el ciclo del cultivo se desarrolla entonces sobre condiciones

de humedad de suelos contrastantes. Desde la siembra hasta inicios de V6 (macollaje, según Counce et al., 2000) se produce en secano, siendo inundado luego de este momento. Esto produce cambios en las propiedades del sistema debido a que ocurren procesos químicos y biológicos asociados a la falta de O_2 (Patrick y Mahapatra, 1968).

La inundación del suelo provoca las pérdidas de NO_2^- y NO_3^- ya presentes en el suelo por medio de desnitrificación y lixiviación (Buresh et al., 2008). Si bien el N inorgánico que había disponible se pierde, la materia orgánica se sigue mineralizando y queda disponible en el agua en forma de NH_4^+ .

2.1.1 Procesos en el suelo

Según varios autores (De Datta 1981, Savant y De Datta 1982, Patrick 1982, Patrick et al. 1985, Keeney y Sahrawat 1986, Mikkelsen 1987, Mosier et al. 2004) los procesos que afectan de manera más importante la dinámica del N en el suelo son los de mineralización, inmovilización, nitrificación, desnitrificación y volatilización. Estos procesos cambian según se trate de la fase aeróbica o anaeróbica del cultivo.

2.1.1.1 Dinámica en fase aeróbica

La mineralización es el proceso mediante el cual los microorganismos del suelo utilizan la MO para obtener energía. Como consecuencia las formas orgánicas de N son convertidas en formas inorgánicas (NH_4^+ y NO_3^-) las cuales quedan disponibles para las plantas. También pueden ser inmovilizadas; en el caso de NH_4^+ puede ser nitrificado, fijado por arcillas o puede ser liberado a la atmósfera como N_2 (Tisdale et al. 1993, Stevenson, citado por Baethgen et al. 1994). La amonificación (pasaje de N orgánico a NH_4^+) es independiente de la concentración de humedad en el suelo, ya que es realizada por muchas clases de microorganismos, tanto aeróbicos como anaeróbicos, mientras que la nitrificación (pasaje a NO_3^-) ocurre en un rango de contenido de agua más estrecho (Campbell, 1978).

La capacidad de un suelo de suministrar N a los cultivos a través de la mineralización de la MO, depende fundamentalmente del tipo de suelo (nivel de MO original, textura, estructura/aireación, etc.), pH, relación C/N del material en descomposición, temperatura y la disponibilidad de agua en el suelo (Stevenson, citado por Baethgen et al., 1994).

Las dos formas de N orgánico propensas a ser mineralizadas son sustancias con un alto grado de estabilidad: la materia orgánica del suelo (MOS) o el humus. Estas se caracterizan por tener una relación C/N baja y

constante y una mineralización lenta, situándose entre 1 y 3% anual. La otra forma son restos orgánicos recientemente incorporados al suelo y en procesos iniciales de descomposición. Estos restos no tienen mecanismos de estabilidad por lo que la tasa de mineralización va a depender de la relación C/N (Stevenson, 1982)

La inmovilización es la transformación de N inorgánico del suelo a N orgánico. Este proceso es llevado a cabo por microorganismos, los cuales absorben N mineral y lo transforman en el N constituyente de sus células y tejidos (Jansson y Persson, 1982).

Las transformaciones de las distintas formas de N inorgánico se dan por procesos biológicos como la nitrificación (NH_4^+ a NO_2^- y luego a NO_3^-) y desnitrificación (reducción de NO_2^- y NO_3^- a las formas gaseosas de óxido nitroso N_2O y N_2 , Hauck, 1981).

La desnitrificación es un proceso llevado a cabo por microorganismos anaerobios facultativos que tienen la capacidad de utilizar NO_3^- en vez de O_2 para su respiración, siendo este proceso favorecido en condiciones de anegamiento (Stevenson, 1982). Las pérdidas de N ocasionadas por dicho proceso pueden ser importantes en los casos en que ocurra una alta disponibilidad de NO_3^- , una alta disponibilidad de fuente de energía, y una baja concentración de O_2 (Holt et al., 1988).

Los factores que influyen en la nitrificación son, principalmente, la presencia de O_2 , ya que los microorganismos que llevan a cabo dicho proceso son aeróbicos estrictos, la temperatura, el pH, y las concentraciones de NH_4^+ (Stevenson, 1982).

Al igual que la desnitrificación, la volatilización es un proceso en el cual el N tiene como destino final la atmósfera. Este proceso comienza cuando el NH_4^+ se transforma en NH_3^+ siendo influido por factores como la temperatura, pH del medio, velocidad del viento, humedad en suelo (suelos que se están secando favorecen a la volatilización), y por el equilibrio entre el NH_4^+ intercambiable y el NH_4^+ disuelto en la solución del suelo (Keeney y Nelson 1982, Fillery y Vlek 1986). A mayores valores de pH, mayor va a ser la proporción de NH_4^+ que se encuentre como NH_3^+ (Nelson, 1982).

El aumento en la concentración de NH_3^+ por agregado de NH_4^+ o por aumento de pH, resulta en un aumento en la presión parcial del NH_3^+ del aire. La tasa de pérdida de NH_3^+ de una solución está relacionada con la diferencia de la presión parcial entre el NH_3^+ gas y el NH_3^+ de la solución. Debido a que las concentraciones de NH_3^+ gas son bajas y constantes, la tasa de volatilización está directamente relacionada con la concentración de NH_3^+ en

solución. Por lo tanto, las pérdidas por este proceso pueden ocurrir siempre que existan altas concentraciones de NH_3^+ en la superficie del suelo, situación esperable luego de una aplicación de fertilizantes amoniacales (Hauck, 1981).

2.1.1.2 Dinámica en fase anaeróbica

La inundación del suelo tiene un marcado efecto en el comportamiento de varios nutrientes importantes, y como consecuencia en el crecimiento y rendimiento de los cultivos sembrados (Wells et al., 1993).

El agua reemplaza al aire en los espacios porosos, y el nivel de O_2 comienza a descender tendiendo a cero en no más de 24 a 48 hs (De Datta, 1981). La inundación estimula la actividad de la microflora la que rápidamente descompone el sustrato oxidable disponible, creando una alta demanda de O_2 . Como producto de la respiración microbiana, la desaparición de O_2 es acompañada por la liberación de otros gases: dióxido de carbono (CO_2), N_2 o N_2O , metano (CH_4^+) e hidrógeno (H_2^+ , Patrick et al., 1985).

Por otro lado, el agregado de grandes cantidades de agua hace que el pH del suelo tienda a la neutralidad, descienda el potencial redox, ocurriendo cambios en el sistema de oxidación-reducción (Ponnamperuma, 1972, 1981, 1985).

Los organismos aeróbicos se vuelven latentes o mueren y entran en acción bacterias anaeróbicas obligadas o facultativas, produciéndose la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos. La descomposición de la MO en suelos anegados es lenta, ineficiente y menos completa que en un ambiente aeróbico (De Datta, 1981).

Otra característica de los suelos anaeróbicos, es su mayor capacidad de acumular MO, si se compara con suelos aeróbicos. Esto se debe a que la tasa de producción de la MO supera a la tasa de descomposición (Gorham, citado por Sahrawat, 2005). La MO en este tipo de suelo está relacionada con el régimen de humedad y el tipo de drenaje. Trabajos conducidos en Filipinas encontraron que a mayor intensidad de cultivo de arroz, mayor contenido de C orgánico y N total en suelo. Ensayos conducidos durante 15 años de arroz irrigado consecutivos demostraron que la MO aumentó 5 a 10% respecto a la situación original (Sahrawat, 2005).

En los sistemas de producción de arroz, la inundación genera cuatro zonas que influyen en la dinámica del nutriente. La primera corresponde a una lámina de agua superficial con flora viviente la cual puede potencialmente llegar a contribuir a la fijación biológica del N_2 . En segundo lugar, una capa oxidada de pocos mm de espesor que se localiza inmediatamente por debajo de la

lámina de agua. En tercer lugar, hay una capa gruesa de suelo reducido, y por último, existe una delgada capa oxidada en la zona rizosférica (Narteh y Sahrawat, 2000).

La mineralización es la conversión del N orgánico del suelo a NH_4^+ . En los sistemas arroceros esto ocurre por la ausencia de O_2 , inhibiéndose el proceso de nitrificación, dando como resultado una descomposición anaeróbica de MO. El proceso de descomposición anaeróbica involucra a diferentes microorganismos anaeróbicos y productos finales como CO_2 , CH_4^+ , ácidos orgánicos, NH_4^+ , H_2^+ (Ponnamperuma 1972, Mikkelsen 1987).

El NH_4^+ formado por mineralización de la MO puede quedar disponible para el intercambio catiónico (CIC), adsorción química por sustancias húmicas, fijación en arcillas e inmovilización por microorganismos (Stevenson, 1994).

La velocidad e intensidad de la tasa de mineralización está influenciada por la naturaleza y cantidad de MO, el período de inundación, la adición de fertilizantes y tipo de labranza, y la temperatura, entre otros (Stevenson 1994, Paul 1996). Alexander (1980), encontró que las tasas de mineralización en suelos secos son bajas si se compara con suelos húmedos. La cantidad de N inorgánico acumulado en suelo aumentó de 15 a 80 mg kg^{-1} , cuando el contenido de agua pasó de 10 a 30% en un período de sólo dos semanas.

La desnitrificación es un proceso de respiración microbiana en el cual el NH_4^+ formado por la mineralización se transporta a las zonas aeróbicas, donde ocurre una oxidación biológica. Como producto de esa oxidación se generan NO_3^- y NO_2^- que difunden a la zona anaeróbica convirtiéndose en N_2 o N_2O , para luego perderse a la atmósfera (Nicholas, citado por Ponnamperuma 1972, Knowles 1982, De Battista 2006).

Los microorganismos que intervienen en el proceso de la desnitrificación son un gran número de bacterias y hongos incluyendo especies heterótrofas y autótrofas (Painter, 1971). Ponnamperuma (1972) menciona que las frecuentes fluctuaciones de humedad en suelo crean condiciones ideales para que este proceso ocurra, ya que existe alternancia de ambientes aeróbicos que favorecen la nitrificación y anaeróbicos los cuales favorecen la desnitrificación.

En suelos cultivados la desnitrificación es indeseable, ya que significa una pérdida de N, por ende el mismo no estará disponible para el cultivo (Ponnamperuma, 1972). Este proceso es uno de los que explican la baja eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados en el cultivo de arroz (De Datta et al., 1987). Trabajos realizados por Mosier et al. (1990) utilizando

^{15}N como trazador, confirmaron que por este proceso se pierde el 10% del total de la urea aplicada.

La nitrificación en suelos inundados es un proceso estricto aeróbico microbiano, que ocurre en la capa superficial oxidada donde el NH_4^+ se transforma en NO_3^- (Dobermann y Fairhurst, 2000).

Considerando lo expuesto anteriormente es que se han generado tecnologías que minimizan las potenciales pérdidas de N. Algunas de estas son: localizar más eficazmente los fertilizantes nitrogenados en la zona anaeróbica, o con un inhibidor de la nitrificación y de liberación controlada (De Datta y Buresh, citados por Buresh et al., 2008).

La volatilización este es un proceso de pérdida de N donde el NH_4^+ en el agua de inundación pasa a la atmósfera como NH_3^+ . Mosier et al. (1990) encontraron que las mayores pérdidas de N agregado fueron ocasionadas por el proceso de volatilización de NH_3^+ . De los varios factores que afectan a la volatilización, el pH del sistema suelo-agua ha sido reconocido como el factor determinante más importante, ya que con un pH inferior a 7 predominan iones NH_4^+ , mientras que con un pH superior a 8,5 existe predominancia de NH_3^+ libre (Humphreys et al., 1988). A medida que aumenta el pH (mayor a 8,5) aumentan las pérdidas por volatilización, siendo éste un proceso rápido pudiendo durar de seis a diez días después de la aplicación de N (Christianson et al., 1995). Mayores pérdidas de NH_3^+ fueron causadas por urea en comparación con otras fuentes de NH_4^+ , ya que la hidrólisis de la urea proporciona alcalinidad que puede mantener o iniciar el proceso de pérdida (Keeney y Sahrawat, 1986).

Este proceso ocasiona pérdidas entre el 60 y 80% del N aplicado, comenzando entre los primeros 2 a 5 días después de la aplicación de urea (De Datta, 1981). Las pérdidas se estimaron en 27-56% del N agregado en estado vegetativo y de 10-15% en estado reproductivo (Buresh et al., 2008).

Debido a esto, son varios los trabajos a nivel internacional que realizan una serie de propuestas para disminuir las pérdidas y aumentar la eficiencia de éste nutriente. Entre otras son mencionadas, la colocación profunda del fertilizante en suelo (Youngdahl et al., 1986), incorporación de N en secano con posterior inundación (Freney y Denmead, 1992), y manejar dosis de N en función a los requerimientos del cultivo (Diekmann et al., 1993).

En el primer caso, la aplicación en profundidad minimizaría la exposición al fertilizante a los factores que desencadenan estos procesos de pérdida. Similar a esto, la aplicación en secano y posterior inundación hace que exista una rápida hidrólisis de la urea, quedando el NH_4^+ resultante fijado a los coloides del suelo. Por último, la adición de N en función a los requerimientos

del cultivo, minimizaría las potenciales pérdidas por el agregado en exceso de este nutriente. En tal sentido, en ocasiones donde se duplicó el agregado de N de 30 a 60 kg N ha⁻¹, la pérdida total de N aumentó en un rango de 37 hasta 54% (Diekmann et al., 1993).

Según Peoples et al. (1995), una forma eficiente para maximizar la absorción de la planta y minimizar las pérdidas es sincronizar el suministro de N con la demanda del cultivo.

La acumulación de NH₄⁺ y las condiciones anaeróbicas siguientes a la inundación del suelo, son favorables para la fijación temporal de este nutriente, principalmente en aquellos suelos con grandes concentraciones de arcilla tipo 2:1. Esto podría proteger al N de las pérdidas, al tiempo que permite una liberación oportuna del nutriente a las plantas (Scherer y Zhang, citados por Buresh et al., 2008). Una porción del NH₄⁺ aplicado podría ser fijado entre las capas expandibles de los minerales arcillosos silicatos y se vuelven no disponibles para las plantas (Williams, 2010). Estudios realizados por Keeney y Sahrawat (1986) determinaron que la fijación de NH₄⁺ en suelos inundados se correlacionó significativamente con la cantidad de Fe₂⁺ activo.

2.1.1.3 Absorción de N

En general la curva de absorción de N en el ciclo de la planta es muy similar a la de producción de MS (Lopes et al., 1993). La acumulación de N en la planta en función del tiempo sigue una curva sigmoide donde la acumulación al principio es escasa porque la planta recién se está desarrollando. Luego ocurre una etapa de máxima absorción de N que corresponde al periodo de activo crecimiento. Finalmente la tasa de absorción se reduce (Perdomo y Barbazán, 2012).

La planta de arroz exhibe dos momentos donde la tasa de consumo de N es mayor: una al momento de máximo macollaje y otra en la formación de la panoja (Shoji et al., 1986).

Las plantas pueden absorber N como NO₃⁻ o NH₄⁺. Como en la etapa de secano del arroz las condiciones permiten la acción de las bacterias nitrificantes, el N se absorbe como NO₃⁻ (Perdomo y Barbazán, 2012). En cambio en suelos anegados predomina en forma de NH₄⁺, por lo que es importante analizar las dos vías de absorción.

La mayor parte de la literatura sugiere que el arroz particularmente prefiere NH₄⁺ que NO₃⁻, sin embargo, Takenaga (1995) observó que en etapas reproductivas se absorbe más eficientemente el NO₃⁻ que NH₄⁺ en comparación con etapas vegetativas.

La absorción de nitrato implica dos fases, sobre todo cuando se fertiliza con urea ($\text{CO}_3(\text{NH}_2)_2$), el fertilizante más utilizado en Uruguay (MGAP. DIEA, 2017). Este aporta N en forma de NH_4^+ (una vez hidrolizado después del contacto con el suelo), el cual, si bien en parte se absorbe como tal, debe transformarse a NO_3^- en el suelo antes de poder ser absorbido. El proceso de absorción del NO_3^- es exclusivamente activo, implicando un gasto de energía. Una vez dentro de la planta, se reduce a NH_3 con un nuevo gasto de energía, para recién quedar disponible para la síntesis de compuestos. La tasa de absorción de N en esta forma depende de la concentración y temperatura además de la disponibilidad de energía (Perdomo y Barbazán, 2012). El agua es otro factor limitante, ya que su método de llegada a las raíces es mediante el flujo de masas (Tisdale, 1993). Una vez absorbido por la planta, el NO_3^- puede ser almacenado como tal en las raíces, o reducido y sintetizado en aminoácidos, o depositado en el xilema para ser transportado por los tallos, y donde puede acumularse como aminoácidos o NO_3^- . Posteriormente éstos pasan al floema, para luego ser traslocados a lugares de activo crecimiento.

El amonio se absorbe en dos etapas: una pasiva y otra activa. La etapa pasiva es muy probable que sea insignificante (Nye y Tinker, citados por Haynes, 1986). La etapa activa depende de la concentración, energía y temperatura, y se divide en tres fases: consumo en deficiencia, consumo de lujo, y toxicidad, siendo la primera la más importante (Haynes, 1986).

Los suelos inundados se caracterizan por poseer una concentración alta de NH_4^+ y baja de NO_3^- . Esto se considera benéfico, ya que el cultivo de arroz utiliza mejor el NH_4^+ y los excesos de este nutriente no son tóxicos para él (Ponnamperuma, 1972).

2.1.2 Procesos del N en planta

El N se considera el elemento nutritivo que repercute en forma más directa a la producción de arroz, afectando el rendimiento y sus componentes (Perdomo y Barbazán, 2012). Cumple funciones vitales en la planta formando parte de moléculas orgánicas como clorofila, aminoácidos esenciales, proteínas, enzimas, hormonas, ATP, ADN y también es utilizado en distintos procesos metabólicos como la utilización de carbohidratos (De Battista, 2006).

