

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA A PRIMORDIO EN EL
CULTIVO DE ARROZ Y EL USO DEL NDVI COMO HERRAMIENTA PARA SU
AJUSTE

por

Luis Francisco AGUIRRE BÉRTIZ
Lucas POSSER URBAN

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2017

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. MSc. PhD. Claudia Elizabeth Marchesi Gyerman

Ing. Agr. Jesús Castillo Velázquez

Ing. Agr. Dr. PhD. Carlos Honorio Perdomo Varela

Fecha: 04 de diciembre de 2017

Autores: -----

Luis Francisco Aguirre Bértiz

Lucas Posser Urban

AGRADECIMIENTOS

A la tutora de tesis Ing. Agr. MSc. PhD. Claudia Elizabeth Marchesi Gyerman por el tiempo y dedicación brindado a este trabajo.

Al cotutor de tesis Ing. Agr. Jesús Castillo Velázquez por la ayuda brindada.

A la Mtra. Lic. Carolina Pereira Borrat responsable de Biblioteca en Instituto Nacional de Investigación, sede en Tacuarembó y a la Lic. Sully Toledo de Biblioteca de Facultad de Agronomía, Universidad de la República.

A los funcionarios de INIA Tacuarembó.

A nuestras familias, amigos y docentes.

A Facultad de Agronomía.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 ASPECTOS GENERALES	3
2.2 ETAPA VEGETATIVA	3
2.2.1 <u>Germinación</u>	3
2.2.2 <u>Estadio de plántula</u>	4
2.2.3 <u>Macollaje</u>	4
2.3 ETAPA REPRODUCTIVA	4
2.4 LLENADO DE GRANO Y MADUREZ FISIOLÓGICA	5
2.5 FACTORES CLIMÁTICOS	6
2.5.1 <u>Temperatura</u>	6
2.5.2 <u>Radiación</u>	6
2.6 NUTRICIÓN MINERAL.....	7
2.6.1 <u>Generalidades</u>	7
2.6.2 <u>Nutrición nitrogenada</u>	7
2.6.3 <u>Requerimientos de nitrógeno</u>	7
2.6.4 <u>Absorción de nitrógeno</u>	8
2.6.5 <u>Fuentes de nitrógeno</u>	9
2.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS INUNDADOS	10
2.7.1 <u>Cambios físicos</u>	11
2.7.2 <u>Cambios biológicos</u>	11
2.7.3 <u>Cambios químicos</u>	12
2.7.3.1 Cambios en el pH.....	12

2.7.3.2	Potencial redox	12
2.8	DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN SUELOS INUNDADOS.....	13
2.8.1	<u>Mineralización-inmovilización</u>	14
2.8.2	<u>Fijación de amonio</u>	15
2.8.3	<u>Fijación biológica de nitrógeno</u>	16
2.8.4	<u>Volatilización de amoníaco</u>	17
2.8.5	<u>Nitrificación-desnitrificación</u>	18
2.8.6	<u>Lixiviación</u>	21
2.9	MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA	21
2.10	ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI). 23	
2.10.1	<u>Espectro de luz</u>	23
2.10.2	<u>Principios fisiológicos y técnicos</u>	24
2.10.3	<u>Índice de vegetación de diferencia normalizada</u>	25
2.10.4	<u>GreenSeeker</u>	27
2.11	INIA MERÍN	27
2.11.1	<u>Características agronómicas</u>	27
2.12	HIPÓTESIS	28
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	29
3.1	ÁREA DE ESTUDIO	29
3.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	29
3.3	TRATAMIENTOS.....	29
3.4	MODELO ESTADÍSTICO	30
3.5	MANEJO DE LOS ENSAYOS	31
3.5.1	<u>Ensayo Paso Casildo</u>	31
3.5.2	<u>Ensayo Pueblo del Barro</u>	31
3.5.3	<u>Ensayo Cerro Cardozo</u>	32
3.6.1	<u>Biomasa en kg de materia seca (MS ha-1)</u>	33
3.6.2	<u>Porcentaje de nitrógeno en planta</u>	33

3.6.3	<u>Eficiencia de conversión de nitrógeno en biomasa parcial (EUNP)</u> ...	33
3.6.4	<u>Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)</u>	34
3.6.5	<u>Rendimiento en grano del cultivo (kg ha-1)</u>	34
3.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	34
3.8	REGISTRO CLIMÁTICO	35
3.8.1	<u>Condiciones climáticas</u>	35
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	37
4.1	INFLUENCIAS CLIMÁTICAS	37
4.2	RESULTADOS A PRIMORDIO	37
4.2.1	<u>Producción de biomasa y absorción de nitrógeno</u>	37
4.2.2	<u>Lecturas de NDVI a primordio</u>	42
4.3	RESULTADOS POST-PRIMORDIO.....	44
4.3.1	<u>Producción de biomasa y absorción de nitrógeno</u>	44
4.3.2	<u>Lecturas de NDVI post-primordio</u>	46
4.4	RESPUESTA EN RENDIMIENTO	47
4.4.1	<u>Regresión entre nitrógeno absorbido post-primordio y rendimiento</u> ..	50
4.4.2	<u>Regresión entre lecturas de NDVI post-primordio y rendimiento</u>	50
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	52
6.	<u>RESUMEN</u>	53
7.	<u>SUMMARY</u>	54
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	55
9.	<u>ANEXOS</u>	59