Dentro de la planta el N es muy móvil, por lo que cuando existen deficiencias de N la planta determina la movilización del N desde los órganos más viejos a los más nuevos, evidenciándose el déficit primero en las hojas viejas. A su vez, a medida que el cultivo envejece, parte del N de las partes vegetativas se mueve hacia las semillas. Este proceso ocurre de forma independiente del suministro de N que el cultivo este recibiendo. Sin embargo, si el cultivo dispone de una adecuada cantidad de N en las últimas etapas de su

ciclo, la actividad fotosintética de la parte vegetativa tendrá una duración mayor, acumulándose más MS, por lo tanto, la concentración de N total de las hojas es mayor cuando la planta se encuentra en fase vegetativa que cuando pasa a la etapa de fructificación (Perdomo y Barbazán, 2012).

Según Dobermann y Fairhurst (2000) el N promueve el rápido crecimiento, incremento en el tamaño de planta, número de macollos y aumenta el tamaño de las hojas, incrementándose la fotosíntesis por unidad de área. Por otro lado, Williams (2010) encontró que el N promueve el incremento de la altura, el número de tallos, granos por panoja, y la concentración de proteínas en grano.

Los componentes de rendimiento tales como peso de mil granos y panojas por metro cuadrado se ven incrementados con la presencia de N. Según Dobermann y Fairhurst (2000), la relación entre N aplicado y el tamaño de la panoja es lineal. Por otro lado, Yoshida (1981) establece que el incremento del rendimiento se debe fundamentalmente al aumento en números de granos por superficie, ya que el peso de mil granos es poco afectado por el agregado de N.

La importancia de este nutriente en términos absolutos es mencionada por Deambrosi y Méndez (2007), quienes sostienen que para obtener rendimientos de arroz de 7 Mg ha^{-1} (menores a los conseguidos en la actualidad) los cultivos deben absorber 170 kg N ha^{-1} , aproximadamente.

Según Chebataroff (1998), no sería esperable encontrar respuesta en rendimiento al agregado de N en aquellas situaciones donde el contenido de MO en suelo sea mayor a 3%.

Según Gamarra, citado por Méndez y Deambrosi (2009), para lograr altos rendimientos, los cultivos requieren del nutriente en todo su ciclo, pero las mayores demandas del mismo comienzan de V6 extendiéndose hasta R3 (inicio de floración, según Counce et al., 2000). Williams (2010) demostró que el N se absorbe rápidamente durante la etapa vegetativa y más lentamente cuando la planta florece y madura. Según Yoshida (1981), en estudios controlados, si el fertilizante nitrogenado es aplicado temprano, es usado para producir más paja que grano y aquel agregado en etapas más tardías, es usado más para grano que para paja. La eficiencia productiva parcial para ambos, grano y paja, es más alta cuando el suministro de N es bajo. Este autor establece que la aplicación de N al primordio floral incrementa el número de espiguillas por panoja y por lo tanto se obtendrán panojas más grandes. Luego de ser absorbido, éste es almacenado en la lámina y vaina de las hojas hasta la etapa de floración, momento en el cual se transloca el 70-90 % del N almacenado en la planta a la formación de grano. El restante 10-30% se absorbe luego de la

floración (Mae, 1997). Las plantas absorben entre un 50-80% del N requerido del suelo, considerándose el resto de lo absorbido como aporte del fertilizante (Sharma y De Datta, 1985). Un cultivo de arroz absorbe más del 90% del nitrógeno total antes de que se alcance espigazón, sin embargo, para producciones que superen las 7 Mg ha⁻¹ se absorbe alrededor de un 30% durante el llenado de grano (Evans, 1983).

2.2 ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN N EN ARROZ

El sistema de producción de arroz en Uruguay con inundación permanente la mayor parte del ciclo del cultivo, es uno de los sistemas que provoca la menor eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado. Esto se debe a que gran proporción del N aplicado como fertilizante no llega a la planta. A nivel mundial se recupera un promedio de 35% (Cassman et al., 1993). Además de perderse debido a los procesos ya nombrados, una parte cercana al 25% es asimilada por el suelo (arcillas y microorganismos). El inundar los suelos provoca las mayores pérdidas de N, recuperándose menos de un 30% de lo aplicado en los casos de arroz de trasplante ya que implica pérdidas del suelo, volatilización y desnitrificación de un gran porcentaje de lo agregado (33% de lo aplicado se pierde solamente por este último proceso según Ladha, 2005). En Uruguay el manejo de la nutrición nitrogenada es bastante mas ajustado y la recuperación ronda un 40% debido a varios aspectos de la producción nacional como que la mayor parte de la producción se encuentra sobre suelos de textura pesada más capaces de retener N, bajas dosis promedio a nivel nacional con altos rendimientos, sistema productivo en base a rotaciones y, principalmente, debido a que las dosis de N se fraccionan, siendo una de ellas en seco, donde el aprovechamiento del fertilizante es mayor (Pittekow et al., 2016).

La recomendación más fundamental es usar fuentes amoniacales como la urea. Si bien el NH₄⁺ se puede perder por volatilización, también puede ser fijado por las arcillas, o inmovilizado por la materia orgánica. Las fuentes nítricas no deben ser aplicadas, pues, como ya se mencionó, el NO₃⁻ se pierde desnitrificado o lixiviado, siguiendo los movimientos del agua (Buresh et al., 2008).

2.2.1 Fertilización comercial a nivel mundial

El principal país productor de arroz en el mundo es China (ACA, 2014), en el cual la producción de arroz difiere mucho a la realizada en Uruguay, tanto en su sistema de producción como en su destino final de consumo.

Ji-yun Jin et al. (2002) reportan datos de fertilización nitrogenada de China, donde en promedio se agrega 196 kg de N ha⁻¹, dentro de un rango que va desde 152 kg en Sichuan, hasta 274 kg en Jiangsu, una de las provincias

con mayor desarrollo económico rural. Según Harrell y Sachuk (2009), en EEUU la mayoría de las variedades de arroz cultivadas demandan entre 135 y 202 kg de N ha⁻¹, para producir rendimientos económicamente aceptables con buena calidad molinera, dependiendo del tipo de suelo. En este mismo país, Bollich et al. (2000) divulgan datos de requerimientos de 79 a 185 kg ha⁻¹ de N, dependiendo de la variedad.

En cuanto al fraccionamiento de N, Peng et al. (2006) mencionan que éste es realizado en cuatro momentos durante el desarrollo del cultivo: unos días antes del trasplante, a V6, en R0 y en R3; en una proporción de 35%, 20%, 30% y 15% respectivamente. Una gran diferencia entre los sistemas de producción de China y Uruguay, radica en que el 56% del N en Uruguay es aplicado en seco, mientras que el 100% del N agregado en China se realiza con el cultivo inundado. Esto genera una menor eficiencia de utilización del fertilizante, ya que el agregado del N en agua disminuye su eficiencia de uso (Deambrosi y Méndez, 1995).

Al igual que en China, en EEUU el N es aplicado en forma fraccionada, aunque difiere en su momento y dosis de aplicación. Este es aplicado hasta tres veces durante el desarrollo del cultivo, aproximadamente 50 a 70% se aplica pre-inundación, 15 a 25% a elongación de los entrenudos y de 15 a 25%, 10 a 14 días después (Snyder y Slaton, 2002). Shipp (2005) reporta otro criterio de fertilización en donde el N se puede aplicar cuando los síntomas se presentan en el cultivo, o en cualquier momento hasta la diferenciación de la panícula (2 mm de panoja). Este mismo autor propone un agregado de 17 a 22 kg N ha⁻¹ previo a la siembra, para una buena implantación, evitando la aplicación con mayor anterioridad a 7 días pre-siembra.

En el sur de Estados Unidos, la mayor eficiencia del uso del N, se ha logrado mediante la aplicación de menos del 50% del N total inmediatamente antes de la inundación permanente, y el restante en el intervalo entre elongación de entrenudos y 10 días posterior (Wilson et al., 1998). Sin embargo trabajos realizados en Arkansas han demostrado que algunos cultivares pueden producir rendimientos comparables y a veces mayores, cuando se hace una única aplicación de N previo a la inundación permanente (Norman et al., 2003).

2.2.2 Fertilización comercial en Uruguay

La mayor atención en los últimos 20 años se centró en el manejo del N, este es sumamente complejo debido a la interacción que tiene con múltiples factores como: época de siembra, variedad, manejo del riego, condiciones climáticas y suelo.

La información publicada muestra que en un 78% de los casos se encontró respuesta significativa al agregado de N, mientras que en los restantes casos esta respuesta no fue tan clara, e incluso según Deambrosi et al. (2002) en casos particulares puede llegar a ser negativa. Esta disminución en el rendimiento, puede estar explicada por una mayor susceptibilidad del cultivo a las bajas temperaturas en su etapa crítica, la cual es generada por la alta fertilización nitrogenada (Amano, citado por Nakamura et al., 1999). Esto demuestra la variada respuesta del cultivo de arroz al agregado de éste nutriente.

El agregado del fertilizante N de forma fraccionada en S0 (siembra, según Counce et al., 2000), V6 y luego de R0 trae mejoras en el rendimiento, en relación a una dosis única a siembra (Deambrosi y Méndez 1998, Deambrosi et al. 2010b). Esto podría deberse a que el N basal no es capaz de cubrir los requerimientos durante todo el ciclo del cultivo. El N agregado en siembra tiene efectos hasta V6, medido como N en planta, no así hasta R0. Es por esto que en ensayos dirigidos a la fertilización a R0 se vio que su efecto puede ser de significancia para el aumento de los rendimientos (Deambrosi y Méndez, 1993a).

En ensayos de respuesta a la aplicación de N a V6 interaccionando con el riego, se observó que con la aplicación de N en seco con posterior inundación, el cultivo absorbió más N que el tratamiento donde la fertilización N fue realizada en agua (Deambrosi y Méndez, 1995). De la mano de esto, se midió el tiempo óptimo necesario luego de la aplicación de la cobertura nitrogenada para realizar el riego. Estos trabajos mostraron que el tratamiento que se inundó al día siguiente de la fertilización obtuvo mejores resultados que los tratamientos con inundación retrasada, medidos en términos de N absorbido y producción de MS (Deambrosi y Méndez, 2010a).

Como puede apreciarse, el enfoque de la investigación priorizó la generación de información respecto al momento, fraccionamiento y a diferentes dosis de fertilizante nitrogenado, frente a conocer parámetros que dieran una orientación objetiva en cuanto al manejo de este nutriente.

Aunque el cultivo de arroz en el Uruguay es realizado en ambientes edáficos muy distintos, la fertilización utilizada por los productores es prácticamente la misma y esta ha permanecido incambiada al menos en los últimos 25 años.

La evolución del manejo de nutrientes en arroz ha determinado cambios en años recientes. Hasta el 2012-2013, en términos generales, a la siembra eran agregados $48\text{-}50\text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ ha}^{-1}$, de $12\text{ a }18\text{ kg N ha}^{-1}$ y $31\text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$. En el caso de las coberturas de N, estas son a V6 (previo a la inundación del cultivo)

y a R0, con 25 kg de N ha⁻¹ en cada uno de estos dos estadios. Un porcentaje menor de los productores aplicaba una única cobertura, pudiendo ser a V6, en R0 o intermedio a estos dos momentos, con cantidades entorno a los 35 – 49 kg de N ha⁻¹ (Ricchetto et al., 2013).

En la zafra 2012-2013 comenzaron a haber cambios en el manejo de nutrientes que determinó que se disminuyeran las cantidades de P₂O₅ y las de N en fertilización basal (10 kg ha⁻¹ menos cada una) y aumentar las de K₂O (10 kg K₂O ha⁻¹ más) que no son utilizadas siempre por cuestiones de precio. En el caso de las coberturas nitrogenadas se pasó de utilizar alrededor de 40 kg ha⁻¹ hasta 60 – 70 kg ha⁻¹, lo que da un total utilizado alrededor de los 80 kg ha⁻¹ promedio a nivel nacional (Molina et al. 2013, Ricchetto y Zorrilla 2014, Ricchetto y Zorrilla 2015, Pereira y Zorrilla 2016, Pereira et al. 2017, Castillo¹).

2.2.3 Fertilización basada en criterios objetivos

La búsqueda en el desarrollo de criterios objetivos de fertilización para arroz, sobre todo para cultivos de alto rendimiento como el de Uruguay, es indispensable para poder implementar prácticas que aumenten la eficiencia de uso de fertilizante, minimizando pérdidas y costos. Indicadores de N, niveles críticos, mejoras de método y momento, fuentes, inhibidores de ureasa, son solo algunos de los caminos de mejora para poder mejorar la sincronización entre la demanda y el aporte de N para el cultivo (Bijay-Singh y Singh, 2017).

Para poder aumentar la eficiencia de uso del nitrógeno es necesario saber la cantidad óptima para aplicar en la fertilización. Esta cantidad supone cubrir el déficit del sistema. Para conocer esta cantidad es necesario conocer el aporte del suelo. Las fertilizaciones según indicadores del suelo han probado mejorar en un 30 a 40% la eficiencia de uso del fertilizante, y un 7% el rendimiento a nivel mundial (Bijay-Singh y Singh, 2017).

Otra manera de conocer las dosis a aplicar es a partir de la planta. El método más ampliamente difundido es el análisis de concentraciones del nutriente (también se usan criterios con síntomas de deficiencia, pero para cuando se realiza la aplicación suele ser tarde). Generalmente los datos obtenidos por este método basan el criterio de fertilización en concentraciones críticas. En Uruguay se utilizan niveles críticos para trigo (4.5%) y cebada (3%) ambos a Z-30 con recomendación de dosis (final de macollaje según escala Zadocks). El problema con estas concentraciones es que varían con el ciclo del cultivo y en el caso de los cultivos anuales el tiempo que consume realizar el

¹ Castillo, J. 2018. Fertilización en arroz. In: Curso de Producción de Arroz (2018, Cerro Largo). Diapositivas. (sin publicar).

muestreo puede retrasar las aplicaciones, haciéndolas poco eficientes (Seminario-Taller Análisis de Planta, 2014)

El fraccionamiento de dosis, los momentos y los tiempos entre aplicaciones pueden variar ampliamente según la región, pero el objetivo principal es evitar las pérdidas de nitrógeno al realizar una sola dosis y sincronizar los aportes del fertilizante con las necesidades del cultivo.

La investigación nacional ha logrado que los productores dividan la dosis de N, aportando entre ambas aplicaciones 50-60kg N/ha, sin saber bien que criterio se toma para decidir la dosis total ni el fraccionamiento. Debido a que este sistema arrocero presenta una alta variabilidad en tipo de suelos, y rotaciones (con pasturas o diferente grado de intensidad de arroz continuo) (Palmer, 2012) y esta dosis no es la adecuada para todos los casos. El objetivo de estudio de los últimos años ha sido buscar indicadores asociados al rendimiento y la determinación de sus niveles críticos, que permitan realizar una fertilización nitrogenada óptima (Marchesi et al., 2014). Por el momento el indicador que más ajuste tuvo fue el de potencial de mineralización de N (PMN) para el primer momento de aplicación ($R^2=0,65$, Castillo, 2015). Para el momento de primordio, como ya fue mencionado, no se ha conseguido encontrar un indicador seguro y robusto.

2.2.3.1 Criterios basados en instrumental (LCC, SPAD, Green Seeker)

Como los análisis en laboratorio (con planta secada y molida) son costosos y acaparan demasiado trabajo y tiempo, se ha impulsado el desarrollo de herramientas no invasivas que obtengan un dato objetivo en tiempo real. Sin embargo, los valores de análisis de planta son extremadamente valiosos ya que contienen en sí mismos toda la variabilidad de suelo, clima, manejo, planta y disponibilidad de nutriente, haciendo de este un valor más certero (Bijay-Singh y Singh, 2017).

Durante mucho tiempo e incluso hoy en ciertos casos, se recurre a una apreciación visual del color verde del cultivo para determinar su estado nutricional, y así determinar subjetivamente las dosis a aplicar. El desarrollo de instrumentos que puedan medir objetivamente la calidad de luz que refleja el cultivo para determinar su status es fundamental para aumentar la precisión en la dosis a aplicar. Esto, claramente, bajo la premisa de que las lecturas de estos instrumentos se relacionan directamente con la concentración de N en la planta, y esta última con la dosis de N a aplicar (Pocojeksi et al., 2013). Esta premisa es apoyada por varios estudios que afirman que la actividad fotosintética de las plantas está determinada por el contenido y la actividad de la clorofila. Se ha comprobado que existe una relación entre el contenido de nitrógeno y clorofila foliar en el cultivo de maíz y trigo (Goaverts et al., 2010).

El contenido de clorofila de las hojas en arroz representa la actividad fotosintética de la planta, la capacidad de producir asimilados para generar rendimiento. Estos niveles se pueden medir directamente con los medidores de clorofila como el soil-plant analysis development (SPAD), o indirectamente con una carta de colores (leaf color chart: LCC), o el NDVI (normalized difference vegetation index, utilizando un GreenSeekerTM). Los tres instrumentos han demostrado respuestas ante distintas concentraciones de nitrógeno en planta y cambios significativos en sus valores frente a distintas dosis nitrogenadas (Pocojeksi et al., 2013).

El SPAD es un instrumento que mide la cantidad de clorofila asociándola con un cierto nivel de color verde, que evidencia el status nutricional de la planta. La mayoría de las pruebas a nivel internacional evidencian un aumento en la eficiencia de uso del fertilizante utilizando este indicador, en comparación con las dosis aplicadas por el productor. La dificultad yace en determinar el valor crítico para cada ambiente y variedad. Este crítico corresponde al 90% de la intensidad en un testigo de referencia sobre el fertilizado (Bijay-Singh et al., 2006). En este sentido tiene la capacidad de ser calibrado para cada suelo, clima, e incluso año.

Los cultivos refractan la luz incidente en el rango de infrarrojo cercano ($\lambda=700-1300$ nm) y del rojo visible ($\lambda=550-700$, Kumar y Silva, 1973), absorbiendo la porción azul y roja, refractando la porción verde del espectro visible de luz. El NDVI logra predecir la actividad fotosintética de la planta ya que este índice de vegetación incluye tanto el rango del rojo como del infrarrojo cercano. El NDVI se calcula a través de las mediciones de reflectancia de estos rangos espectrales de la siguiente manera:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$$

donde R_{NIR} es la reflectancia del infrarrojo y R_{Red} la del rojo (Goaverts et. al., 2010). Este valor se obtiene con el “GreenSeekerTM” (Green = verde y Seeker = buscador), un instrumento que con una medida rápida y a campo arroja el valor del NDVI. Al ser un valor normalizado, éste varía entre 1 y -1, siendo valores de plantas en buen estado de alrededor de 0,7 o 0,8, el suelo produce un valor cercano al 0,2, mientras que el agua produce valores cercanos al 0, y el hielo a -1 (Gutiérrez-Soto et al., 2011). Estos son aspectos a tener en cuenta con las mediciones dado que un cultivo ralo puede dejar al descubierto el suelo o el agua y así modificar la lectura. El NDVI ha sido asociado con múltiples variables del cultivo como nutrientes, rendimiento y MS.

LCC son cartas de color de hoja, y consisten en un panel plástico con tonos de verde que representan los distintos contenidos de N dentro de la planta. A diferencia del SPAD que mide absorción de luz, LCC mide el “nivel de

verde” según lo reflejado en comparación con la cartilla. Hay dos maneras de usar LCC, siendo la primera un acercamiento a tiempo real mediante la cual, a partir de un cierto valor de LCC en cualquier momento del cultivo, se fertiliza con una dosis específica. La segunda ofrece una recomendación del total de N requerido por el cultivo y los tiempos en los cuales realizar las aplicaciones según la etapa del cultivo, estación, variedad y tipo de siembra (Witt et al. 2005, Fairhurst et al. 2007). Además, existen modelos para manejo sanitario basándose en la LCC, lo que permite un manejo más integral. Generalmente la cartilla se utiliza en etapas críticas del cultivo para decidir si aumentar o disminuir la dosis fija (Islam, 2007).

Cuando se varían las variedades, el medidor de clorofila sigue siendo confiable mientras LCC pierde fiabilidad (Bijay-Singh y Singh, 2017). El principal problema del SPAD es que sigue consumiendo demasiado tiempo y recursos para realizarse (Yuxin et al., 2009). A pesar de todo, Ali (2014) probó la capacidad de estos tres instrumentos de predecir el rendimiento, determinando que si bien NDVI y SPAD eran capaces de predecirlo, las predicciones realizadas en base a las medidas del LCC eran poco fiables. Mas tarde se postuló un modelo de respuesta a la fertilización nitrogenada con NDVI (Ali, 2015).

2.2.3.2 Curvas de dilución de N cultivos y forrajeras

Varios estudios han indicado que la concentración de N decrece durante el ciclo de crecimiento para casi cualquier planta, desde gramíneas forrajeras (Salette y Lemaire, 1981) hasta cultivos en general (Greenwood, 1990), incluso las leguminosas, que obtienen el N mediante vía atmosférica (Lemaire, 1985), trigo (Justes, 1994) y hasta casos locales recientemente como la carinata (Ferreira y Ernst, 2014).

Esta disminución de la concentración de N en la planta se da en la biomasa aérea de acuerdo con la ecuación general:

$$N=aMS^{-b}$$

donde MS es la materia seca aérea acumulada expresada en t ha⁻¹ y N es la concentración de N de la biomasa aérea expresada en % de la materia seca.

Dentro de la planta, se asume que el N se encuentra en dos grandes pools: el metabólico, asociado con la fotosíntesis y procesos de crecimiento, y el N estructural correspondiente al N de reserva y estructuras (Greenwood et al., 1991).

La dilución del N se da debido a dos procesos: senescencia de hojas (Lemaire et al., 1991) y el cambio en la relación tallo/hoja durante el desarrollo del cultivo, donde la concentración de N en los tejidos del tallo son menores que los de la hoja (Lemaire et al., 1985, 1992). Además, la proporción de elementos constituyentes de la pared celular (celulosa, lignina) aumentan conforme se avanza en el ciclo del cultivo, mientras que la proteína disminuye (Lemaire et al., 1992). Sin embargo, esto se cumple para un aporte sostenido de N durante todo el ciclo por parte del suelo, pero cuando las fertilizaciones entran en juego (más aún cuando se trata de cultivos anuales), la respuesta se vuelve irregular debido a las altas dosis y tasas de crecimiento (Justes, 1994).

Si bien se han determinado curvas de dilución para varias especies, las curvas de dilución críticas de nitrógeno suelen tener variables importantes a tener en cuenta. Uno de los factores que afectan la determinación de la curva es el metabolismo: las curvas de las especies C_3 suelen ser similares entre si y diferentes a las especies C_4 (Justes, 1994). Otro factor que afecta es el de la especie, por eso mismo se determinan las curvas individuales para distintas especies, mas allá de que haya una curva generalizada. El clima es otra determinante de la curva de dilución, especialmente en el arroz. Sheehy (1998) determinó curvas de dilución crítica para el ideotipo indica en las zonas de Indonesia y Australia, como dos ejemplos de zonas con climas distintos (cálido y templado respectivamente). Ata-Ul-Karim (2013) determinó que las curvas propuestas no eran apropiadas para el ideotipo japónica en el área circundante al río Yangtze. Shanyu² estudió estas curvas y encontró que no se aplicaban para el noreste de China, generando una nueva curva para el ideotipo japónica. Estas diferencias parecen indicar que los ideotipos inciden en la determinación de la curva, así como el clima. Además, es probable que las curvas críticas determinadas por máximo rendimiento y las determinadas por máximo crecimiento vegetativo sean similares para un mismo cultivar, pero difieran entre cultivares (Hay, citado por Sheehy, 1998).

Varios autores encontraron que el modelo se aplica para acumulaciones de biomasa aérea por encima de 1 Mg ha^{-1} (Sheehy, 1998) o $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Justes, 1994). La curva de dilución crítica de nitrógeno fue definida originalmente para la biomasa aérea vegetativa, por lo que Sheehy (1998) sugiere evitar la utilización de los datos del periodo reproductivo. También se ha reportado que las hojas representan mejor el estado nutricional de la planta, dependiendo de la edad, la especie y el elemento que se trate. Para elementos no móviles, las hojas jóvenes son mejor referencia, mientras que para N, las

² Shanyu, H.s.f. Critical Nitrogen Dilution Curve for Rice Nitrogen Status Diagnosis in Northeast China (en prensa).

hojas adultas son las que mejor indican el estado nutricional (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Si bien trabajos previos en curvas críticas de dilución como los de Salette y Lemaire (1981), Greenwood (1990), Justes (1994), y otros ya nombrados, comparan sus resultados con los de otros trabajos hechos en otras especies, al día de hoy se cuenta con suficiente información como para poder realizar la comparación de los resultados con las curvas generadas para arroz, lo que parecería más pertinente. Las curvas varían con el lugar y el ideotipo, por lo que para cada ideotipo puede existir más de una curva. Además, ciertos estudios sugieren que las curvas también se pueden formular con distintos órganos de la planta como la hoja y el tallo, siendo más confiables los datos generados con la MS del total de la planta (Ata-UI-Karim et al., 2016). Dado que los datos de este trabajo son exclusivamente de biomasa aérea total, solo se utilizarán las respectivas curvas, por lo que el objetivo es comparar a cada ideotipo con las curvas ya existentes de arroz basadas en biomasa aérea total.

2.2.3.3 INN

Una vez determinados los valores de concentración de nitrógeno crítico a partir de los cuales no se limita el crecimiento, se puede realizar una relación entre el valor de nitrógeno crítico y el valor de nitrógeno actual de la planta para evaluar el status nutricional relativo:

$$NNI = N_a / N_c$$

Siendo N_a la concentración de nitrógeno actual y N_c el valor crítico de referencia para esa biomasa determinada, donde un valor de 1 sería suficiente para no limitar el crecimiento, un valor superior a 1 implicaría un consumo de lujo, y un valor menor a 1 evidenciaría deficiencia (Lemaire, 2008).

Esta técnica fue elaborada para utilizarse como un método de diagnóstico rápido a campo, lo que implicaría métodos más ágiles para determinar la concentración de nitrógeno en planta (como NDVI, SPAD, etc). A partir de este valor se pretende poder realizar recomendaciones de manejo nutricional nitrogenado por ser un parámetro sencillo y estandarizado (Lemaire, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN

El ensayo fue instalado en la zafra 2016/17, en la Unidad Experimental Paso de la Laguna de INIA Treinta y Tres. La misma está ubicada a 28 km de la ciudad de Treinta y Tres, dirección Este, a una altitud de 25 m sobre el nivel del mar, siendo sus coordenadas geográficas: 33° 14', 54° 22'.

3.1.1 Suelos

El suelo sobre el cual se condujo el ensayo corresponde a un Planosol Subéutrico, perteneciente a la Unidad “La Charqueada” (MAP. DSF, 1979).

3.1.2 Clima

La información climática corresponde a la estación meteorológica instalada en la Unidad Experimental Paso de la Laguna.

En las siguientes gráficas se presenta el comportamiento de las variables climáticas: heliofanía, radiación, precipitación, temperatura media de la zafra 2016/17, y registros promedios de la serie histórica, comprendida entre los años 1973 al 2017.

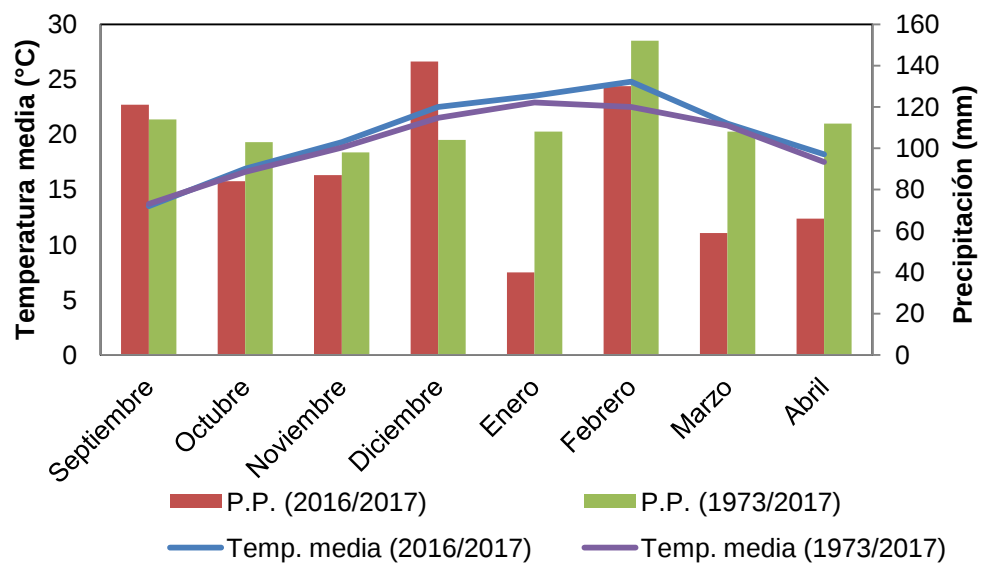


Figura 1. Evolución de la precipitación (mm) y temperatura media (°C) durante la zafra en estudio (2016-17) y en la serie histórica (1973-2017) para los meses desde septiembre a abril.

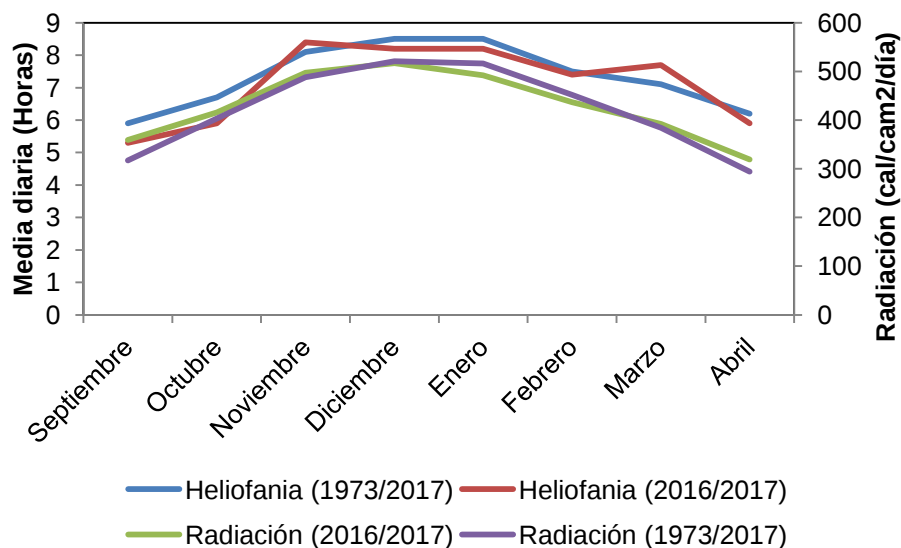


Figura 2. Evolución de la heliofanía (hs. sol día⁻¹) y la radiación (cal/cm²/día) durante la zafra en estudio (2016-17) y en la serie histórica (1973-2017) para los meses desde septiembre a abril.

Climáticamente, la zafra en cuestión fue favorable lo que se tradujo en un buen año agrícola. En términos generales, se contó con buenas condiciones climáticas a lo largo del cultivo que permitieron generar un buen potencial de crecimiento (etapas tempranas) siendo posible concretarlo posteriormente debido a las condiciones climáticas reinantes en el último período del cultivo. Las condiciones de humedad (debido a las buenas lluvias de Septiembre como se ve en la figura 1) y temperatura del suelo existentes a inicios de zafra permitieron realizar la siembra en las fechas recomendadas por protocolo (primeros días de octubre). Estas condiciones óptimas permitieron lograr una muy buena implantación del cultivo. El macollaje se vio favorecido por las temperaturas medias mayores a las requeridas por el cultivo (16 °C según Yoshida, 1981). Al igual que al macollaje, las condiciones climáticas favorecieron la etapa de primordio y floración, en este período las temperaturas medias oscilaron entre los 20 a 25 °C (fin de diciembre, principios de enero). De todos modos, las horas de sol día⁻¹ (figura 2) no superaron la media histórica, generando condiciones lo suficientemente buenas durante el período crítico del cultivo (últimos días de diciembre, enero). Contrario a las buenas condiciones descritas anteriormente, el período de llenado de grano ocurrió con precipitaciones abundantes aunque por debajo de las medias históricas, lo que evidencio una baja en la radiación en el período de llenado de grano (febrero). Este hecho no alteró el alto potencial de rendimiento concretado hasta el

momento, ya que no ocurrió durante el período crítico el cual es en torno a 20 días a R3 (Diekmann et al., 1993).

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizaron dos experimentos por separado, cada uno de ellos con una variedad diferente.

En cada experimento fue utilizado un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con 3 repeticiones.

La parcela grande correspondió a la dosis de N aplicada a macollaje (N_{mac}) mientras que la parcela menor estuvo asociada a la dosis de N aplicada a primordio (N_{prim}). En cada estadio fisiológico se utilizó la misma dosis de N, equivalentes a 0-25-50-100 kg ha⁻¹ (tratamientos 0N, 25N, 50N y 100N respectivamente para cada momento) estando todos los tratamientos aleatorizados. Esto genera 16 combinaciones por medio de la interacción de tratamientos (cuatro dosis a macollaje y cuatro a primordio). Las dimensiones de la unidad experimental fueron de 10 m x 3 m.

El experimento evaluó las distintas combinaciones de las dosis de su respuesta en acumulación de MS y su interacción con la variedad. Se eligieron las variedades INIA Merín y Parao como representativos de los dos ideotipos utilizados en Uruguay, indica y japónica, respectivamente.

INIA Merín es un cultivar que fue lanzado en el año 2015 destacado por alta productividad, calidad molinera y resistencia al brusone. Este cultivar supera en un 5% los rendimientos de las variedades índicas ya existentes a nivel comercial como El Paso 144 e INIA Olimar. Es de macollaje abundante, erecto y compacto, y con resistencia al vuelco. Cuenta con una alta respuesta a la fertilización nitrogenada asociada al mantenimiento de un IAF a floración no demasiado elevado (6.5-7), y alta sanidad. Tiene una duración de ciclo de siembra a 50% de floración de 111 días. Este cultivar expresa su potencial productivo en siembras tempranas en la región este, teniendo su mayor productividad en la región norte y centro-norte del país (Blanco et al., 2013)

Parao es un cultivar de calidad americana (igual que INIA Tacuarí) que presenta excelente potencial de rendimiento, buena calidad molinera, resistencia a brusone y a bajas temperaturas, así como tolerancia a retrasos de la cosecha. Su rendimiento es 8% superior a INIA Tacuarí, con una calidad molinera un poco menor, pero sin problemas de calidad industrial por retraso de cosecha. Tiene una duración de ciclo de siembra a 50% de floración de 108 días (Pérez de Vida et al., 2016).

3.3 MANEJO DEL EXPERIMENTO

Para la preparación de la sementera, se realizó un laboreo mínimo sobre un laboreo de verano previo. Se sembró el 18 de octubre de 2016 en condiciones de buena humedad y lluvias al día siguiente, con una fertilización basal de 100 Kg ha⁻¹ de 9-25/25-25+3S a máquina. La densidad de siembra se ajustó en base a una población objetivo de 250 plantas m²-1 a una distancia de 17cm entre hilera (Gamarra, 1996), utilizándose semilla curada con tebuconazol y thiametoxam a razón de 100 cc/100kg de semilla.

El control de malezas fue realizado en dos etapas. El primero se realizó con la aplicación pre emergente de glifosato 3lt/ha + clomazone 0,7 lt/ha. El segundo se realizó durante el cultivo se realizó otro control con herbicida post emergente, 24/11/16: 3,5 lt/ha propanil + 2 lt/ha quinclorac + 50 gr/ha pirazosulfuron-etil.

Las prácticas de fertilizaciones y aplicaciones de los distintos tratamientos se realizaron a mano en las fechas indicadas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Detalle del manejo de los cultivos en el experimento

Tarea	Fecha	
	Merin	Parao
Laboreo	7/10/2016	7/10/2016
Fertilización basal	11/10/2016	12/10/2016
Aplicación preemergente	12/10/2016	12/10/2016
Siembra	18/10/2016	18/10/2016
Aplicación postemergente	24/11/2016	24/11/2016
Fertilización a macollaje	30/11/2016	30/11/2016
Inundacion	1/12/2016	1/12/2016
Fertilización a primordio	3/1/2017	11/1/2017
Muestreos	15DAP	22/12/2017
	Primorio	2/1/2017
	15DDP	24/1/2017
	30DDP	10/2/2017
	50DDP	-
	Cosecha	12/4/2017
Cosecha	12/4/2017	12/4/2017

Los momentos descritos en el cuadro 1 corresponden a 15 días antes de primordio (15 DAP), primordio (P), 15 días después de primordio (15 DDP), 30 días después de primordio (30 DDP) y 50 días después de primordio (50 DDP).