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Análisis de suelo localidad Paso Casildo	31
2. Análisis de suelo localidad Pueblo del Barro.....	32
3. Análisis de suelo localidad Cerro Cardozo.....	32
4. Biomasa de arroz (kg MS ha ⁻¹), nitrógeno absorbido (kg ha ⁻¹), y lecturas de NDVI a primordio, según tratamientos (dosis de nitrógeno) agregada al macollaje.....	41
5. Biomasa producida (kg MS ha ⁻¹), nitrógeno absorbido (kg ha ⁻¹), eficiencia de uso de nitrógeno (kg MS biomasa/kg N), y lecturas de NDVI a post-primordio, según dosis totales de nitrógeno aplicadas (kg ha ⁻¹).....	45
6. Nitrógeno absorbido a primordio, post-primordio y total (kg ha ⁻¹), según nitrógeno aplicado a macollaje, a primordio y total (kg ha ⁻¹).....	46
7. Rendimientos en grano seco y limpio (kg ha ⁻¹) y eficiencia de uso del nitrógeno (kg grano/kg N), obtenidos según tratamientos.....	49
Figura No.	
1. Espectro electromagnético.....	24
2. Absorción de la luz por las plantas.....	25
3. Temperaturas máximas, medias y mínimas para la zafra 2015/2016 y la serie histórica 1986-2016, para Tacuarembó.....	35
4. Radiación acumulada por décadas durante el ciclo de desarrollo del cultivo en cal/cm ² /día para Tacuarembó.....	36
5. Producción de biomasa a primordio (kg/ha), según tratamientos.....	38
6. Absorción de nitrógeno (kg/ha) a primordio según tratamientos.....	39

7. Asociación entre % de nitrógeno y biomasa a primordio.....	40
8. Asociación entre la biomasa de arroz producida (kg/ha) y el nitrógeno absorbido (kg/ha), en estadio de primordio	42
9. Asociación entre lecturas de NDVI a primordio con biomasa producida (kg/ha) y nitrógeno absorbido (kg/ha)	43
10. Producción de biomasa de arroz (kg/ha) en post-primordio, según los tratamientos de nitrógeno aplicados en macollaje y primordio.....	44
11. Rendimientos promedios en grano seco y limpio kg/ha), según tratamientos de nitrógeno aplicados.....	48
12. Asociación entre nitrógeno absorbido post primordio y rendimiento en grano.....	50
13. Asociación entre lecturas de NDVI 15 días post-primordio y rendimiento.....	51

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de arroz en el Uruguay data desde los inicios del siglo XX. En un principio su desarrollo se restringió a la zona este del país, debido principalmente a las ventajas comparativas, en lo que refiere a recursos topográficos, edáficos e hidrológicos, en este entonces la producción se realizaba de manera más tradicional. Gradualmente el rubro se expandió a nuevas áreas y se transformó en un motor importante de la economía del país, exportándose en la actualidad aproximadamente el 95% de la producción final.

Actualmente el mismo ocupa un área de 160.000 ha aproximadamente, de las cuales el 70% se encuentra en la zona este, 20% en la zona norte y litoral oeste y un 10% en la zona centro. Acompañando a esta expansión se fue dando paso a la incorporación de nuevas tecnologías, como son el uso de herbicidas, la introducción de nuevas variedades, la incorporación de fertilizantes y la búsqueda por un uso eficiente de los mismos.

En la actualidad el rubro se desarrolla de forma muy intensiva y con una amplia incorporación de éstas tecnologías, lo que lleva a elevados costos de producción por hectárea. El uso eficiente de los recursos es el desafío que afrontan por los productores año tras año, con márgenes cada vez más acotados. Los aumentos constantes de los costos ($1.800 \text{ US\$ ha}^{-1}$), ingresos limitados por un rendimiento que parece haber alcanzado su techo, con 8.000 kg ha^{-1} a nivel de chacra de promedio nacional, y una alta inestabilidad de los precios debido a su fuerte dependencia del mercado internacional.

El desarrollo e incorporación de nuevas tecnologías son fundamentales para lograr una estabilidad y mantener el dinamismo del rubro. Es así que, organismos de investigación trabajan para brindar alternativas para una producción más eficiente en el uso de insumos con aportes en material genético, medidas de manejo como ajuste en fecha de siembra, control de enfermedades y malezas, sistematización, ajuste en las fertilizaciones, entre otros.

Respecto a las prácticas de fertilización nitrogenada, la mayoría de la información generada coincide en los momentos de aplicación, de macollaje y primordio. Por otro lado, en lo que refiere a ajustes de dosis, la información disponible es poco precisa y a veces contradictoria. El instituto nacional de investigación agropecuaria (INIA), ha encontrado resultados sólidos y alentadores en cuanto al ajuste de dosis a macollaje, no así para las fertilizaciones a primordio. En la práctica la mayoría de los productores realizan fertilizaciones con dosis fijas, sin tener en cuenta el aporte por parte del suelo, el estado nutricional del cultivo, y con cierto desconocimiento sobre su respuesta.

Dada esta situación, nos planteamos los siguientes objetivos

a) Estudiar la respuesta en rendimiento a fertilizaciones nitrogenadas diferenciales, poniendo énfasis en la etapa de primordio, y de ésta manera seguir aportando información para el modelo ya existente.

b) Evaluar la herramienta GreenSeeker con el fin de explorar la relación existente entre las medidas de NDVI y el status nitrogenado del cultivo.

Si dicha relación fuera importante, se podría trabajar en la implementación de un sistema de recomendación de fertilización nitrogenada a primordio en base a este parámetro.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GENERALES

El arroz es uno de los cultivos principales de la alimentación humana, y se encuentra distribuido en diversos puntos del territorio mundial, con un sistema de producción muy variado (Wassmann et al., Jagadish et al., citados por Fageria, 2013). Se trata de una gramínea C₃, semiacuática, de origen subtropical, con hábito de vida anual y ciclo estival. En la madurez la planta tiene un tallo central con variable número de tallos secundarios o macollos, los cuales emiten una panoja (Fageria, 1984).

Según De Datta (1981) el crecimiento de una planta de arroz depende de muchos factores y puede variar según las condiciones climáticas, la variedad, la fecha de siembra, el inicio del riego, las malezas, la fertilización, las plagas y enfermedades, entre otros. El desarrollo del cultivo de arroz está determinado principalmente por la temperatura. Para cada etapa del ciclo de crecimiento se requiere una determinada cantidad de unidades de calor acumuladas cuantificadas como unidades térmicas (°C) diarias.