3.4 DETERMINACIONES Y REGISTROS

3.4.1 Determinación de población lograda

Quince días después de la siembra (DDS), al momento de estabilización de la emergencia del cultivo, fueron realizados conteos de plantas para determinar población lograda. Para esto se contabilizó cuatro zonas en cada parcela, siendo cada submuestra de 1 m lineal.

3.4.2 Determinación de la acumulación de M.S

En total se tomaron 480 muestras entre las dos variedades, 264 de INIA Merín y 216 de Parao.

Los muestreos de planta fueron realizados Cada 15 días aproximadamente (según las condiciones lo permitiesen) mediante corte a ras de suelo de dos submuestras de 0,5 m tomadas en el frente y fondo de la parcela en hileras del cultivo opuestas sobre la 3ra línea contando desde afuera. Las fueron inmediatamente enjuagadas y guardadas en bolsas de nylon por no más de una semana en heladera a 5°C hasta su procesamiento en el laboratorio, el cual consistió en enjuagarlas con agua potable y lavarlas con agua destilada. Una vez limpias, se pesaron y se colocaron en cajas de aluminio con poros en la cara inferior ingresándolas en estufas de flujo vertical a 60°C durante 48 hs. Una vez secas, se determinó el peso seco, se molieron en un molinillo estático pasando por una malla de 2 mm y se guardaron en bolsas de nylon. El mismo procedimiento fue realizado para el muestreo final siendo separado el grano de la paja.

Para los muestreos realizados a primordio como 15 días antes de primordio (15 DAP) se juntaron las muestras de las sub parcelas, ya que todas compartían el mismo tratamiento hasta ese momento, lo que generó 12 muestras en total. A partir de ese momento se comenzaron a tomar las muestras individualmente en cada parcela.

3.4.3 Determinación de N en planta

En cada momento de determinación de MS fue realizada también la determinación de N. Para esto, se guardó una parte de la muestra molida en un sobre de papel con identificación y se envió al Laboratorio de suelo, planta y agua de INIA La Estanzuela para hacer el análisis de la concentración de N en

planta. En el caso del momento de cosecha se tomaron por separado el grano y la paja.

En la etapa vegetativa los análisis de N fueron determinados por la técnica de NIRS previa calibración con la técnica de Kjeldhal ($p < 0,0001$; $R^2 0,99$).

3.4.4 Componentes del rendimiento

Previo de la cosecha se extrajeron dos muestras de 0,5 m lineales de panojas por parcelas. Con estas se estimó el número de panojas por metro cuadrado. De cada muestra fueron extraídas aleatoriamente 15 panojas las cuales se trillaron manualmente para estimar el número de granos por panoja. Estos granos fueron pasados por una máquina de viento, la cual clasificó a los granos como: llenos, medios llenos y estériles. Con estos datos se pudo determinar los granos totales por panoja, número de granos enteros, medio grano y vano. A partir de los granos enteros, se obtuvo el peso de mil granos (PMG).

3.4.5 Rendimiento

La cosecha fue realizada previo desborde de 1 m de cabecera y 1 m de fondo y de 3 líneas de cultivo hacia ambos lados de la parcela. Se logró un área efectiva de cosecha de $16,3 \text{ m}^2$ por parcela. Posteriormente se trilló con una trilladora estacional y obteniendo el rendimiento húmedo (kg ha^{-1}). El grano se limpió con zaranda y ventilador, siendo secado hasta 13% de humedad. El rendimiento seco y limpio se corrigió por el rendimiento molinero, obteniendo así el rendimiento sano, seco y limpio. Esta determinación permitió calcular el Índice de Cosecha de la siguiente manera:

$$\text{IC} = \text{MS grano} / (\text{MS grano} + \text{MS paja})$$

3.5 CURVAS UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN

3.5.1 Curvas de dilución en ideotipo indica

Como ejemplo de curvas generadas para ideotipo indica se encuentran las utilizadas por Sheehy (1998) para la generación de sus datos: Filipinas (clima tropical) y China en la provincia de Yunnan (clima sub-tropical). Sheehy también generó su propia curva que dice ser general para todo arroz en los trópicos utilizando 3 variedades y sitios: IR72 en las Filipinas (indica), Shanyou utilizada en Yunnan, China (indica) y Amaroo utilizada en Yanco, Australia (japónica). Esta última curva resultó ser muy similar a la de Yunnan, por eso mismo no se utiliza para las comparaciones. Según Ata-Ul-Karim (2013) esta curva se adapta muy bien a las especies indicas pero no así a las japónicas.

Cuadro 2. Ecuaciones de curvas críticas de dilución de N en índicas.

Autor	Lugar	Ecuación
Sheehy (1998)	Filipinas	$4,19 * MgMS^{-0,39}$
Sheehy (1998)	Zona tropical	$5,18 * MgMS^{-0,52}$

3.5.2 Curvas de dilución en ideotipo japónica

Dentro de los datos utilizados por Sheehy (1998) existe una curva de un cultivar de ideotipo japónica en Yanco, Australia. Según Ata-Ul-Karim (2013) las curvas generadas por Sheehy (1998) no eran apropiadas para el ideotipo japónica. Por lo que generó una nueva curva para climas sub-tropicales específicamente para japónicas en las inmediaciones del río Yangtze. Otra curva para realizar la comparación es la generada por Shanyu² en el noreste de China, en la zona de Jiansanjiang de clima templado.

Cuadro 3. Ecuaciones de curvas críticas de dilución de N en japónicas

Autor	Lugar	Ecuación
Sheehy (1998)	Australia (Yanco)	$4,48 * MgMS^{-0,52}$
Ata-Ul-Karim (2013)	China (Jiangsu)	$3,53 * MgMS^{-0,28}$
Shanyu ²	China (Jiansanjiang)	$27,7 * KgMS^{-0,32}$

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las respuestas agronómicas fueron evaluadas para cada variedad por separado, ajustando modelos lineales generales mixtos donde los tratamientos de fertilización y sus interacciones fueron definidos como efectos fijos, mientras que el bloque fue definido como efecto aleatorio. Se utilizó el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2008) y para la comparación múltiple de medias se usó la prueba de LSD de Fisher al 5%, se testearon los supuestos del análisis de normalidad y homogeneidad de varianzas para no incluir valores que superaran tres veces la varianza.

3.6.1 Hipótesis planteadas

Para el planteo de la hipótesis se partió del supuesto que los tratamientos utilizados tendrán la capacidad de generar el punto de inflexión en la concentración de N a una MS fija necesario para definir el punto crítico expresado por Justes (1994).

3.6.1.1 Hipótesis agronómica

H₀= El comportamiento de la concentración crítica de N del arroz en Uruguay que permite alcanzar mayores acumulaciones de MS se ajusta a los modelos de las curvas publicadas internacionalmente.

H_A= El comportamiento de la concentración crítica de N del arroz en Uruguay no se ajusta a los modelos de las curvas publicadas internacionalmente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESPUESTA A FERTILIZACIÓN

4.1.1 Acumulación de materia seca en INIA Merín

Para todos los momentos de muestreo, el análisis de varianza detectó diferencias significativas según el tratamiento de fertilización a macollaje (N_{mac}) ($p < 0,05$), no detectándose esto para el momento de primordio floral (N_{prim}) ni para la interacción entre estos dos momentos (N_{mac}*N_{prim}). Para todos los momentos, la dosis 100N fue diferente al testigo absoluto, comportándose de forma intermedia los tratamientos 25N y 50N, excepto para 15 DAP. En este momento, el tratamiento 50N se comportó igual que 100 N. A los 50 DDP, el tratamiento de 100 N acumuló un 38 % y 19 % más de M.S que el testigo absoluto y las dosis intermedias respectivamente. Debido a que la MS se vio influenciada exclusivamente por la dosis a macollaje, se grafica la acumulación de la misma en base a sus dosis en la figura 3.

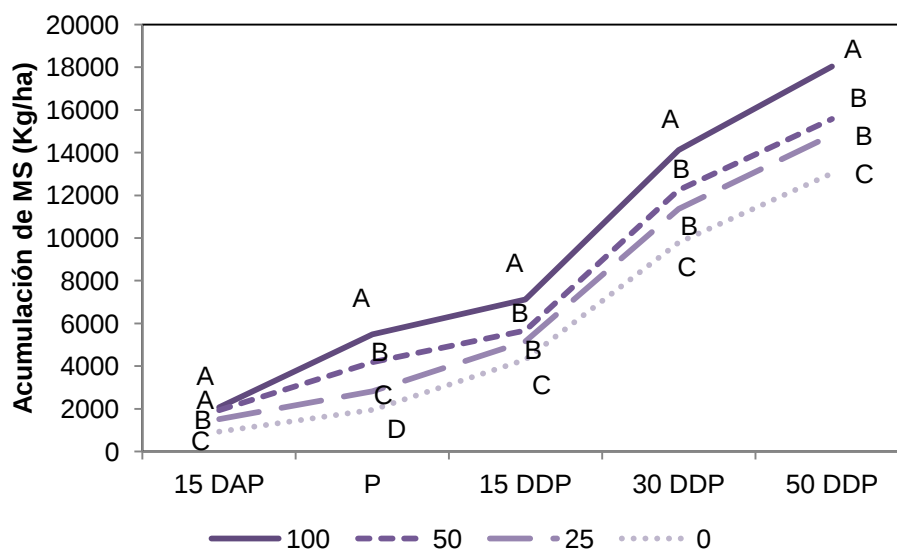


Figura 3. Acumulación de MS (kg ha^{-1}) de la variedad INIA Merín desde 15 días antes de primordio floral (15 DAP) hasta 50 días después de primordio floral (50 DDP) en función de la dosis de N.

Las acumulaciones de MS encontradas en esta variedad, fueron superiores a las reportadas por Lauz y Tarán (2014) y similares a Mesones y Pérez de Vida (2017) para 50 DDP. En las mismas se observa que con la MS acumulada a los 50 DDP, y basados en un índice de cosecha estable normal

para esta variedad, es esperable obtener altos rendimientos a excepción del testigo.

4.1.2 Acumulación de materia seca en Parao

Para todos los momentos de muestreo, el análisis de varianza detectó diferencias significativas según el tratamiento de fertilización a macollaje ($p < 0,05$). Estas diferencias no fueron detectadas para primordio ni para la interacción entre macollaje y primordio. Para todos los momentos, el tratamiento 100N fue diferente al testigo absoluto y de 25N, comportándose de forma intermedia el tratamiento de 50N.

Hasta primordio el tratamiento 50N generó menor MS que el de 100N pero a partir de primordio se comportó igual que este. Siendo que la MS se vio influenciada exclusivamente por la dosis a macollaje, se grafica la acumulación de la misma en base a sus dosis en la figura 4.

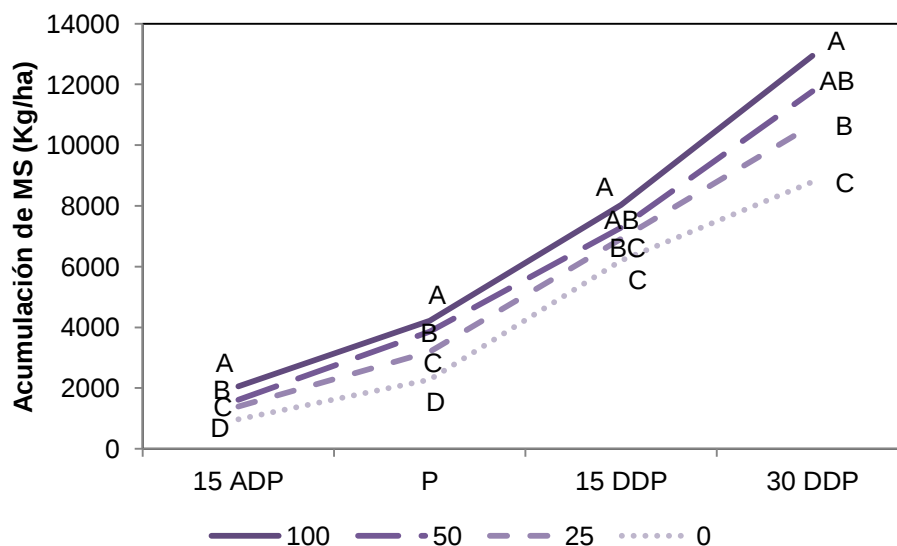


Figura 4. Acumulación de MS (kg ha^{-1}) de la variedad Parao desde 15 días antes de primordio floral (15 DAP) hasta 30 días después de primordio floral (30 DDP) en función de la dosis de N.

En promedio para las dosis de primordio, a los 30 DDP, el tratamiento de 100 N acumuló un 47% y 21% más de M.S que el testigo absoluto y la dosis intermedia de 25 kg ha^{-1} , respectivamente.

Las acumulaciones de MS encontradas a 30 DDP en esta variedad, fueron superiores a las reportadas por Lauz y Tarán (2014), Capurro et al. (2014) para los tratamientos fertilizados. Al igual que lo observado en Merín la

MS acumulada a los 30 DDP, y contando con un índice de cosecha estable, se podrían obtener altos rendimientos que superen el promedio nacional para todos los tratamientos a excepción del testigo.

4.1.4 Concentración de nitrógeno en INIA Merín

Para los momentos de muestreo previos a la fertilización de primordio, el análisis de varianza detectó diferencias significativas según el tratamiento de fertilización a macollaje ($p < 0,05$). Para los momentos posteriores, la dosis a primordio fue la que generó diferencias significativas, excepto para 15 DDP ($p = 0,0625$), donde la tendencia se mantuvo. No se detectaron diferencias significativas para la interacción entre macollaje y primordio.

Cuadro 4. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP, P y 50 DDP en INIA Merín según las dosis a macollaje (Nmac kg N ha⁻¹).

	N 15 DAP		N P		N 50 DDP	
Nmac	N (%)		N (%)		N (%)	
100	2,01	A	3,25	A	0,95	A
50	1,54	B	2,54	B	0,90	B
25	1,50	B	2,15	C	0,89	B
0	1,46	B	1,81	D	0,88	B
P-Valor	<0,0001		<0,0001		0,0068	

Cuadro 5. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP, 30 DDP y 50 DDP en INIA Merín según las dosis a primordio (Nmac kg N ha⁻¹).

	N 15 DDP		30 DDP		50 DDP	
Nprim	N (%)		N (%)		N (%)	
100	1,53	-	1,07	A	0,94	A
50	1,44	-	1,07	A	0,91	AB
25	1,42	-	1,03	AB	0,89	B
0	1,38	-	1,01	B	0,88	B
P-Valor	0,0625		0,0282		0,01	

En los cuadros 4 y 5 se aprecia como para todos los momentos, la dosis 100N fue diferente al testigo absoluto, tanto para los que la dosis a macollaje fue la que generó la diferencia, como para los que fue la de primordio.

Previo a la aplicación de los tratamientos a primordio la única fuente de variabilidad es la dosis a macollaje. A pesar de eso, en el último momento, la dosis a macollaje vuelve a cobrar importancia volviendo a ser significativa. Hay que contemplar de todos modos la magnitud de las concentraciones de nitrógeno que varían entre 0,88% a 0,95%. Esto indicaría que hacia el fin del ciclo la dosis suministrada a macollaje seguiría teniendo influencia sobre la concentración de N en la planta.

La separación de medias según las dosis a primordio generó un resultado similar a las de macollaje para este momento. Se generó una variación entre el testigo absoluto y el tratamiento de 100N también similar (entre 0,88% y 0,94%).

Probablemente para este último momento ya sea muy tarde para poder corregir cualquier deficiencia. El objetivo sería alcanzar el valor crítico establecido por las curvas para ese momento con el manejo previo. Este valor parece ser alcanzado sólo con las dosis más altas.

En esta variedad, en vez de sufrir un efecto de dilución como sería de esperar, se da un efecto de concentración. Posiblemente, el contar con pocos datos y de un solo año hizo que entre 15 DAP y P, se concentrasen los valores de %N, en vez de diluirse.

4.1.5 Concentración de nitrógeno en Parao

A diferencia de Merín, esta variedad presenta significancia para todos los momentos y su comportamiento es más acorde a la literatura. Para los momentos de muestreo previos a la fertilización de primordio, el análisis de varianza detectó diferencias significativas según el tratamiento de fertilización a macollaje ($p < 0,05$). Para los momentos posteriores, la dosis a primordio fue la que generó diferencias significativas ($p < 0,05$). No se detectaron diferencias significativas para la interacción entre macollaje y primordio.

Cuadro 6. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP, P y 30 DDP en Parao según las dosis a macollaje (N_{mac} kg N ha⁻¹).

N _{mac}	N 15 DAP N (%)		N P N (%)		N 30 DDP N (%)	
100	3,2	A	1,47	A	0,98	A
50	2,33	B	1,35	B	0,99	A
25	2,27	C	1,32	B	0,92	B
0	1,77	D	1,28	B	0,95	AB
P-Valor	<0,0001		0,0003		0,029	

Cuadro 7. Concentración de N (%) para los momentos 15 DAP y 30 DDP en Parao según las dosis a primordio (N_{mac} kg N ha⁻¹).

N _{prim}	N 15 DDP N (%)		30 DDP N (%)	
100	1,39	A	1,06	A
50	1,3	B	0,97	B
25	1,25	B	0,94	B
0	1,15	C	0,87	C
P-Valor	<0,0001		<0,0001	

En los cuadros 6 y 7 se evidencia que la dosis 100N fue diferente al testigo absoluto en todos los casos, excepto para el momento 30 DDP para las dosis a macollaje.

La dosis de macollaje es influyente en todos los momentos excepto para el momento más próximo a la fertilización de primordio. Esto indicaría que hacia el fin del ciclo la dosis suministrada a macollaje en este caso, también seguiría teniendo influencia sobre la concentración de N en la planta.

4.1.6 Rendimiento en grano

Para el parámetro de rendimiento de ambas variedades el análisis de varianza detectó diferencias significativas según el tratamiento de fertilización a

macollaje y a primordio ($p < 0,05$). No se detectaron diferencias significativas para la interacción entre macollaje y primordio.

En términos absolutos la variedad Parao tuvo un rendimiento menor y menos variable que INIA Merín. Los tratamientos de 100N fueron consistentemente mejores que los de 0N para cualquier momento en ambas variedades. Las dosis a macollaje fueron determinantes en el rendimiento alcanzado. Se puede ver que las dosis crecientes de N en este momento provocan rendimientos crecientes aunque no siempre significativamente. Para macollaje e tratamiento de 100N siempre fue distinto a 25N y 0N, y el de 50N siempre fue distinto de 0. El incremento en rendimiento con respecto a no fertilizar en macollaje fue de 21% para INIA Merín y 12% en Parao. Esto podría estar implicando que la dosis de fertilizante a macollaje tuvo más impacto en INIA Merín que en Parao.

En la variedad Parao, las dosis aplicadas en primordio de 25 kg N ha⁻¹ fueron tan efectivas como las de 100 kg N ha⁻¹ provocando un aumento del 11% en rendimiento en promedio. Para INIA Merín hubo respuesta a partir de los 50 kg N ha⁻¹, siendo indiferente entre 0 y 25 kg N ha⁻¹ implicando un incremento en rendimiento del 10%. Esto implicaría una mayor eficiencia del uso de fertilizante de la variedad Parao.

En el cuadro 8 se puede observar como las dosis a macollaje para el promedio de las de primordio fueron más influyentes que las dosis a primordio para el promedio de las de macollaje. Esto está dado por una diferenciación de medias mayor y en el caso de INIA Merín, por un mayor efecto de la dosis agregada en el rendimiento.

Los rendimientos obtenidos en Parao son similares a los reportados por Lauz y Tarán (2014) y superiores a los reportados por Blanco et al. (2011). Merín presentó rendimientos muy superiores a los reportados por Blanco et al. (2016), Mesones y Pérez de Vida (2017).

Para el índice de cosecha no se detectaron diferencias significativas, variando entre 0,55 y 0,65 para INIA Merín. En cambio, si bien hubieron diferencias significativas para la variedad Parao, estas oscilaron dentro de dos puntos porcentuales. Estos valores son similares a los detectados por Lauz y Tarán (2014).

Cuadro 8. Rendimiento (kg ha⁻¹) de INIA Merín y Parao según los tratamientos aplicados.

INIA Merín			Parao		
Rendimiento según Nmac					
Nmac	Rendimiento (kg/ha)		Nmac	Rendimiento (kg/ha)	
100	12909	A	100	11957	A
50	12541	AB	50	11681	AB
25	11840	B	25	11155	BC
0	10637	C	0	10685	C
P-Valor		<0,0001	P-Valor		0,007
Rendimiento según Nprim					
Nprim	Rendimiento (kg/ha)		Nprim	Rendimiento (kg/ha)	
100	12642	A	50	11898	A
50	12363	A	100	11599	A
0	11545	B	25	11458	A
25	11377	B	0	10522	B
P-Valor		0,0061	P-Valor		0,003

4.2 RELACIÓN ENTRE MATERIA SECA Y CONCENTRACIÓN DE N

La incidencia de las dosis de fertilizante varió según el momento y el parámetro de estudio. Cuando la única dosis que recibió el cultivo fue la de macollaje, ésta incidió fuertemente en la concentración de nitrógeno. Realizada la aplicación de primordio, la cobertura a macollaje perdió relevancia completamente y ésta última fue la que incidió significativamente en este parámetro. Para poder tener un ejemplo de todas las dosis se presenta el comportamiento de cuatro dosis crecientes de N fraccionadas mitad a macollaje y mitad a primordio las que exploraron el rango de fertilizante evaluado. No existió interacción en la respuesta encontrada entre la cobertura de macollaje y primordio. Los tratamientos elegidos entonces serían el de 0+0, 25+25, 50+50 y 100+100. De esta forma se tienen todas las dosis en todos los momentos.

4.2.1 Curvas de dilución de N en INIA Merín

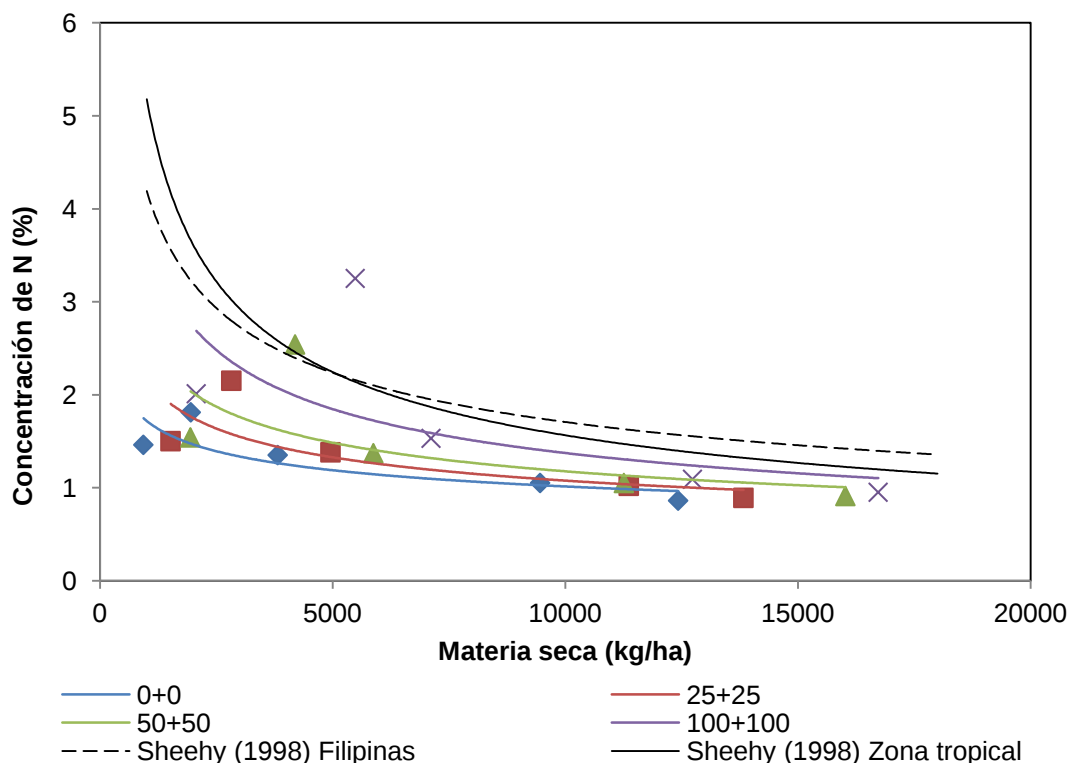


Figura 5. Comparación de curvas críticas de dilución de N reportadas internacionalmente y la curva de dilución de la variedad INIA Merín para los tratamientos 0+0, 25+25, 50+50 y 100+100.

La curva de dilución ajustada para la variedad INIA Merín en esta situación en particular no se comportó como las curvas publicadas. Esto implica que no se genera un ajuste de los parámetros de un modelo exponencial ($p < 0,05$). La MS varió de 931 kg ha^{-1} (testigo en el primer momento) hasta 18028 kg ha^{-1} (materia seca a 50 DDP del tratamiento 100+100).

Las concentraciones presentaron un máximo de un 3,25% (fertilización 100+100 en primordio) y un mínimo de 0,84% (testigo 50 DDP). Estos valores son muy inferiores a los presentados por las variedades índicas utilizadas por Sheehy (1998). Los registros se vuelven una asíntota en valores cercanos al 0.9% mientras que las curvas reportadas para ideotipos índicos superan el 1% hacia el final del ciclo. Todos los valores registrados se encuentran por debajo de los valores presentados por Sheehy para las variedades índicas en los trópicos, a excepción de los tratamientos 50+50 y 100+100 en primordio.

Como ya se mencionó, la MS tuvo diferencias significativas, y salvo para el primer momento, los tratamientos de 100N a macollaje fueron superiores al resto, por lo tanto sería posible que con una dosis mayor se puedan lograr mayores concentraciones de N y consecuentemente mayores acumulaciones de MS.

En cada momento muestreado hubo una relación lineal que separa los tratamientos tanto en MS como en N. Estas diferencias se mantuvieron hasta el último momento con diferencias significativas en los dos parámetros graficados, sugiriendo también que hay posibilidad de respuesta a mayores dosis.

4.2.2 Curvas de dilución de N en Parao

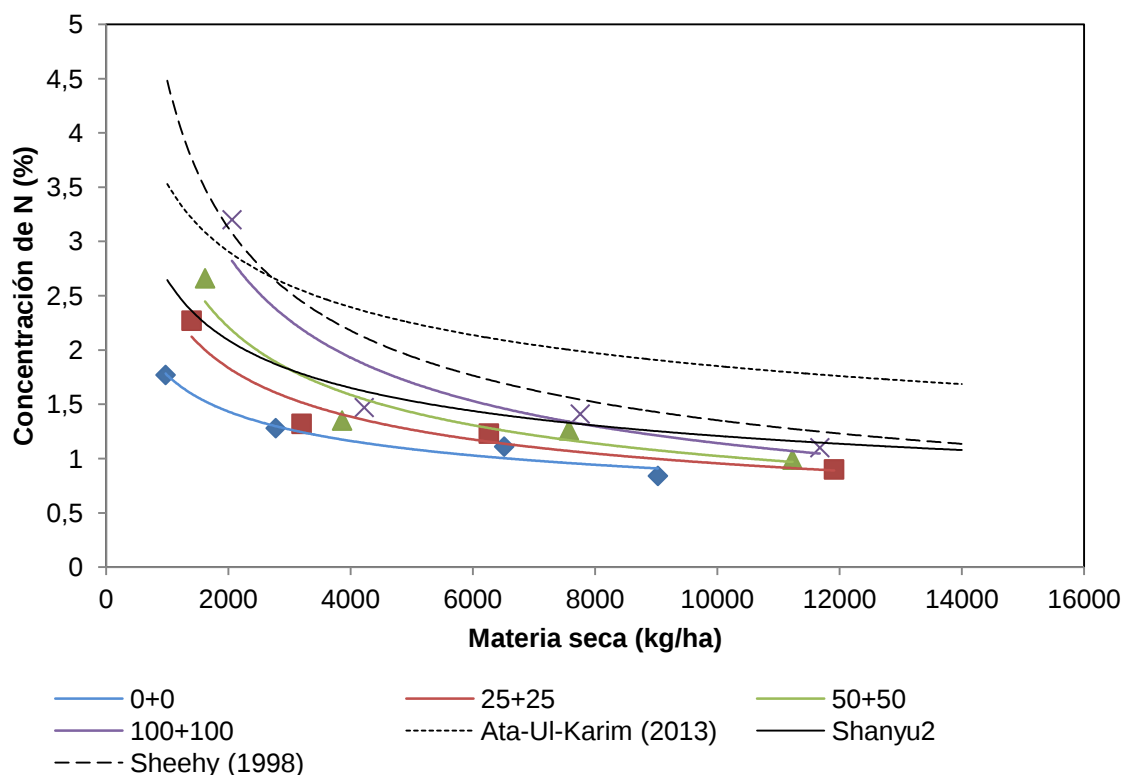


Figura 6. Comparación de curvas críticas de dilución de N reportadas internacionalmente, y la curva de dilución de la variedad Parao para los tratamientos 0+0, 25+25, 50+50 y 100+100.

En la figura 6 se puede ver como la variedad Parao mostró una dilución de N en la acumulación de MS que se asemeja a lo reportado por la literatura para este ideotipo. El comportamiento observado se ajustó ($p < 0,05$) a un modelo exponencial. Se puede observar también que las diferencias en MS

acumulada son importantes. Esta variedad tuvo una producción de MS que se encontró entre los 971 kg ha⁻¹ (testigo en el primer momento) y 11676 kg ha⁻¹ (MS a 30 DDP del tratamiento 100+100). Si bien parten del mismo mínimo, los valores finales son bastante inferiores a los de INIA Merín. De todos modos habría que considerar que si bien ambos muestreos tienen 11 días de diferencia se realizaron en distintos momentos del cultivo (30 DDP y 50 DDP)

Las concentraciones, fluctuaron desde un máximo de 3,2% (fertilización 100+100 en 15 DAP) y un mínimo fueron de 0,86% (fertilización testigo 30 DDP). Estos máximos son similares a los presentados por Ata-UI-Karim (2013) y Shanyu². Los mínimos son similares a lo expuesto por Shanyu² y a los de Australia pero no a los de Ata-UI-Karim (2013).

El comportamiento de esta variedad parece ser muy similar a la curva generada por Shanyu². Los tratamientos con mayor dosis de N elevaron la curva de dilución, aunque todos tendieron a tener la misma concentración hacia el final del ciclo, a excepción del testigo absoluto. Entre los tratamientos con agregado de N no hubo diferencias significativas en la acumulación de materia ni en la concentración de N. Esto podría estar indicando, al contrario del caso de INIA Merín, que con menos N se logró alcanzar un punto donde el agregado de N no provoca un aumento significativo en la concentración ni en la acumulación de MS, o sea, un plateau. Esto significaría que la capacidad productiva está limitada por la fosa y no por la fuente.

4.3 CURVAS DE DILUCIÓN Y RENDIMIENTO EN GRANO

Para estudiar la relación entre las curvas de dilución críticas de N y el rendimiento en grano alcanzado se comparó la dilución de N experimentada por los tratamientos que alcanzaron rendimientos en grano iguales o superiores al 95% del máximo rendimiento y se los comparó con las curvas reportadas. Para esto se utilizaron todos los tratamientos combinando las cuatro dosis de macollaje y las cuatro de primordio.

4.3.1 Curvas de dilución y rendimiento en grano para INIA Merín

Esta variedad respondió significativamente a los tratamientos de dosis de N ($p < 0,05$). Los tratamientos que generaron al menos el 95% del rendimiento máximo fueron 100+100, 100+50 y 50+50; siendo los tres estadísticamente iguales.

Cuadro 9. Rendimiento en grano alcanzado según el tratamiento para INIA Merín.

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)		RR Y0/Yn
100+100	14430	A	1,00
50+50	13643	AB	0,95
100+50	12968	ABC	0,90
50+100	12506	BCD	0,87
25+50	12316	BCD	0,85
100+25	12241	BCD	0,85
25+100	12213	BCD	0,85
50+25	12010	BCD	0,83
50+0	12006	BCD	0,83
100+0	11999	BCD	0,83
25+25	11571	CD	0,80
0+50	11493	CD	0,80
0+100	11421	DE	0,79
25+0	11260	DE	0,78
0+0	9947	EF	0,69
0+25	9683	F	0,67
P-Valor		0,0005	

En el cuadro 9 se puede observar que existió una correlación positiva entre el tratamiento y el rendimiento ($R^2=0.7$). En términos generales, dosis bajas generaron bajos rendimientos, y las altas generaron altos rendimientos. En este cuadro se puede apreciar un punto clave que es el efecto del fraccionamiento de la dosis. Una dosis de 100 kgN ha^{-1} es diferente cuando se aplicó un tratamiento de 50+50 en vez de 0+100, teniendo a 100+0 como un punto intermedio.

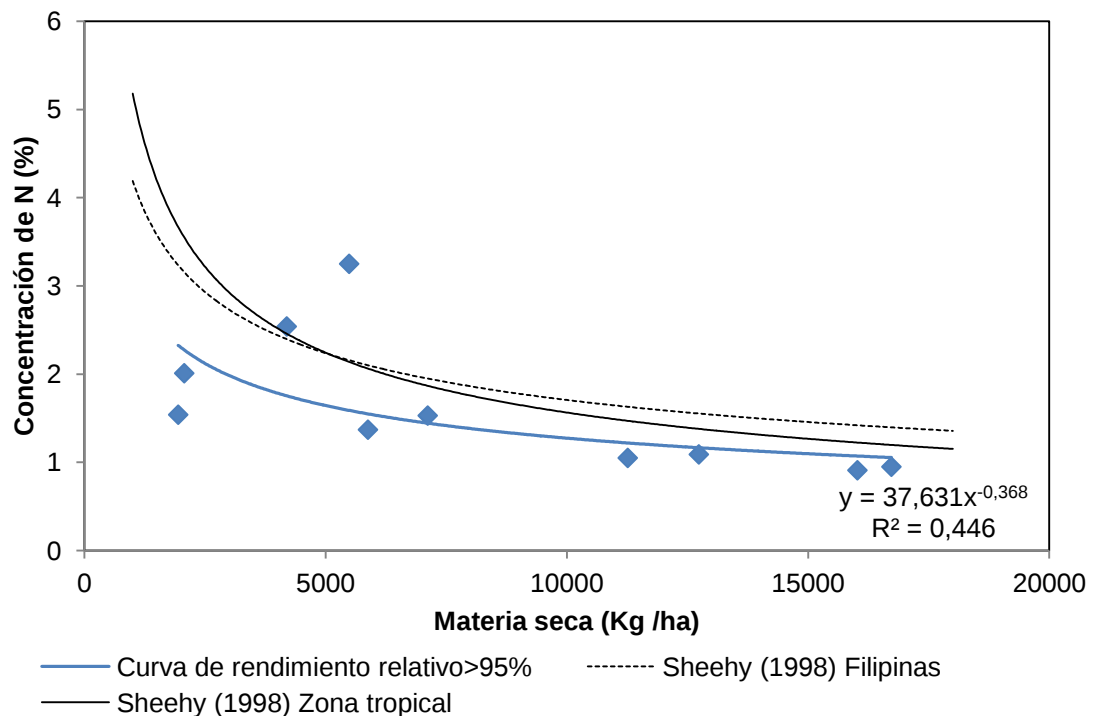


Figura 7. Comparación de curvas críticas de dilución de N internacionalmente y la curva de dilución de la variedad INIA Merín para para los rendimientos que superaron el 95% del rendimiento relativo.

La figura 7 muestra como se sitúan las concentraciones de N y la MS de los tratamientos con mejor rendimiento con respecto a las curvas de dilución crítica de N existentes. Exceptuando los dos puntos en primordio de las variedades con dosis de 50N y 100N a macollaje, los puntos se situaron siempre por debajo de las curvas. Según estos resultados, se podría sugerir que un aumento en las dosis podría mantener los valores del cultivo por encima de la curva de dilución planteada. Esto significaría un aumento en MS, lo que con un índice de cosecha promedio podría llegar a tener altos rendimientos. Esto se sustenta cuando se ve que los tratamientos representados muestran una mayor acumulación de MS y rendimiento que el resto, aunque en este último, solo en términos absolutos. Cabe notar también que dosis menores también alcanzaron el máximo rendimiento sin necesidad de incrementar su concentración de N. Por lo tanto sería conveniente seguir trabajando para construir una curva de dilución para el ideotipo índica en condiciones de Uruguay, al menos para esta variedad.