Según Fageria, Baligar y Jones, citados por Fageria (2013) el crecimiento de la planta de arroz se puede dividir en las siguientes etapas:

1. Etapa vegetativa: período que va desde la germinación de la semilla hasta el comienzo de la diferenciación del primordio floral.
2. Etapa reproductiva: esta comprende desde el final de la etapa vegetativa hasta que las flores han sido polinizadas
3. Etapa de llenado de grano y madurez fisiológica

2.2 ETAPA VEGETATIVA

Esta etapa se puede subdividir en los siguientes puntos

2.2.1 Germinación

Éste proceso se inicia cuando se rompe la dormancia, las semillas absorben cierta cantidad de agua y son expuestas a temperaturas de 10 a 40°C. En el embrión crecen y se alargan dos estructuras, la radícula y el coleoptile. A medida que crecen ambas estructuras presionan hasta romper la cubierta de la semilla, y en éste momento se considera iniciada la germinación del grano. Luego de germinar, la radícula y el coleoptile continúan creciendo. El coleoptile se alarga hasta encontrar la luz (Yoshida, 1981).

Según Chebataroff (2012) medidas de manejo como la época de siembra son fundamentales a considerar ya que temperaturas bajas menores a

15°C en siembras tempranas determinan mayor demora en emergencia, a menudo no permiten aprovechar la humedad adecuada y el resultado puede ser una baja implantación.

2.2.2 Estadio de plántula

La primera hoja sale a través del coleoptile hacia arriba y no presenta una estructura verdadera, sino más bien actúa como una cubierta protectora para la próxima hoja. Posterior a esta surgen las sucesivas hojas verdaderas de forma opuesta. Esto ocurre hasta la formación de un número determinado de hojas, variable según el cultivar, dando comienzo así al proceso de macollaje (Yoshida, 1981).

Simultáneamente con éste proceso, ocurre la formación y desarrollo radicular primario, el cual es temporario y le suministra agua y nutrientes a la plántula en sus primeras etapas. Siguiendo esto, sobre la base del coleoptile, se da el desarrollo del sistema radicular secundario, el cual acompañará el crecimiento de la planta, éste es encargado de suministrar los nutrientes a la planta a lo largo de su ciclo (Yoshida, 1981).

2.2.3 Macollaje

Finalizado el estadio de plántula, en la base de las plantas dentro de las vainas comienza el proceso de macollaje, el cual se da entre los 15 a 20 días post emergencia. Éste proceso está íntimamente relacionado al número de hojas definido por el cultivar en el cual se da el cambio de estadio, lo cual está afectado por diversos factores entre los que se destacan genotipo, densidad de siembra, adecuado suministro de nutrientes y manejo de agua. La producción de macollos puede continuar hasta los 45-50 días post emergencia, ocasionándose luego pérdidas de macollos definiéndose así el número de macollos efectivos por unidad de área, uno de los principales componentes del rendimiento antes del comienzo de la etapa reproductiva (Yoshida, 1981).

El manejo es un aspecto fundamental a considerar en éste proceso. La fertilización juega un papel preponderante en la definición del número de macollos alcanzables por el cultivo. Según Ishizuka y Tanaka, citados por Chebataroff (2012) bajas concentraciones de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno son limitantes para el proceso y pueden detener el macollaje, con variaciones dentro o entre genotipos.

2.3 ETAPA REPRODUCTIVA

La fase reproductiva se inicia luego de quedar definido el número de tallos/m² en la etapa previa al alargamiento de los entrenudos superiores, antecedendo a la aparición del primordio floral dentro del tallo principal, y

culmina cuando el 50% de las flores han sido polinizadas. Esta aparición del primordio ocurre a causa de una activa multiplicación y diferenciación celular a nivel del meristemo apical, marcando así la finalización de la etapa vegetativa (Yoshida, 1981). Dentro de este período se pueden describir dos eventos principales, la meiosis y con ésta la formación de polen, y la antesis, con la consiguiente fecundación. La meiosis y formación de polen se da cuando las espigas están dentro de la vaina (embarrigado), período de gran susceptibilidad a las bajas temperaturas afectando la viabilidad de los mismos. La antesis ocurre a medida que emerge la espiga en un período de 7 a 10 días, la polinización es simultánea con la apertura de las glumas o inmediatamente posterior.

Estudios realizados por Fageria (2007) demuestran que condiciones ambientales adversas tales como deficiencia de nitrógeno, riego inadecuado, baja radiación solar, temperaturas extremas y aparición de enfermedades pueden reducir el tamaño de la panícula en ésta etapa y por lo tanto afectar el rendimiento final.

Las aplicaciones de nitrógeno en esta etapa tienen una eficiencia de más del 80% por el desarrollo radicular del cultivo, que permite su absorción rápida y beneficia la productividad con el incremento del área foliar activa de las últimas hojas, favoreciendo el aumento del número de granos por espiga y su peso, ambos componentes del rendimiento (Fageria, 1984).

2.4 LLENADO DE GRANO Y MADUREZ FISIOLÓGICA

Esta etapa comienza con el 50% de la floración y termina cuando la humedad promedio del grano es de alrededor del 20%, significando que no hay más deposición de carbohidratos en el grano, y comienza un periodo de pérdida de humedad. Las condiciones en esta etapa determinan el último componente del rendimiento, el peso de los granos (Ferreira y Montauban, citados por Chebataroff, 2012). En nuestras condiciones esta fase puede durar entre 45-50 días, dependiendo del genotipo (Chebataroff, 2012).

Según Stansel (1975) la fecundación de la flor se completa poco tiempo después de la polinización, el ovario se desarrolla y en 3 días comienza la acumulación de fotoasimilados en el endosperma y la diferenciación del embrión. Las temperaturas óptimas para este período se ubican entre los 20-22 °C, temperaturas muy alejadas a estas, son desfavorables provocando un aceleramiento y desorden en la acumulación de gránulos de almidón, dando lugar a espacios vacíos afectando así tanto rendimiento como calidad de grano.

Es esperable que durante el llenado de grano, el índice de área foliar disminuya debido a la senescencia. A pesar de esto es importante mantener el

mayor número de hojas activas posibles hasta que el llenado se complete. En éste proceso la morfogénesis de la planta ya ha terminado y los fotosintatos se translocan gradualmente hacia la panícula desde estructuras de reserva como nudos, hojas y raíces, y la planta lentamente senece (Muruyama, citado por Fageria, 2013).