4.3.2 Curvas de dilución y rendimiento en grano para Parao

Esta variedad respondió significativamente a los tratamientos de dosis de N ($p < 0,05$). Los tratamientos que generaron al menos el 90% del rendimiento máximo fueron más de la mitad (11 en 16), los que son estadísticamente iguales.

Cuadro 10. Rendimiento en grano alcanzado según el tratamiento para Parao.

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)		RR Y0/Yn
100+25	12511	A	1,00
100+50	12208	AB	0,98
50+50	12167	AB	0,97
100+100	11979	AB	0,96
50+25	11925	AB	0,95
25+50	11765	AB	0,94
50+100	11629	ABC	0,93
25+25	11561	ABC	0,92
25+100	11540	ABC	0,92
0+50	11454	ABC	0,92
0+100	11248	ABCD	0,90
100+0	11130	ABCDE	0,89
50+0	11002	BCDE	0,88
0+0	10204	CDE	0,82
0+25	9836	DE	0,79
25+0	9752	E	0,78
P-Valor		0,0098	

En el cuadro 10 se aprecia la influencia de las dosis de N en el rendimiento final de esta variedad. No se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento de 25+25 y el de 100+100 que usa cuatro veces más N, lo que da a entender que lo importante fue fertilizar en ambos momentos y no tanto la magnitud de la dosis, haciendo caer en forma importante la eficiencia del uso del N. De hecho, todos los tratamientos en los que se fertilizó en ambos momentos tuvieron rendimientos superiores que los que se fertilizaron en un solo momento. Cabe notar que las diferencias en rendimiento absoluto entre el

tratamiento testigo y el de mayor dosis (100+100) fueron de 1775 kg ha⁻¹, diferente de INIA Merín, que resultó en una diferencia de 4483 kg ha⁻¹.

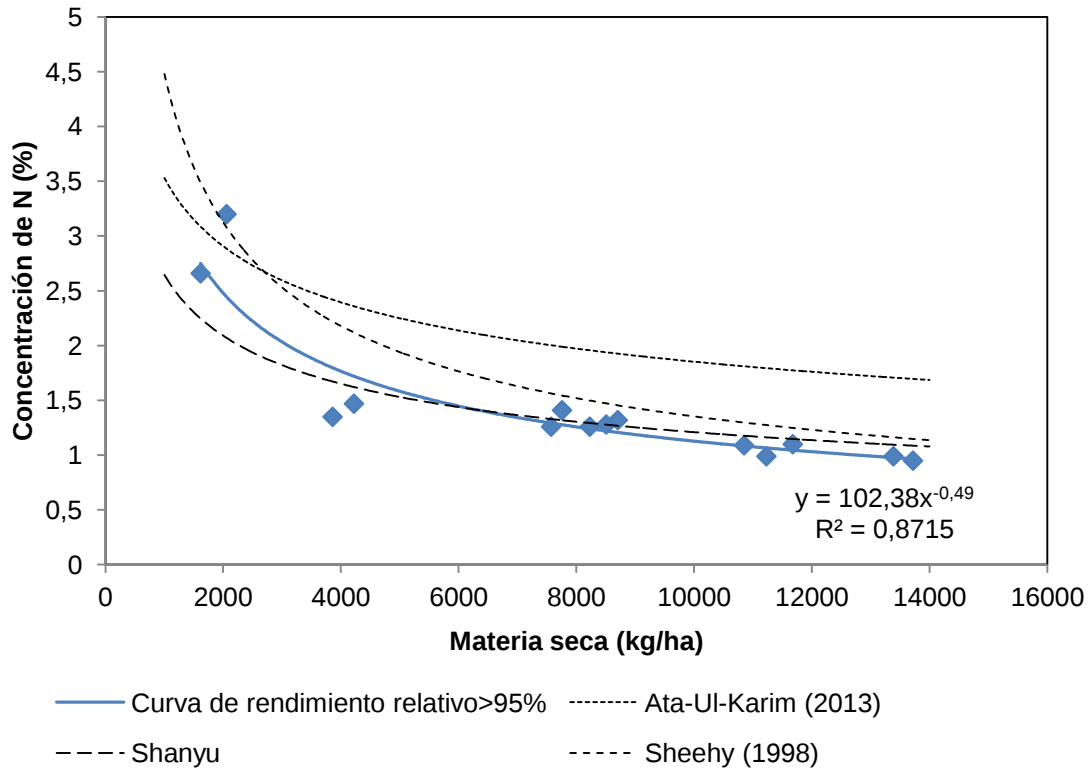


Figura 8. Comparación de curvas críticas de dilución de N reportadas internacionalmente y la curva de dilución de la variedad Parao para los tratamientos que superaron el 95% del rendimiento relativo.

En base a lo anteriormente expuesto, pareciera que las curvas generadas en los trópicos y sub trópicos no son apropiadas para el ideotipo japónica en Uruguay (o al menos para esta variedad), con excepción a la curva generada por Shanyu², como se puede apreciar en la figura 8. Esta última es muy similar a la curva generada obtenida por los tratamientos que alcanzaron los mejores rendimientos que se construyó con la evolución de los cinco tratamientos que superaron el 95% del rendimiento relativo. En este aspecto se puede apreciar la utilidad de tener las concentraciones críticas para cada momento del cultivo ya que se podría hacer un manejo más eficiente de la fertilización al saber si el cultivo se encuentra fuera del óptimo, evitando sobre fertilizaciones y déficits.

4.4 ADAPTABILIDAD DE LAS CURVAS CRITICAS DE DILUCIÓN

4.4.1 Adaptabilidad de las curvas para INIA Merín

La comparación del comportamiento de INIA Merín frente a las curvas existentes reportadas para cultivos tipo índicas, sugerirían que el cultivar está constantemente en situación de déficit nutricional. Según la bibliografía, estar por debajo de la curva en cualquier momento implicaría que existe un margen para explorar en el agregado de dosis de N, que provoquen un aumento de concentración de N y a su vez un aumento en la MS. Según Justes (1994), la dosis óptima es aquella que provoca un aumento significativo en la concentración de N y no tiene efecto en la acumulación de MS. En este trabajo significaría que si se encuentran diferencias significativas entre 100N y 50N, sería posible explorar con el agregado de más N por encima de la dosis mas alta, ya que no se ha encontrado un punto de no respuesta.

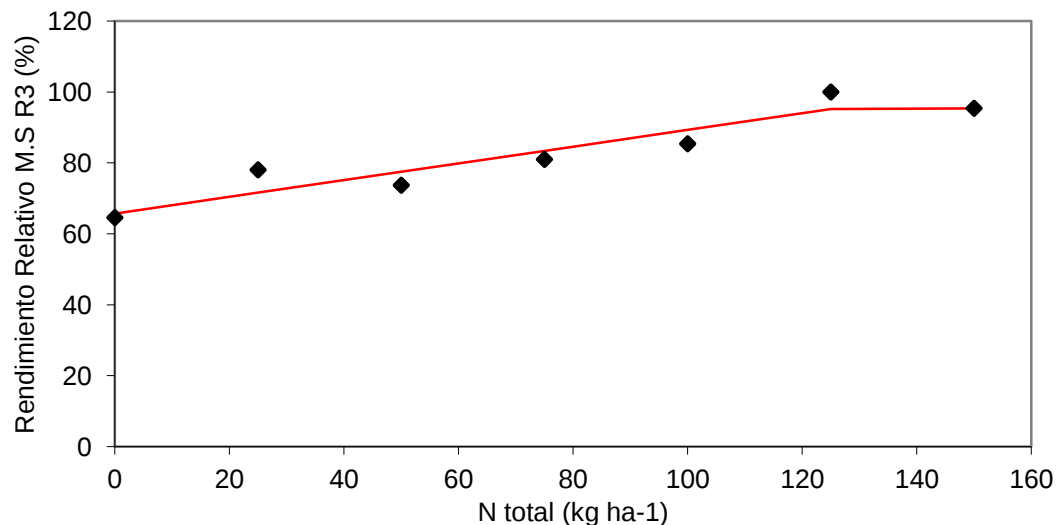
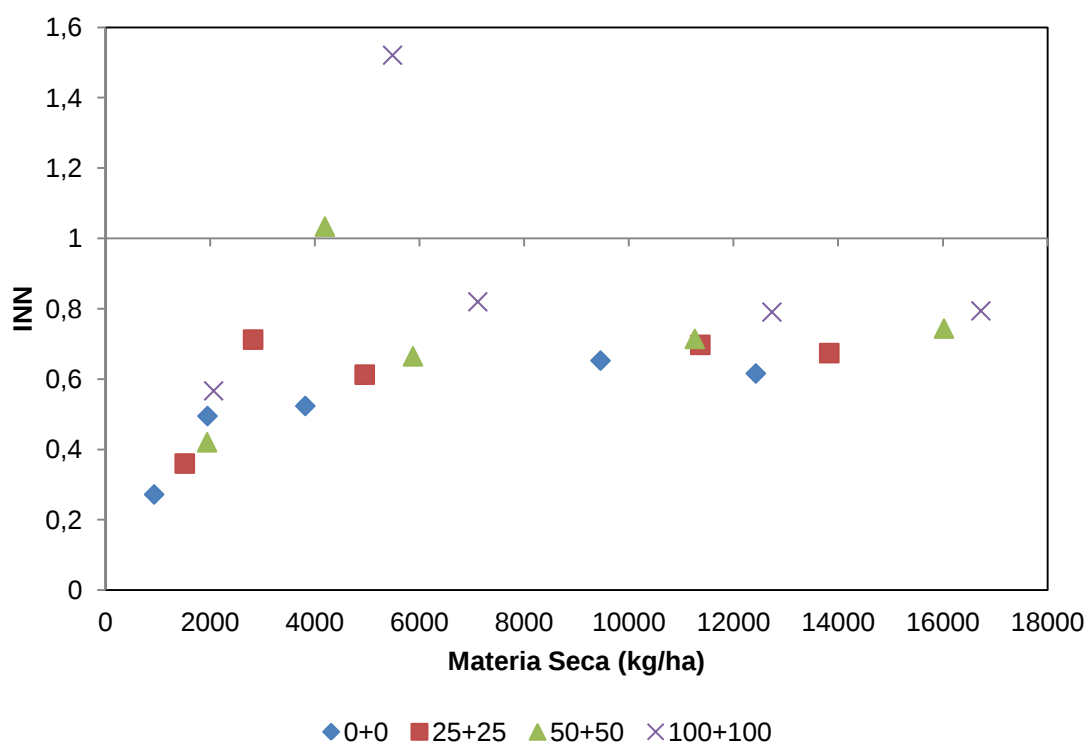


Figura 9: Rendimiento relativo de la MS acumulada a R3 en INIA Merín según las dosis de N (kg ha^{-1}).

Si bien se logró ajustar un modelo lineal plateau (figura 9), este modelo estuvo ajustado por la ultima dosis evaluada. Existió una fuerte asociación entre la MS a R3 y la dosis total de N agregada ($R=0,94$). El punto de quiebre entre la zona de respuesta en acumulación de MS y el plateau se genero con la dosis de 125 Kg ha^{-1} . Estos datos también sugieren que podría haber dosis superiores a explorar en busca de mayores acumulaciones de MS y por ende mayores rendimientos. En esta investigación, estas dosis existieron llegándose

hasta 200 kg ha⁻¹ pero el tratamiento de 100 N a primordio trajo aparejado problemas de enfermedades debido a la falta de aplicación de fungicidas alterando los resultados, por lo que no fueron incluidos en el análisis.

Las concentraciones de N fueron efecto directo de la magnitud de la dosis aplicada. Estas concentraciones hicieron que se genere un índice de nutrición nitrogenada (INN) que nunca fue superior a lo reportado por Sheehy (1998), si bien las dosis utilizadas en sus experimentos fueron de entre 200 y 400 kg N ha⁻¹. Estas dosis podrían provocar mayores concentraciones de N para la misma MS y tener un valor crítico superior.



*Para realizar el índice de nutrición nitrogenada se utilizó el crítico propuesto por Sheehy (1998).

Figura 10. Índice de nutrición nitrogenada en función de la acumulación de MS (kg ha⁻¹) para INIA Merín.

En la figura 10, el INN evidencia como en todo el ciclo excepto para el segundo momento en el tratamiento 100+100 y 50+50 se estuvo por debajo de la línea de suficiencia, situándose la mayoría de los valores entre 0,6 y 0,8 aproximadamente. Esto permite apreciar la magnitud de la deficiencia,

alcanzando los valores mínimos (entre 0.2 y 0.6) en el primer momento de muestreo.

El índice de cosecha no se vio afectado por la dosis aplicada, por lo que se alcanzaron rendimientos similares con similares dosis y acumulaciones de MS, por lo que si se lograsen mayores acumulaciones de MS a fin de ciclo, podría ser posible obtener mayores rendimientos. El rendimiento estuvo asociado a la fertilización de manera similar que la MS por lo que también se puede concluir que hay margen para explorar en cuanto a dosis de N. Los rendimientos registrados por Sheehy (1998) en China (15 t ha^{-1}) son similares a los del experimento, pero los rendimientos de Filipinas ($9,7 \text{ t ha}^{-1}$) son inferiores aun utilizando dosis de 400 kg N ha^{-1} . La MS acumulada en China fue de $27,5 \text{ t ha}^{-1}$ lo que implica un índice de cosecha de 54,5%, similares a los de este trabajo, y a los de Filipinas donde la producción de MS fue de $17,3 \text{ t ha}^{-1}$ (56%).

Considerando los datos obtenidos, se puede interpretar que en INIA Merín aún hay oportunidad de mejorar tanto en producción de MS como en rendimiento, y las curvas críticas de dilución de N podrían llegar a ser una herramienta útil para la determinación del status nutricional del cultivo. Sin embargo, también cabe la posibilidad de que se haya llegado al techo productivo, y que las mayores concentraciones de N en los estudios de Sheehy (1998) se deban a una interacción de clima y variedad, dado que sus experimentos se sitúan en los trópicos y con sistemas de trasplante.

4.4.2 Adaptabilidad de las curvas para Parao

La curva de arroz tipo japónica que aparentemente se adaptaría mejor para analizar la variedad Parao², sugiere que el cultivar está constantemente en situación cercana a la suficiencia nutricional para los tratamientos 50+50 y 100+100. Según la bibliografía referente a las curvas críticas de dilución, estar cerca de la misma en cualquier momento implicaría que las dosis suministradas son acordes a las necesidades del cultivo. Los puntos por debajo del límite de los tratamientos 0+0 y 25+25 denotan cierto déficit, por lo que se podrían explorar dosis mayores que provoquen un aumento de concentración de N y a su vez un aumento en la MS. El hecho de no haber encontrado diferencias significativas en acumulación de MS de la dosis más alta y la anterior, indicaría según Justes (1994), que con las dosis propuestas se superó la concentración crítica y la dosis óptima.

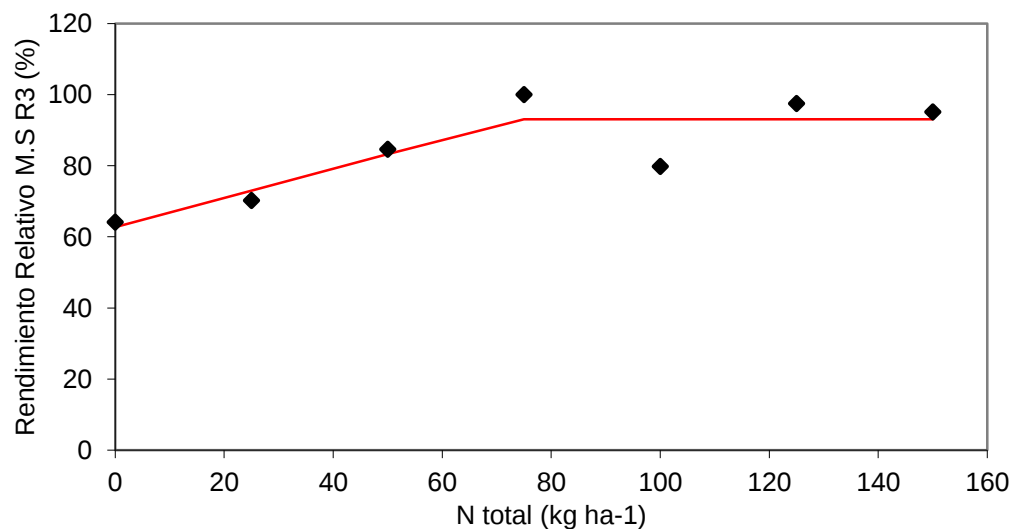
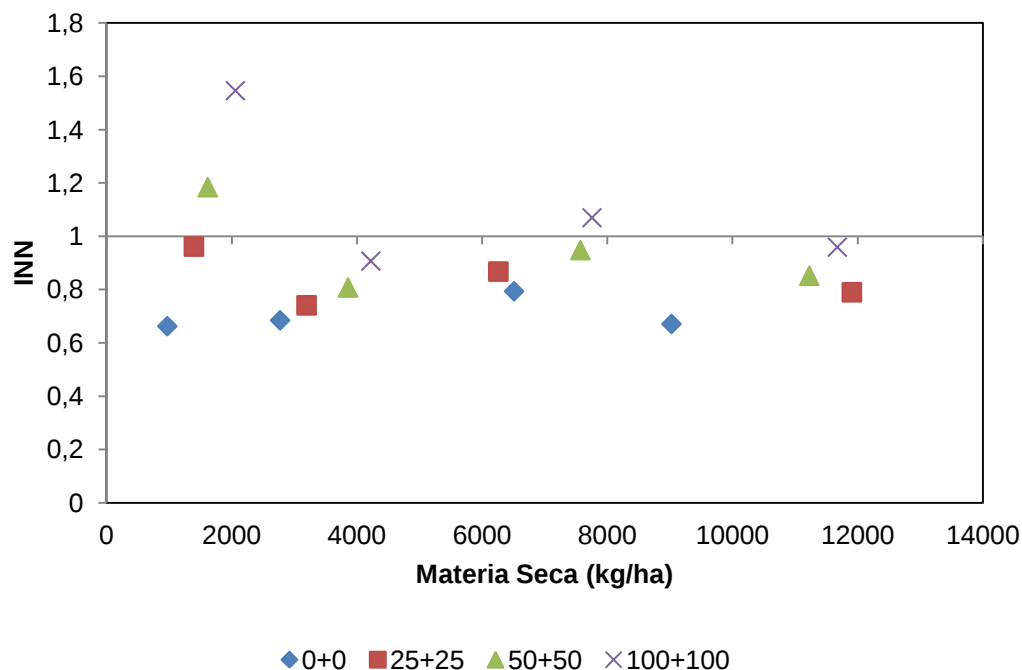


Figura 11: Rendimiento relativo de la MS acumulada a R3 en Parao según las dosis de N (kg ha⁻¹).