2.5 FACTORES CLIMÁTICOS

2.5.1 Temperatura

Las temperaturas afectan la fotosíntesis y diversos procesos tanto fisiológicos como bioquímicos. También afecta la acumulación de materia seca, partición de la misma y desarrollo fenológico (Jones, citado por Fageria, 2013). Sumado a esto dicho factor afecta el largo del periodo vegetativo, influenciando por lo tanto la cantidad de reservas acumuladas en tallos, y el largo de periodo de llenado de grano, el cual es determinante en el rendimiento en grano (Dingkuhn y Kropff, citados por Fageria, 2013).

Según Yoshida (1981) las temperaturas mínimas de las etapas diferentes etapas fenológicas: 10 °C para germinación, de 9 a 16 °C para macollaje, 15 °C para primordio floral y de 15 a 20 °C para floración. El mismo autor destaca que las temperaturas óptimas para todo el ciclo del cultivo se ubican entre 25 y 30 °C.

El estadio de crecimiento en el que el cultivo es más sensible tanto a altas como bajas temperaturas es 10 días antes y 10 días posteriores a antesis. En este periodo el número y peso de las espiguillas es afectado negativamente por dichas temperaturas. Shimono et al., citados por Fageria (2013) reportaron que la esterilidad de las espiguillas inducidas por bajas temperaturas durante el estadio de embuche tiene uno de los impactos más importantes en el rendimiento en cultivo de arroz.

2.5.2 Radiación

La radiación solar es un recurso determinante en el rendimiento, debido al control que ejerce sobre la morfogénesis y productividad de los cultivos. La radiación es el motor principal del balance de energía y agua en el sistema planta-atmosfera (Colaizzi et al., citados por Fageria, 2013). En el estado reproductivo y llenado de grano, es donde se requiere los mayores niveles de radiación. Por su parte Yoshida (1981) reportó que para obtener rendimientos en torno a 7.000 kg ha⁻¹ se requieren entre 500-600 cal/cm²/día durante el periodo reproductivo.

2.6 NUTRICIÓN MINERAL

2.6.1 Generalidades

La nutrición es definida como el suministro y absorción de elementos químicos necesarios para el crecimiento y el metabolismo; dichos elementos son denominados nutrientes (Fageria y Baligar, citados por Fageria, 2013). Cada nutriente cumple una función fundamental en ciertos procesos bioquímicos o biofísicos en la planta, por lo que todos los nutrientes son importantes para lograr altos rendimientos. De acuerdo a los requerimientos por parte del cultivo, se clasifican en micronutrientes y macronutrientes.

Los principales macronutrientes para el desarrollo del cultivo son, en orden decreciente, nitrógeno, potasio y fósforo. Estas limitaciones están dadas principalmente por el potencial de aporte del suelo y no por la cantidad extraída de los mismos, ya que nitrógeno y potasio presentan extracciones similares, pero mayoritariamente las caídas de rendimientos a nivel mundial son explicadas por deficiencias de nitrógeno (Fageria, Baligar y Jones, citados por Fageria, 2013).

2.6.2 Nutrición nitrogenada

Entre las principales funciones del nitrógeno en las plantas se destacan su participación en la estructura de las proteínas y enzimas. Las proteínas cumplen funciones estructurales, constitutivo-estructurales, de transporte y almacenamiento, mientras que las enzimas se encargan de catalizar procesos de nutrición, principalmente. Además, actúan como reguladoras del crecimiento, por su acción a nivel de la promoción de la reproducción celular (Mejía de Tafur y Menjivar, 2010).

De acuerdo con De Datta (1981) el nitrógeno absorbido por la planta en los diferentes momentos del ciclo del cultivo influye sobre los diferentes componentes del rendimiento. Desde macollaje hasta primordio floral, el nitrógeno absorbido tiende a aumentar el número de macollos y panículas; el nitrógeno absorbido entre primordio floral y floración, aumenta el número de espiguillas llenas, y por último, el absorbido posterior a la floración, aumenta el peso de los granos.

2.6.3 Requerimientos de nitrógeno

Según Dobermann et al. (2000) para el correcto ajuste de la fertilización nitrogenada se requiere conocimientos acerca del potencial de rendimiento esperado, los aportes provenientes del suelo y el destino del fertilizante aplicado. Por lo tanto, dicho ajuste está influenciado principalmente por factores climáticos y prácticas de manejo, los cuales determinan los rendimientos

potenciales, y por otro lado, por las características edáficas, las cuales determinan el aporte por parte del suelo.

Según Atanasiu (1985) el cultivo de arroz para variedades de altos rendimientos, puede realizar extracciones en torno a los 200 kg de nitrógeno por hectárea, lo cual se corresponde con 18,4 kg de nitrógeno por tonelada de grano producido.

Deambrosi et al. (2007) demostraron que los cultivo de arroz en el Uruguay absorben aproximadamente 160 kg de nitrógeno por hectárea, dando rendimientos promedios de 8 toneladas por hectárea, de los cuales según De Datta (1981) 90 kg ha⁻¹ se extrae en el grano, mientras que el resto corresponde a nitrógeno perteneciente al rastrojo.

En un estudio realizado en Brasil, se encontró una respuesta cuadrática, con una alta correlación ($R^2 = 0,88$), en el rendimiento en grano de arroz en función del agregado de nitrógeno, con dosis que van de 0 a 210 kg de nitrógeno por hectárea, y durante tres años de evaluación, se reportó que el máximo rendimiento económico se obtuvo con una dosis de 90 kg de nitrógeno por hectárea (Fageria y Baligar, 2001).

Tem Berguer y Riethovem, citados por Fageria (2013) reportaron que en China, en un sistema de producción similar al nuestro, la dosis adecuada para cultivares de ciclo medio varía entre 100 y 150 kg de nitrógeno por hectárea.

2.6.4 Absorción de nitrógeno

Los cultivos absorben el nitrógeno de la solución del suelo en forma de nitrato (NO_3^-) y de amonio (NH_4^+), estando determinada principalmente por su abundancia y accesibilidad en el suelo. En suelos bien drenados domina la forma de nitrato, en tanto en suelos saturados y en climas fríos, el amonio es el dominante (Fageria, 2013).

Según Wiren, Gazzarrini y Frommer, citados por Fageria (2013) en condiciones agrícolas, con suelos no inundados las concentraciones de nitrato en el suelo varían en el rango de 7 a 140 ppm. Por otro lado, las concentraciones de amonio pueden ser de 10 a 1000 veces más bajas que las anteriores y solo se encuentran en importantes concentraciones en casos excepcionales como cuando se utiliza fertilizantes.

A pesar que ambas formas de nitrógeno pueden ser absorbidas por el arroz, Fried et al., citados por Fageria (2013) demostraron que las raíces de las plántulas del arroz absorbían amonio 5 a 10 veces más rápido de que lo hacían con el nitrato, dependiendo del pH del suelo. Según Salsac et al. (1987), Yuan

Wang et al. (1993) aunque la absorción de amonio requiere más energía que la absorción de nitrato, Fageria et al., Mengel y Viro, citados por Fageria (2013) sugieren que el arroz prefiere el amonio por sobre el nitrato.

La mayor parte del nitrógeno absorbido como ion NH_4^+ se incorpora a compuestos orgánicos en las raíces, mientras que el nitrógeno absorbido como ion NO_3^- es móvil en el xilema y se puede almacenar en vacuolas y demás órganos aéreos de la planta. Si bien la acumulación de nitratos en la planta es importante para el balance iónico y la osmorregulación, este se debe reducir a amonio para ser incorporado en los esqueletos carbonados (Fageria, 2013).

Takenga, citado por Fageria (2013) sugirió que el arroz puede preferir una forma de nitrógeno frente a la otra dependiendo de su etapa de desarrollo. Durante la etapa vegetativa el amonio es absorbido más eficientemente, en tanto el nitrato es preferentemente absorbido en la etapa reproductiva.

Fageria et al., citados por Fageria (2013) demostraron que el desarrollo del arroz y el peso de la materia seca radicular fueron mayores cuando el cultivo se desarrolló en un ambiente rico en amonio, frente a un ambiente rico en nitrato. El cultivo de arroz el cual es inundado continuamente desde la etapa vegetativa hasta madurez fisiológica no es capaz de absorber grandes cantidades de nitrato, debido a la pérdida del mismo por desnitrificación. Por esta razón el contenido de nitrato en el suelo o la fertilización con el mismo presenta poco o nulo beneficio en condiciones mencionadas. En la mayoría de los casos las fertilizaciones con fuentes amoniacaes deben ser usadas acompañadas de prácticas de manejo que ayuden a prevenir los procesos de nitrificación, de manera de optimizar la eficiencia de absorción de nitrógeno.

La mayoría de las fertilizaciones nitrogenadas son en base a sulfato de amonio y urea, ambas fuentes amoniacaes (Bufogle et al., Gaudin y Dupui, Fageria, Baligar y Jones, citados por Fageria, 2013). Según Fageria et al., citados por Fageria (2013) la eficiencia de absorción de estas dos fuentes nitrogenadas pueden estar influenciadas por el pH inicial del suelo, debido a su influencia en el potencial de volatilización de amoníaco, y al tiempo que transcurre hasta la inundación.

2.6.5 Fuentes de nitrógeno

El suministro de nitrógeno en el cultivo de arroz proviene mayoritariamente de nitrógeno inorgánico presente en el suelo al momento de la inundación, nitrógeno mineralizable de la materia orgánica del suelo, nitrógeno fijado por las algas y bacterias heterotróficas y la incorporación de fertilizantes nitrogenados (Patnaik, citado por De Datta, 1981).

Koyama y Broadbend, citados por De Datta (1981) reportan que el arroz fertilizado obtiene de 50 a 80 % del nitrógeno del suelo, dependiendo de la capacidad de aporte del mismo y la cantidad de nitrógeno agregado, siendo esta proporción mayor, en términos relativos, en un cultivo sin fertilizar. Por lo cual el cultivo depende mayoritariamente de la mineralización de fuentes orgánicas para la absorción de nitrógeno.

Watanabe et al., citados por De Datta (1981) resumiendo datos de Japón, Indonesia, Tailandia y Filipinas comunicaron que el cultivo de arroz puede captar de 37 a 113 kg de nitrógeno por hectárea de otras fuentes que no sean fertilizantes.

La eficiencia de uso del nitrógeno suministrado como fertilizante varía en un rango de 20 a 60% dependiendo de las condiciones de aplicación (Brady et al., 1981). En el mismo sentido, Deambrosi y Méndez, citados por Castillo et al. (2011) concluyeron que la eficiencia del nitrógeno aplicado como fertilizante es baja, con un valor promedio de 30%. Estos autores obtuvieron una aproximación de la cantidad del nitrógeno derivado del fertilizante que queda en el suelo al momento de la cosecha sin ser tomado por el cultivo, reportando valores promedios de 81, 75 y 17% del nitrógeno agregado a la siembra, macollaje y primordio respectivamente.

2.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS INUNDADOS

En Uruguay el arroz se realiza bajo condiciones de inundación. La misma consta de una etapa inicial, desde emergencia hasta unos 30-40 días posteriormente, donde el cultivo se encuentra en situación de secano, y a partir de ahí se inunda con una lámina de agua de espesor variable (15-20 cm), la cual permanece unos 90 días aproximadamente en forma continua hasta cierto momento previo a la cosecha. De esta forma a lo largo del ciclo del cultivo el suelo se encuentra en condiciones físicas y químicas contrastantes de acuerdo a la etapa en que el mismo se encuentre.

El cambio más importante dado por la inundación en el suelo es la transformación de la rizósfera, la cual pasa de un ambiente aeróbico a uno anaeróbico donde el oxígeno está ausente o es limitante (Patrick y Mahapatra, citados por Fageria et al., 2011).