Para la variedad Parao también se pudo ajustar un modelo lineal plateau (figura 11) en el que se observa cómo dosis incrementales partir de los 75 kg ha⁻¹ no generan aumento en la acumulación de MS (el plateau de rendimiento relativo) y coincidentemente tampoco en rendimiento. Por lo que la estrategia para aumentar la productividad no dependería del aumento de las dosis de fertilizante ni acumular más MS, ya que a partir del punto de inflexión no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. La dosis total de 200 kg ha⁻¹ no se incluyó en el análisis por los mismos motivos que en INIA Merín.

Las concentraciones de N fueron efecto directo de la magnitud de la dosis aplicada. Sin embargo, a partir del tratamiento de 50N no hubo diferencias significativas en acumulación de MS, por lo que el tratamiento de 100N realizó un consumo de lujo. Estas concentraciones nunca fueron superiores a las reportadas en Australia por Sheehy (1998), Ata-Ul-Karim (2013), aunque cabe resaltar que las dosis utilizadas en los experimentos de este último fueron entre 0 y 360 kg N ha⁻¹. Esto implica que las concentraciones críticas de N en este experimento son menores. Esto probablemente se deba al clima, siendo que la curva que más se asemeja a la de este estudio² fue propuesta para un clima templado.



*Para realizar el índice de nutrición nitrogenada se utilizó el crítico propuesto por Shanyu².

Figura 12. Índice de nutrición nitrogenado según la acumulación de MS (kg ha^{-1}) para Parao.

En la figura 12 se puede apreciar como los tratamientos 50+50 y 100+100 estuvieron cercanos al nivel de suficiencia y que en el último momento de registro 30 DDP todos los tratamientos a excepción del testigo absoluto alcanzan la misma MS. Por otro lado, el tratamiento de 0+0 se mantiene siempre por debajo del 0,8 y el 25+25 nunca llega al índice de suficiencia.

El índice de cosecha no varió en gran medida según la dosis aplicada, por lo que se alcanzaron rendimientos similares con similares dosis y acumulaciones de MS, por lo que (según las condiciones nacionales) el aumento de dosis a partir del tratamiento de 25+25 podría terminar provocando ineficiencia en el uso del fertilizante. El rendimiento estuvo asociado a la fertilización de manera similar que la MS, por lo que sería posible interpretar que dosis incrementales no tendrían respuesta en ninguno de estos parámetros. Los rendimientos registrados por Sheehy (1998) en Australia se encuentran alrededor de las 15 t ha^{-1} , donde la variedad utilizada es Amaroo a la cual se le aplicaron alrededor de 160 kg N ha^{-1} . Parao no mostró déficits de suministro de N ni potencial de rendimiento mayor al registrado, por lo que las diferencias pueden ser debido a la variedad o condiciones climáticas de

Uruguay. En el caso de y Shanyu² Ata-UI-Karim (2013) se utilizaron dosis de hasta 160 y 360 kg N ha⁻¹ (respectivamente), pero no hay registro de rendimientos ya que al ser un trabajo acumulando bases de datos de productores, se utilizaron rendimientos relativos. La MS acumulada en Australia fue de 22,5 t ha⁻¹, lo que implica un índice de cosecha de 66%, bastante elevado pero dentro de los rangos que se encontraron para este experimento.

En función del primer set de datos analizados, según los conceptos manejados en la bibliografía de curvas críticas de dilución de N, podría especularse que en Parao las oportunidades de oportunidad de mejorar en producción de MS ni en rendimiento serían de menor magnitud, y que la curva crítica de dilución de N propuesta por Shanyu² podría llegar a ser una herramienta muy útil para la determinación del status nutricional del cultivo bajo las condiciones nacionales.

5. CONCLUSIONES

Las curvas de dilución de N publicadas internacionalmente para el cultivo de arroz y utilizadas en este trabajo para constatar su adaptabilidad a variedades de arroz locales mostraron resultados contrastantes. Mientras que la variedad Parao presentó un comportamiento similar a una de las curvas de dilución para ideotipos japónicas (la cual se generó en clima templado), lo contrario ocurrió con la variedad INIA Merín con la curva de dilución de ideotipo índica. Esto significó la aceptación de la hipótesis nula en la primera variedad y el rechazo con la segunda.

Existió una clara relación entre el estado nutricional del cultivo y su capacidad de acumular MS, así como entre ésta variable y el rendimiento en grano alcanzado. Esta relación alcanzó un plateau entorno a los 75 kg N ha en la variedad Parao mientras que en INIA Merín la relación fue lineal lo que se asocia con el comportamiento de estas variedades frente a las curvas con las que se compararon.

Las dosis a macollaje fueron, para ambas variedades, las únicas que tuvieron efecto en la acumulación de MS, sin embargo, su influencia sobre la concentración de N es notable solo en las primeras etapas previo a la fertilización de primordio. En ambas variedades éstas últimas tuvieron efecto en variar la concentración de N en planta pero no la acumulación de MS.

En cuanto al rendimiento de INIA Merín los tratamientos de 100N fueron consistentemente distintos del testigo absoluto, encontrándose los tratamientos de 25N y 50N entre estos dos, tanto para las dosis a macollaje como para las de primordio.

La variedad Parao mostró la misma respuesta en rendimiento a los tratamientos de 100N y 50 N que fueron consistentemente distintos del testigo absoluto. El tratamiento de 25N a primordio resultó ser igual que el testigo absoluto, mientras que en macollaje no se diferencia de los de 100N y 50N.

Las curvas de dilución publicadas para ideotipos japónicos permitirían hacer un manejo objetivo de la fertilización N en la variedad Parao según los datos obtenidos en este trabajo. El rendimiento alcanzado con una dilución similar a la publicada permitió alcanzar rendimientos en grano aún superiores que los obtenidos internacionalmente.

Por otro lado, en la variedad INIA Merín los resultados agronómicos encontrados así como la comparación de la dilución de N experimentada durante su ciclo con las curvas publicadas indicaría la posibilidad de realizar

fertilizaciones de N superiores a los rangos utilizados en esta investigación con el fin de explorar mayores rendimientos.

6. RESUMEN

La fertilización en el cultivo de arroz en Uruguay ha permanecido incambiada desde hace varias décadas utilizándose básicamente N y P. Sin embargo, en los últimos años algunas zonas productoras han comenzado a fertilizar con K, y las dosis aplicadas de N han ido en aumento sostenido sin seguir un criterio objetivo. Las variaciones en los precios del arroz, la contaminación de los recursos naturales y la baja rentabilidad económica, han promovido desarrollo de herramientas objetivas para poder hacer un manejo más eficiente de los recursos utilizados en la producción. El objetivo de este trabajo es verificar la aplicabilidad de las curvas críticas de dilución de N (utilizadas en varios cultivos a nivel internacional) a las condiciones climáticas nacionales, variedades y manejo. Para ello se utilizan cuatro dosis de fertilizante nitrogenado (0-25-50-100 kg N ha⁻¹) en dos momentos del cultivo (macollaje y primordio), para dos variedades ejemplificadoras de cada ideotipo de arroz: INIA Merín (índica), y Parao (japónica). Las respuestas agronómicas fueron estudiadas por separado para cada variedad con modelos mixtos, definiéndose las dosis por separado y su interacción como efectos fijos, mientras que los bloques fueron definidos como efectos aleatorios. Se utilizó un diseño en parcelas divididas con tres repeticiones, correspondiendo la parcela grande a la fertilización a macollaje, mientras que la chica correspondió a la de primordio. Las determinaciones realizadas hasta 50% de floración incluyeron MS y concentración de N. A fin de ciclo se determinó MS, rendimiento, y sus componentes. Se encontraron diferencias asociadas a la MS, concentración de N y rendimiento asociadas a las aplicaciones tanto a macollaje como a primordio, no habiendo interacciones entre ellas, siendo mayores en índicas vs japónicas. Los tratamientos de 100N fueron distintos del testigo absoluto en ambas variedades y para ambos momentos de fertilización. INIA Merín mostró potenciales de rendimiento más altos, y la comparación con las curvas ya establecidas indicaría que son necesarias el agregado de dosis mayores, ya que los datos obtenidos se ubicaron por debajo de los críticos establecidos por estas curvas. Parao mostró potenciales más bajos y un plateau tanto en acumulación de MS como rendimiento. Este comportamiento es coherente cuando se compararon los datos del experimento con la curva crítica de dilución de N de un clima templado para otra variedad japónica. Los datos registrados para la mayoría de los tratamientos con dosis totales de 50 kg ha⁻¹ se presentaron cercanos a los valores críticos, y dosis mayores se encontraban en niveles de suficiencia. Mientras que para INIA Merín sería necesario evaluar el comportamiento agronómico del manejo N siguiendo las curvas publicadas, en cambio para el caso de Parao éstas podrían utilizarse a nivel nacional. De no haber aumentos en el rendimiento en INIA Merín frente a mayores dosis de N se estaría en la necesidad de construir una curva de dilución para estas condiciones.

Palabras clave: Nitrógeno; INN; Fertilización.

7. SUMMARY

Rice crop fertilization in Uruguay has remained unchanged for several decades, basically using N and P. Nevertheless, in recent years some areas have begun to fertilize with K, and N doses have been increasing steadily without following an objective criterion. Rice prices variation, natural resources pollution, and low economic profitability, have promoted the development of objective tools towards a more efficient resource management in production. This study's objective is to verify the N dilution curves applicability (used internationally in several crops) to our climatic conditions, varieties, and crop management. In order to accomplish this objective, four doses of nitrogen fertilizer (0-25-50-100 kg N ha⁻¹) were used in two crop stages (tillering and panicle initiation, in two exemplifying varieties of each rice ideotype: INIA Merín (indica) and Parao (japonica). Agronomic responses were studied separately for each variety, using mixed models, defining doses separately and their interaction as fixed effects while blocks were defined as random effects. A split plot design was used in divided plots with three repetitions, the large plot corresponding to the tillering fertilization, while the small plot to the primordial fertilization. Determinations made up to 50% of flowering included DM and N concentration. Yield, its components and DM were determined at the end of the cycle. Differences were found associated to DM, N concentration and yield associated to tillering and panicle initiation applications, with no signs of interactions between them, indica being higher than japonica. 100N treatments were different from absolute control in both varieties and for both fertilization moments. INIA Merín showed higher potentials, and comparison with the already established curves seems to allow exploring with higher doses, being that registered data was located below the critical values established by these curves. Parao showed lower potentials and a plateau in both MS accumulation and yield. This behaviour is supported when compared with the N critical dilution curve from a temperate climate for another japonica variety. Data recorded for most treatments with total doses of 50 kg ha⁻¹ were close to critical values and higher doses were found in sufficiency values. It would be necessary to evaluate the agronomic behavior regarding N management and critical nitrogen dilution curves in INIA Merín, but in Parao's case this curves seem to be applicable to our conditions. If INIA Merín doesn't show yield increases when applied higher doses, it would seem that developing a specific critical nitrogen dilution curve would be needed.

Keywords: Nitrogen; INN; Fertilization.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ACA (Asociación de Cultivadores de Arroz, UY). 2014. Mercado mundial del arroz, rendimientos mundiales del arroz. Arroz. 16 (77): 3-4.
2. Alexander, M. 1980. Introducción a la microbiología del suelo. México, D. F., AGT. 492 p.
3. Ali, A. M.; Thinda, H. S.; Sharma, S.; Varinderpal-Singha. 2014. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and GreenSeeker optical sensor in north western India. Field Crops Research. 161: 11-15.
4. _____.; _____.; Varinderpal-Singha; Bijay-Singh. 2015. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded rice using GreenSeeker™ optical sensor. Computers and Electronics in Agriculture. 110: 114–120.
5. Ata-Ul-Karim, S. T.; Yao, X.; Liu, X.; Cao, W.; Zhu, Y. 2013. Development of critical nitrogen dilution curve of Japonica rice in Yangtze River Reaches. Field Crops Research. 149: 149-158.
6. _____.; Zhu Y.; Liu X.; Cao Q.; Tian Y.; Cao W. 2017. Comparison of different critical nitrogen dilution curves for nitrogen diagnosis in rice. (en línea). Scientific Reports. no. 42679: 1-14. Consultado 23 mar. 2018. Disponible en <https://www.nature.com/articles/srep42679>
7. Azcon-Bieto, J.; Talón, M. 2008. Fundamentos de la fisiología vegetal. 2ª. ed. Barcelona, McGraw-Hill Interamericana. 638 p.
8. Baethgen, W. E.; Morón, A.; Díaz-Roselló, R. M. 1994. Modeling long-term soil organic carbon changes in six cropping systems of SW Uruguay. In: World Congress of Soil Science (15th., 1994, Acapulco). Proceedings. Acapulco, s.e. pp. 300-301.
9. Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, ACCS. 157 p.
10. Bijay-Singh; Gupta, R. K.; Yadvinder-Singh; Gupta S. K.; Singh J.; Bains J. S. 2006. Need-based nitrogen management using leaf color chart in wet direct-seeded rice in northwestern India. Journal of New Seeds. 8:35-47.

11. _____.; Singh, V. K. 2017. Fertilizer management in rice. In: Chauhan, B. S.; Jabran, K.; Mahajan, G. eds. Rice production worldwide. Cham, Springer. cap. 10, pp. 217-254.
12. Blanco, P.; Molina, F.; Pérez de Vida, F. 2011. Nuevo cultivar de arroz: L5502 Parao características y comportamiento. Arroz. no. 28: 28-34.
13. _____.; _____.; _____.; Martínez, S.; Bonnacarrère, V.; Rosas, J.; Carracelas, G. 2013. Parao: un nuevo cultivar de arroz de INIA. Revista INIA. no. 33: 38-40.
14. Bollich, P.; Saichuk, J. K.; Funderburg, R. E. 2000. Soils, plant nutrition and fertilization. (en línea). In: Hollier, C. A. ed. Louisiana rice production handbook. Baton Rouge, Louisiana, Louisiana State University. Agricultural Center Research. pp. 32-37. Consultado 15 ene. 2018. Disponible en https://beaumont.tamu.edu/elibrary/RiceResource/Rice_Production_Handbook.pdf
15. Buresh, R. J.; Readdy, K. R.; Van Kessen, C. 2008. Nitrogen transformations in submerged soils. In: Schepers, J. S.; Raun, W. R. eds. Nitrogen in agricultural systems. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 401-436 (Agronomy Monograph no. 49).
16. Campbell, C. A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen, and fertility. In: Schnitzer, M.; Khan, S. U. eds. Soils organic matter. Amsterdam, Elsevier. pp. 173-271 (Development in Soil Science no. 8).
17. Capurro M.; Riccetto S.; Roel A. 2014. Efecto del momento retiro de agua y momento de cosecha en las variedades parao y el paso 144. (en línea). Montevideo, INIA. s.p. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en: <http://www.inia.uy/Documentos/INIA%20TT/Arroz/Jornada%20Arroz%20-%20Soja%202014/Arroz/C%20Riego%20jornada%202014.pdf>
18. Castillo J. 2013. Ajuste a la fertilización N-P-K en el cultivo de arroz. (en línea). Montevideo, INIA. Diapositivas. Consultado 15 ene. 2018. Disponible en http://www.inia.org.uy/estaciones/ttres/actividades/2013/12Ajustes_a_la_fert_NPK.pdf

19. _____.; Terra, J.; Ferreira, A.; Méndez, R. 2014. Fertilización n en arroz en base a indicadores objetivos. ¿Qué sabemos luego de 3 años de experimentación? *In*: Arroz-soja: resultados experimentales 2013-2014. Montevideo, INIA cap. 3, pp. 4-6 (Actividades de Difusión no. 735).
20. _____. 2015. En sus dosis justas: N-P-K como forma de explorar altos rendimientos en arroz. (en línea). *In*: Seminario de Actualización Técnica en Fertilización de Arroz (2015, Treinta y Tres). Puesta a punto y avances de información sobre la nutrición del cultivo de arroz. Montevideo, INIA. pp. 1-19. Consultado 14 nov. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Seminario%20Fertilizacion%202015/8-J%20Castillo.pdf>
21. Chebataroff, N. 1998. Posibilidades del control de la bacteriosis en arroz. *Arroz*. 4 (14): 26-27.
22. Christianson, C. B.; Carmona, G.; Klein, M. O.; Howard, R. G. 1995. Impact on ammonia volatilization losses of mixing KCL of high pH with urea. *Fertilizer Research*. 40: 89-92.
23. Counce, P. A.; Keisling, T. C.; Mitchell, A. J. 2000. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*. 40 (2): 436-443.
24. Courdin, V.; García, F.; Hernández, A. 2011. Complejo Arrocerero. *In*: Vasallo, M. ed. Dinámica y competencia intrasectorial en el agro. Uruguay 2000-2010. Montevideo, UdelaR. Facultad de Agronomía. cap. 6, pp. 91-103.
25. Darmawan Afandia, S.; Herdiyenia, Y.; Prasetyob, L.; Hasbic, W.; Araid, K.; Okumurad, H. 2016. Nitrogen content estimation of rice crop based on Near Infrared (NIR) reflectance using Artificial Neural Network (ANN). *Procedia Environmental Sciences*. 33: 63 – 69.
26. De Battista, J. J. 2006. Fertilización del arroz con NPK en Entre Ríos. *In*: Benavidez, R. A. ed. El arroz: su cultivo y sustentabilidad. Entre Ríos, EDUNER. pp. 379-390.
27. De Datta, S. K. 1981. Principles and practices of rice production. New York, Wiley. 618 p.