La presencia de una capa de agua sobre el suelo implica una disminución en la difusión de oxígeno hacia el mismo, por lo que la misma es más lenta que la velocidad a la cual el oxígeno se puede reducir en el suelo. Como resultado de esto se forman dos capas diferenciadas; una capa superficial fina, aeróbica, de 5 a 10 mm de espesor, que contiene oxígeno que llega a través del agua por difusión, y una capa más profunda, de 15 a 20 cm de

espesor, anaeróbica, la cual es la capa más importante ya que ahí se encuentran la mayor parte de las raíces de las plantas (Bouldin, citado por Fageria et al., 2011).

Otra particularidad de los suelos inundados es el impacto ocasionado en la disponibilidad de macro y micronutrientes. Ciertos nutrientes aumentan su disponibilidad al cultivo, mientras tanto otros la disminuyen, ya sea por procesos de fijación por parte del suelo, o lavado, producto de la inundación (Patrick y Mikkelsen, 1971).

2.7.1 Cambios físicos

Inmediatamente luego de la inundación, los niveles de oxígeno empiezan a disminuir. El rápido descenso en la concentración en los niveles de oxígeno está acompañado de un aumento de otros gases producto de la respiración microbiana, tales como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2). Los cambios de concentración de estos gases están asociados con la presencia de biomasa microbiana, materia orgánica, sustancias inorgánica y el cultivar plantado (Patrick y Mikkelsen, 1971).

Según Patrick y Mikkelsen (1971) cuando un suelo es inundado los poros y los agregados se saturan de agua, las arcillas se expanden y comprimen el aire de los poros. Esto disminuye la estabilidad de los agregados, desintegrando los terrones. La permeabilidad disminuye por lo que favorece la economía de agua.

Ghildyal y Tripathi, citados por Fageria et al. (2011) afirman que la inundación también altera la temperatura y estructura de suelo; dada una humedad determinada, a medida que aumenta la densidad aparente, la conductividad térmica también aumenta. Debido que la conductividad térmica de las partículas del suelo es mayor que la del aire, este aumento en la densidad aparente del suelo disminuye el volumen de gases y aumenta el contacto térmico entre las partículas del suelo y como resultado, aumenta la conductividad térmica.

2.7.2 Cambios biológicos

Luego de la inundación los microorganismos aeróbicos se tornan quiescentes o mueren, en tanto proliferan organismos anaeróbicos facultativos y obligados. Estos microorganismos traen consigo una serie de cambios biológicos en el ambiente de suelo reducido. En ausencia de oxígeno estos microorganismos oxidan compuestos orgánicos con la formación de energía a través de un proceso llamado fermentación anaeróbica, la cual tiene como principal producto ácido láctico, el cual luego es convertido a acético, fórmico

y/o butírico. Entre los microorganismos el oxígeno sirve como aceptor de electrones, pero en forma anaeróbica tanto un producto del metabolismo orgánico o una sustancia inorgánica puede sustituir al oxígeno. En suelos inundados la descomposición de la materia orgánica es lenta debido a la baja tasa de asimilación de carbono por parte de bacterias anaeróbicas. En estos suelos los organismos anaeróbicos obligados o facultativo utilizan nitrato, manganeso, hierro, sulfato y productos de la materia orgánica como dióxido de carbono e iones de hidrógeno como aceptor de electrones en la respiración, reduciendo el NO_3^- a N_2^- , el Mn^{2+} a Mn^{4+} , el Fe^{2+} a Fe^{3+} , el SO_4^{2-} a S^{2-} , el CO_2 a CH_4 y el H^+ a H_2 gas (Patrick y Mikkelsen, 1971).

2.7.3 Cambios químicos

Los procesos nombrados anteriormente traen consigo una serie de cambios químicos, siendo los principales la, alteración de pH y la disminución del potencial de óxido reducción (Ponnamperuma, 1972).

2.7.3.1 Cambios en el pH

Pocas semanas posteriores a la inundación el pH de suelos ácidos aumenta y el pH en los suelos calcáreos y/o sódicos disminuye, tendiendo a una neutralidad (Ponnamperuma, 1972). En suelos ácidos se debe a la reducción de los óxidos de hierro (Fe) y manganeso (Mn), que consumen muchos iones de hidrogeno (H^+), mientras que en suelos alcalinos el cambio es provocado por la descomposición de la materia orgánica que produce dióxido de carbono (CO_2), y este reacciona con el agua para formar ácido carbónico, el cual se disocia a H^+ y bicarbonato (HCO_3^- , Fageria et al., 2011). Según Patrick y Reddy (1978) esta disminución del pH en suelos alcalinos y calcáreos está asociada principalmente a dos compuestos, el carbonato de sodio y el carbonato de calcio.

Esta estabilización de pH cercana a la neutralidad trae consigo una serie de cambios favorables para el cultivo, tales como incrementos en la disponibilidad del fósforo, molibdeno y sílice; aumenta la tasa de mineralización de la materia orgánica y la destrucción de ácidos orgánicos; decrece la concentración de aluminio (Al), manganeso (Mn) e hierro (Fe) en suelos ácidos (Ponnamperuma, 1972).

2.7.3.2 Potencial redox

El potencial redox tiene una influencia significativa en la química de los nutrientes de los suelos inundados. Es un buen indicador del grado de anaerobiosis del suelo y permite predecir el comportamiento de varios nutrientes esenciales para la planta (Patrick y Mikkelsen, 1971). En suelos bien

drenados el potencial redox está en el rango de los 400 a 700 mV, mientras que en suelos inundados el potencial redox se encuentra en el rango de -250 a -300 mV (Mikkelsen, 1987).

A medida que el oxígeno se va agotando la reducción de los compuestos inorgánicos del suelo se da en forma secuencial. Los compuestos de Mn y NO_3 son los primeros en reducirse, los compuestos férricos son los intermedios y por último se reducen los sulfatos. La reducción del suelo no tiene efecto sobre el crecimiento del arroz, salvo en situaciones extremas con valores de potencial redox muy bajos, por ejemplo en suelos con bajo contenido de Fe (en los que se puede formar H_2S el cual es tóxico) o en suelos con exceso de Fe, el cual en estas condiciones también es tóxico (Mikkelsen, 1987).

2.8 DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN SUELOS INUNDADOS

La dinámica del nitrógeno en sistemas de producciones similares al nuestro, como ya se mencionó anteriormente, ocurre de una manera diferente a los cultivos realizados en secano, debido a que el suelo inundado ofrece un conjunto de condiciones químicas (oxidación-reducción), físicas (suelo anegado) y microbiológicas (aeróbicas y anaeróbicas), que influyen en el comportamiento del nitrógeno y en su destino final.

Las formas de nitrógeno presentes en suelos inundados son similares a las presentes en suelos aireados. Sin embargo la magnitud relativa de estas formas, particularmente nitrato y amonio, y las transformaciones de nitrógeno, son afectadas marcadamente por el estado oxidativo del suelo. El nitrato es la forma de nitrógeno inorgánico dominante en suelo drenados y aireados, en tanto en suelos inundados la forma de nitrógeno dominante y estable es el amonio (Buresh et al., 2008).

Generalmente el nitrógeno es el principal nutriente limitante en la producción de arroz bajo inundación, por lo que el uso de fertilizantes nitrogenados es fundamental para la sustentabilidad de la producción. Aproximadamente el 20% de la producción de fertilizantes nitrogenados en el mundo está vinculado a esta actividad (Dat Tran, citado por Buresh et al., 2008). Sin embargo la eficiencia en el uso de fertilizantes nitrogenados en este cultivo es típicamente baja, cercana al 20%, debido en parte a las pérdidas de fertilizantes ocasionadas por características únicas de los suelos inundados comparados con los suelos aireados.

Los principales procesos de transformación de nitrógeno, tanto en suelos inundados como en los aireados son la, mineralización, inmovilización, nitrificación, desnitrificación, volatilización del amoníaco y la fijación biológica. La inundación modifica el flujo de estos procesos, y crea una característica

propia de estos suelos, como es la simultánea formación y pérdida de NO_3^- , proceso ocurrido en las capas adyacentes aeróbica y anaeróbica. La inundación de los suelos crea ambientes favorables para pérdidas de nitrógeno vía nitrificación-desnitrificación, volatilización de amoníaco y para ganancias de nitrógeno vía fijación biológica (Buresh et al., 2008).

2.8.1 Mineralización-inmovilización

El proceso de mineralización, es la conversión de nitrógeno orgánico a inorgánico en forma de amonio, el cual queda disponible para las plantas. Según Mikkelsen (1987) se ha demostrado que incluso los cultivos con altos rendimientos y altas fertilizaciones, obtiene más del 50% del nitrógeno total asimilado proveniente de la descomposición del nitrógeno orgánico del suelo. Esta descomposición se caracteriza por ser un proceso realizado en condiciones de anaerobiosis, realizados por distintos microorganismos y con distintos productos finales en comparación con un proceso realizado en suelos aireados. El amonio se acumula en la descomposición anaeróbica debido a la ausencia de oxígeno, el cual es necesario para la conversión de NH_4^+ a NO_3^- (Buresh et al., 2008).

La descomposición de la materia orgánica del suelo es realizada por un amplio número de microorganismos en los cuales se incluyen hongos, bacterias heterotróficas y actinomicetos. La respiración realizada por dichos organismos está asociada con una alta liberación de energía, y la descomposición de sustratos progresa rápidamente con desprendimiento de CO_2 . A medida que la síntesis celular procede hay una alta demanda de nutrientes, principalmente de nitrógeno. Por otro lado la descomposición de la materia orgánica en suelos inundados se lleva a cabo por un número relativamente menor de microorganismos. Estos microorganismos anaeróbicos operan a un nivel de energía menor y son menos eficientes que los aerobios, como consecuencia de la incompleta descomposición de los carbohidratos y una menor síntesis celular por unidad de carbono orgánico degradado (Waksman, Payne, citados por Buresh et al., 2008). Estos procesos de descomposición y síntesis celular son más lentos en condiciones anaeróbicas comparado con condiciones aeróbicas. En suelos en condiciones de aerobiosis los principales productos son CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} , agua y otros residuos. En tanto en condiciones de anaerobiosis los productos finales son CO_2 , CH_4 , ácidos orgánicos, NH_4^+ , H_2S , entre otros (Acharya, 1935).

La descomposición de la materia orgánica del suelo es generalmente más lenta en suelos inundados en comparación con suelos aereados (Acharya, 1935). Por lo que es esperable una menor mineralización bruta de nitrógeno en suelos bajo inundación. Por otro lado la inmovilización bruta en suelos inundados también es menor, debido a los bajos requerimientos metabólicos de

nitrógeno por parte de los microorganismos que llevan a cabo este proceso (Acharya, 1935).

Como resultado de esta menor mineralización bruta e inmovilización bruta, generalmente se da una mayor mineralización neta en suelos inundados, lo que lleva a mayores liberaciones de nitrógeno inorgánico en estos suelos (Tusneem y Patrick, citados por Buresh et al., 2008).

Los microorganismos en sistemas arroceros son un importante sumidero del nitrógeno, tanto el aplicado mediante fertilizantes como el disponible por parte de los residuos del cultivo (Bird et al., 2002). Los mismos autores en una serie de experimentos usando nitrógeno marcado en fertilizantes y residuos en un sistema de arroz en California, encontraron que el destino principal de este nitrógeno era los ácidos húmicos (30%) y la biomasa microbiana (20%). Junto a esto encontraron que la duración de esta inmovilización fue menor por parte de los microorganismos, en comparación con los ácidos húmicos, siendo el primero la principal fuente de nitrógeno recuperado desde el suelo por el cultivo siguiente.

Mikkelsen (1987) demostró que las fuentes de nitrógenos inorgánicas agregadas al suelo, en condiciones de producción similares a las de Uruguay, sufren una rápida inmovilización seguida de una disminución en las tasas de mineralización. La inmovilización neta en suelos inundados es generalmente menor a la experimentada en suelos bien drenados. A pesar de esto se han encontrado rangos que van desde 20 a 80 % de inmovilización del agregado de fertilizante dependiendo de las condiciones.