28. _____.; Fillery, I. R. P.; Obcemea, 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 (5): 1355-1362.
29. Deambrosi, E.; Méndez, R. 1993. Fertilización: eficiencia de utilización del nitrógeno aplicado en cobertura. Respuesta del arroz a la aplicación de urea en cobertura y determinación de niveles críticos a nivel foliar. In: Arroz: resultados experimentales 1992-1993. Treinta y Tres, INIA. t. 2, cap. 5, pp. 1-47.
30. _____.; _____. 1995. Fertilización: eficiencia de aplicación de nitrógeno en cobertura al macollaje con respecto al riego. In: Arroz: resultados experimentales 1994-1995. Treinta y Tres, INIA. cap. 2, pp. 1-21 (Actividades de Difusión no. 62).
31. _____.; _____. 1998. Fertilización: manejo del nitrógeno para INIA Tacuarí y El Paso 144. In: Arroz: resultados experimentales 1997-1998. Treinta y Tres, INIA. cap. 5, pp. 1-10 (Actividades de Difusión no. 166)
32. _____.; _____. 2002. Manejo de suelos y nutrición. Fertilización: respuesta de cultivares de arroz a densidades de siembra y a aplicaciones de nitrógeno. In: Arroz: resultados experimentales 2001-2002. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 8-16 (Actividades de Difusión no. 292).
33. _____.; _____. 2007. Respuesta de cultivares de tipo indica a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno en la zona este del Uruguay. Montevideo, INIA. 36 p. (Serie Técnica no. 167).
34. _____.; _____.; Ávila, S. 2010. Manejo de suelos y nutrición vegetal: evaluación de los efectos de la aplicación de verde urea en arroz. In: Arroz: resultados experimentales 2009-2010. Treinta y Tres, INIA. cap. 3, pp. 33-38 (Actividades de Difusión no. 611).
35. 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 ¹⁵N and non-isotope techniques. Plant and Soil. 148 (1): 91-99.

36. Dobermann, A.; Fairhurst, T. H. 2000. Rice: nutrient disorders and nutrient management. Manila, PPI/IRRI/PPIC. 190 p.
37. Evans, L. T. 1983. Fisiología de los cultivos. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 402 p.
38. Fairhurst, T. H.; Dobermann, A.; Quijano-Guerta, C.; Balasubramanian, V. 2007. Mineral deficiencies and toxicities. In: Fairhurst, T. H.; Witt, C.; Buresh, R. J.; Dobermann, A. eds. Rice: a practical guide to nutrient management. 2nd. ed. Los Baños, Phillipines, International Rice Research Institute. pp. 46–86.
39. Ferreira, G.; Ernst, O. 2014. Diagnostico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. Agrociencia (Uruguay). 18(1):75 – 85.
40. Fillery, I. R. P.; Vlek, P. L. G. 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. Fertilizer Research. 9: 79-98.
41. Freney, J. R.; Denmead, O. T. 1992. Transfer coefficients for water-air exchange of ammonia, carbon dioxide and methane. Ecological Bulletins. 42: 31-41.
42. Frioni, L. 2006. Microbiología; básica, ambiental y agrícola. Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 407 p.
43. Greenwood D. J.; Lemaire G.; Gosse G.; Cruz P.; Draycott A.; Neeteson J. J. 1990. Decline in percentage N of C, and C4 crops with increasing plant mass. Annals of Botany. 66: 425-436.
44. _____.; Gastal F.; Lemaire G.; Draycott A.; Millard P.; Neeteson J. J. 1991. Growth rate and %N of field grown crops: theory and experiments. Annals of Botany. 67: 181-190.
45. Gutiérrez-Soto, M. V.; Eduardo Cadet-Piedra, E.; Rodríguez-Montero, W.; Araya-Alfaro J.M. 2011. El greenseeker™ y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. Agronomía Mesoamericana. 22(2):397-403.
46. Harrell, D.; Saichuk, J. 2009. Soil, plant nutrition and fertilization. In: Saichuk, J. ed. Louisiana rice production handbook. Louisiana, LSU AgCenter. cap. 3, pp. 24-34.

47. Hauck, R. D. 1981. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. In: Clark, F. E.; Rosswall, T. eds. Terrestrial nitrogen cycles. Stockholm, Sweden, Swedish Natural Science Research Council. pp. 551- 562 (Ecological Bulletins no. 33)
48. Haynes, R. 1986. Mineral nitrogen in the plant-soil system. Orlando, Florida, Academic Press. 303 p.
49. Holt, L. S.; Christianson, C. B.; Austin, E. R.; Katyal, J. C. 1988. A laboratory technique for releasing and measuring denitrification products trapped in soil. Soil Science Society of America Journal. 52: 1510-1511.
50. Humphreys, E.; Chalk, P. M.; Muirhead, W. A.; Melhuish, F. M.; White, R. J. G. 1987. Effects of time of urea application on combine-sown calrose rice in south-east Australia. Australian Journal of Agricultural Research. 38 (1): 129-138.
51. Islam Z.; Bagchi B.; Hossain M. 2007. Adoption of leaf color chart for nitrogen use efficiency in rice: impact assessment of a farmer-participatory experiment in West Bengal, India. Field Crop Research. 103 (1): 70-75.
52. Jansson, S. L.; Persson, J. 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: Stevenson, F. J. ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, WI, ASA. pp. 229-252.
53. Ji – Yun, J.; Ronggui, W.; Rongle, L. 2002. Rice production and fertilization in China. Rice Production. 16: 26-29.
54. Justes, E.; Mary, B.; Meynard, J. M.; Machet, J. M.; Thelier-Huche, L. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Annals of Botany. 74: 397-407.
55. Keeney, D. R.; Nelson, D. W. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A. L. ed. Methods of soil analysis. 2nd. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pt. 2, pp. 643-693 (Agronomy Monograph no. 9).
56. _____; Sahrawat, K. L. 1986. Nitrogen transformations in flooded rice soils. Fertilizer Research. 9 (1): 15-38.

57. Kumar, R.; Silva, L. 1973. Light ray tracing through a leaf cross- section. *Applied Optics*. 12: 2950-2954.
58. Lauz, M.; Tarán, C. 2016. Diferentes criterios de fertilización N-P-K en el cultivo de arroz y su efecto en parámetros vegetativos, productivos, económicos y de eficiencia. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 91 p.
59. Lemaire, G.; Cruz, P.; Gosse, G.; Chartier, M. 1985. Etude des relations entre la dynamique de prelevement d'azote et la dynamique de croissance en matiere seche d'un peuplement de luzerne (*Medicago saliva* L.). *Agronomie*. 5: 685-692.
60. _____.; Onillon, B.; Gosse, G.; Chartier, M.; Allirand, J. M. 1991. Nitrogen distribution within a lucerne canopy during regrowth: relation with light distribution. *Annals of Botany*. 68: 483-488.
61. _____.; Khaity, M.; Onillon, B.; Allirand, J. M.; Chartier, M.; Gosse, G. 1992. Dynamics of accumulation and partitioning of N in leaves, stems and roots of lucerne (*Medicago saliva* L.) in a dense canopy. *Annals of Botany*. 70: 429-435.
62. _____.; Jeuffroy, M.; Gastal, F. 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journals of Agronomy*. 28: 614–624
63. Lopes, S. I. G.; Volkweiss, S. J.; Tedesco, M. J. 1993. A acumulação de matéria seca e absorção de nutrientes pela cultura de arroz irrigado. *Lavoura Arrozeira (Brasil)*. 46 (411): 3-6
64. Macedo, I.; Oxley, M. 2017. Agroclimatología: información climática. (en línea). Montevideo, INIA. pp. 125-130 (Serie Técnica no. 233). Consultado 23 mar. 2018 Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7487/1/ST-233-p.125-130.pdf>
65. Mae, T. 1997. Physiological nitrogen efficiency in rice; nitrogen utilization, photosynthesis and yield potential. *Plant and Soil*. 196: 201-210.
66. Marchesi, C.; Castillo, J.; Carracelas, G. 2014. Resumen de avance de investigación, año 2013-2014. Fertilización nitrogenada en arroz en base a indicadores objetivos y su efecto en el rendimiento (AZ

- 14). In: Gómez, D. ed. Presentación de resultados experimentales de la zafra 2013-2014. Montevideo, INIA. p. 57 (Actividades de Difusión no. 738).
67. Méndez, R.; Deambrosi, E. 2009. Coberturas nitrogenadas para la producción de arroz: eficiencia de aplicación. Montevideo, INIA. 38 p. (Serie Técnica no. 179)
68. Mesones, M.; Pérez de Vida, F. 2017. Análisis de crecimiento en nuevos cultivares: respuesta a densidad y fertilización nitrogenada en INIA Merín y SLI09197. In: Jornada Anual de Arroz 2017 (1ª., 2017, Treinta y Tres). Resultados experimentales 2016-2017. Montevideo, INIA. pp. 27-30 (Serie Técnica no. 233)
69. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2017. Anuario estadístico agropecuario 2017. (en línea). Montevideo. 214 p. Consultado 23 feb. 2018. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario-estad%C3%ADstico-de-diea-2017>
70. Mikkelsen, D. S. 1987. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plants and Soil*. 100 (1): 71-97.
71. Molina F.; Riccetto S.; Zorrilla G. 2013. Resumen: base de datos empresas arroceras. (en línea). Montevideo, INIA. Diapositivas. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202012%20-2013%20.pdf>
72. Mosier, A. R.; Mohanty, S. K.; Bhadrachalam, A.; Chakravorti, S. P. 1990. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants. *Biology and Fertility of Soils*. 9: 61– 67.
73. Nakamura, T.; Zhang, Z.; Chiba, M.; Goto, Y.; Nishiyama, I. 1999. Relationship between root amount and sterility caused by cool temperature at the critical stage in rice cultivars differing in cool tolerance. In: Temperate Rice Conference (2nd., 1999. Sacramento, CA). Proceedings. Manila, IRRI. pp. 245-250.

74. Narteh, L. T.; Sahrawat, K. L. 2000. Ammonium in solution of flooded West African soils. *Geoderma*. 95 (3): 205-214.
75. Nelson, D. W. 1982. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. In: Stevenson, F. J. ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 327-363 (Agronomy Monograph no. 22).
76. Norman, J. R.; Wilson, C. E. Jr.; Slaton, N. A. 2003. Soil fertilization and mineral nutrition. U. S. mechanized rice culture. In: Smith, W. C.; Dilday, R. H. eds. Rice: origin, history, technology and production. Hoboken, NY, Wiley. pp. 331-411.
77. Painter, H. A. 1971. Chemical, Physical and biological characteristic of wastes and waste effluents. In: Ciaccio, L. L. ed. Water and water pollution handbook. New York, Marcel Dekker. v.1, pp. 329-364.
78. Palmer, N. 2012. Uruguay: a small country, big in rice. *Rice Today*. 11(3): 21-23.
79. Patrick, W. H. Jr.; Mahapatra, L. C. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*. 20: 323-359.
80. _____.; Mikkelsen, D. S.; Wells, B. R. 1985. Plant nutrient behaviour in flooded soils. In: Engelstad, O. P. ed. Fertilizer technology and use. 3rd. ed. Wisconsin, SSSA. pp. 197-228.
81. Paul, E. A. 1996. Soil microbiology, ecology and biochemistry in perspective. In: Paul, E. A. ed. Soil microbiology, ecology and biochemistry. 3rd. ed. San Diego, Academic Press. pp. 3-24.
82. 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 Crop Research*. 96: 37-47.
83. Peoples, M. B.; Herridge, D. F.; Ladha, J. K. 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil*. 174 (1): 3-28.

84. Pereira A.; Zorrilla G. 2016. Resumen de la zafra 15-16 base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres, INIA. Diapositivas. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/GT%20ARROZ%20JUNIO%202016%20Resumen%20definitivo.pdf>
85. _____.; Pimienta A.; Zorrilla G. 2017. Resumen de la zafra 16-17 base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres, INIA. Diapositivas. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Informes%20de%20zafra/GT_ARROZ_JUNIO_2017_INFORME_FINAL.pdf
86. Pérez de Vida, F.; Blanco, P.; Molina, F. 2016. INIA Merín, nuevo cultivar de arroz: alta productividad y resistencia a Pyricularia. Revista INIA. no. 44: 15-19.
87. Pittelkow, M.; Zorrilla, G.; Terra, J.; Riccetto, S; Macedo, I.; Bonilla, C.; Roel A. 2016. Sustainability of rice intensification in Uruguay from 1993 to 2013. Global Food Security. 9: 10–18
88. Pcojeski, E.; Souza da Silva, L.; da Cas Bundt, A.; Marchesan, E.; Rabaioli Camargo, E.; Bueno Scivittaro, W. 2012. Estimativa do teor de nitrogenio em arroz irrigado com o clorofilometro e a cartela de cores. Ciencia Rural. 42 (11): 1982-1987.
89. Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. Advances in Agronomy. 24: 29-96.
90. _____. 1981. Some aspects of the physical chemistry of paddy soils. In: Symposium on Paddy Soil (1981, Beijing). Proceedings. Beijing, Institute of Soil Science Academia Sinica. pp. 59-94.
91. _____. 1985. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. In: Raymundo, M. E.; Mamaril, C. P.; De Satta S. K. eds. Wetland soils: characterization, classification and utilization. Los Baños, Philippines, IRRI. pp. 71-90.
92. Riccetto, S.; Molina, F.; Zorrilla, G. 2013. Resumen base de datos empresas arroceras; grupo de trabajo arroz, junio 2013. (en línea). Treinta y Tres, INIA. Diapositivas. Consultado 26 feb. 2018. Disponible en

<http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202012%20-2013%20.pdf>

93. _____.; Zorrilla, G. 2014. Resumen de la zafra 13-14 base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres, INIA. Diapositivas. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202013%20-2014%20.pdf>
94. _____.; _____. 2015. Resumen de la zafra 14-15 base de datos empresas arroceras. (en línea). Treinta y Tres, INIA. Diapositivas. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20TT/Arroz/Zafra%202014-2015.pdf>
95. Sáez-Plaza, P.; Navas, M.; Wybraniec, S.; Michałowski, T.; García Asuero, A. 2013. An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 43: 224–272.
96. Sahrawat, K. L. 2005. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. *Soil Science and Plant Analysis*. 37 (5): 787-796.
97. Salette, J.; Lemaire, G. 1981. Sur la variation de la teneur en azote des graminées fourragères pendant leur croissance: Formulation d'une loi de dilution. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*. 92 (3): 875-878.
98. Savant, N. K.; De Datta, S. K. 1982. Nitrogen transformations in wetland rice soils. *Advances in Agronomy*. 35: 241-302.
99. Seminario-Taller Análisis de Planta (2014, Montevideo). 2014. Presentación. Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. s.p.
100. Sharma, P. K.; De Datta, S. K. 1985. Puddling influence on soil, rice development, and yield. *Soil Science Society of America Journal*. 49 (6): 1451-1457.
101. Sheehy, J. E.; Dionora, M. J. A.; Mitchell, P. L.; Peng, S.; Cassman, K. G.; Lemaire, G.; Williams, R. L. 1998. Critical nitrogen

concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field Crops Research*. 59: 31 – 41.

102. Shipp, M. 2005. Rice crop timeline for the southern states of Arkansas, Louisiana, and Mississippi. (en línea). Pineville, Louisiana, Louisiana State University. s.p. Consultado 25 feb. 2018. Disponible en <http://legalelectric.org/f/2015/10/RiceCrop-Timeline-for-the-Southern-States.pdf>
103. Shoji, S.; Ando, H.; Wada, G. 1986. Fate of nitrogen in paddy fields and nitrogen absorption by rice plants. *JARQ (Japón)*. 20(2): 127-134.
104. Snyder, C. S.; Slaton, N. A. 2002. Rice production in the United States: an overview. *Rice Production*. 16: 30-35.
105. Stevenson, F. J. 1982. Humus chemistry; genesis, composition, reactions. New York, Wiley. 443 p.
106. _____. 1994. Humus chemistry; genesis, composition, reactions. 2nd. ed. New York, Wiley. 512 p.
107. Takenaga, H. 1995. Science of rice plant: physiology. In: Matsuo T.; Kumazawa, K.; Ishii, R.; Ishihara, K; Hirata, H. eds. Internal factors in relation to nutrient absorption. Tokyo, Food and Agricultural Policy Research Center. v.2, pp. 294–309.
108. Tisdale, S. L.; Nelson W. L.; Beaton J. D.; Halvin J. L. 1993. Soil fertility and fertilizers. 5th. ed. New York, Macmillan. p. 499.
109. UdelaR. FA (Universidad de la República. Facultad de Agronomía, UY). 2012. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 51 p.
110. Verhulst, N.; Govaerts, B.; Fuentes Ponce, M. 2010. Sensor portátil GreenSeeker™ para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI): una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas. Parte A: Conceptos y estudios de caso. México, D. F., CIMMYT. 12 p.
111. Wells, B. R.; Huey, B. A.; Norman, R. J.; Helms, R. S. 1993. Rice. In: Bennett, W. F. ed. Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. St. Paul, Minnesota, APS. pp. 15-19.

112. Williams, J. F. 2010. Rice nutrient management in California. Richmond, CA, University of California. 137 p.
113. Wilson, C. E.; Bollich, P. K.; Norman, R. J. 1998. Nitrogen application timing effects on nitrogen efficiency of dry-seeded rice. *Soil Science Society of America Journal*. 62(4): 959-964.
114. Witt, C.; Pasuquin J. M. C. A.; Mutters, R.; Buresh, R. J. 2005. New leaf color chart for effective nitrogen management in rice. *Better Crops*. 89(1):36-39.
115. Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. Los Baños, Philippines, IRRI. 252 p.
116. Youngdahl, L. J.; Lipin, M. S.; Craswell, E. T. 1986. New developments in nitrogen fertilizers for rice. *Fertilization Research*. 9: 149-160.
117. Yuxin, M.; Mulla, D. J.; Randall, G. W.; Vetsch, J. A.; Vintila, R. 2009. Combining chlorophyll meter readings and high spatial resolution remote sensing images for in-season site-specific nitrogen management of corn. *Precision Agriculture*. 10:45–62.