Según Broadbend, Nakashima y Hauckm, citados por Mikkelsen (1987) los procesos de mineralización pueden alcanzar un rango de 2 a 10 % durante el ciclo del cultivo, pero si miramos la mineralización anual varía en un rango del 1 a 3 % dependiendo de las condiciones. La mineralización puede ser 5 veces más importante para el nitrógeno fijado biológicamente (23.4% mineralizable) en comparación con el nitrógeno nativo del suelo (4.6% mineralizable) (Watanabe, citado por Mikkelsen, 1987).

2.8.2 Fijación de amonio

La acumulación de amonio proveniente de la mineralización y las condiciones generadas por la inundación del suelo son favorables para la fijación de amonio en suelos con altas cantidades de arcillas de tipo 2:1 (Wen y Cheng, Schneiders Scherer, Zhang y Scherer, citados por Buresh et al., 2008). Según Mikkelsen (1987) los iones de amonio fijados pueden ser liberados cuando el contenido de amonio intercambiable disminuye por debajo de un punto de equilibrio, como resultado de la absorción por parte de las plantas y la

lixiviación. Mediante el uso de nitrógeno marcado Keerthisinghe et al., citados por Mikkelsen (1987) demostraron que el amonio no intercambiable era liberado en suelos inundados, tomando valores cercanos a 2,2% del nitrógeno total absorbido por las plantas. También concluyeron que este aporte proveniente del amonio fijado tiene una relación inversa a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. La fijación temporaria de amonio podría proteger las pérdidas de nitrógeno, al mismo tiempo permite un oportuno aporte de amonio para las plantas.

2.8.3 Fijación biológica de nitrógeno

El ambiente en suelos inundados es favorable para la fijación biológica de nitrógeno (FBN) debido a la ausencia de oxígeno y un suministro adecuado de carbono. Los aportes por esta vía ayudan a sostener el aporte por parte del suelo y mantener la materia orgánica del suelo, estos aportes son responsables por el mantenimiento de los rendimientos de arroz durante cientos de años aún con bajas fertilizaciones nitrogenadas. Los balances de nitrógeno en sistemas arroceros a largo plazo sin fertilización nitrogenada muestran un mantenimiento del nitrógeno total del suelo, como resultado de esta fijación biológica llevada a cabo por microorganismos tanto de vida libre como asociativos (App et al., citados por Buresh et al., 2008).

Los microorganismos fijadores de nitrógenos conocidos como diazótrofos pueden ser agrupados en dos grupos, los propios del sistema y los exógenos a él. El sistema autóctono de FBN comprende cianobacterias y bacterias fototróficas que habitan el agua y la rizófera del suelo. En tanto la flora exógena abarca diazótrofos fijadores de N_2 como cianobacterias que viven en simbiosis, *Azolla spp.* y rizobios tanto heterotróficos como fototróficos asociados a leguminosas acuáticas. Este último sistema no es propio de ecosistemas arroceros, por lo que requiere una previa inoculación (Kundu y Ladha, 1997).

La FBN llevada a cabo por ambos grupos ocurre tanto durante el ciclo del cultivo, como también entre cultivos dependiendo de la disponibilidad hídrica. El aporte autóctono por parte de la FBN se encuentra en rangos de 15 a 50 kg de nitrógeno por hectárea para sistemas arroceros bajo inundación (Roger y Ladha, citados por Buresh et al., 2008). Estos aportes son inversos a las aplicaciones nitrogenadas (App et al., citados por Buresh et al., 2008). Las variaciones en los aportes se explican por la actividad y ritmo de crecimiento de estas cianobacterias y bacterias fototróficas las cuales se condicionan por factores tales como condiciones de pH bajo, baja concentración de fósforo, presencia de herbívoros y también por el alto contenido de amonio presente en el suelo (Grant et al., citados por Buresh et al., 2008).

2.8.4 Volatilización de amoníaco

La volatilización de amoníaco es un proceso importante de pérdida de nitrógeno del sistema suelo-planta cuando fertilizantes nitrogenados son agregados en superficie, fundamentalmente en suelos alcalinos. Además de esto la volatilización de amoníaco puede ser mayor en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico, y ausencia de sitios específicos para adsorción del ion amonio (Fenn y Hossner, citados por Fageria, 2013).

La urea, uno de los fertilizantes más usados en el arroz, es hidrolizada rápidamente en la semana posterior a su aplicación en suelos inundados (Fillery y De Datta, 1986). El nitrógeno amoniacal formado de esta hidrólisis se acumula en dichos suelos y su pico de concentración se produce de 1 a 5 días posteriores a la aplicación. Altas concentraciones de nitrógeno amoniacal en el suelo, acompañado de altos pH y temperaturas favorecen la pérdida de fertilizantes nitrogenados vía volatilización de amoníaco (Vlek y Stumpe, Cai, citados por Buresh et al., 2008).

La magnitud de estas pérdidas, en condiciones de inundación, está directamente relacionada al contenido de amoníaco acuoso o a la presión parcial de amoníaco en el agua o en la zona de contacto con la atmosfera. La proporción del nitrógeno total correspondiente a amoníaco acuoso, está directamente relacionado con el pH del agua y la temperatura. El amoníaco acuoso, a pH y concentración de nitrógeno amoniacal constante, aumenta linealmente con la temperatura, resultando en un aumento de casi cuatro veces con un cambio de la temperatura de 10 a 40 ° C (Vlek y Craswell, citados por Buresh et al., 2008). El pH del agua es sin embargo el factor más importante en las pérdidas de nitrógeno como amoníaco por sobre la temperatura (Jayaweera y Mikkelsen, citados por Buresh et al., 2008).

La actividad fotosintética de la biomasa acuática en suelos inundados y en la superficie de los suelos saturados resulta en el agotamiento del CO₂ durante el día, acompañado de una elevación del pH del agua. El pH en suelos inundados, típicamente muestra un patrón diurno sincronizado con el ciclo fotosintético y la respiración neta o con el agotamiento o presencia de CO₂ en estos suelos (Mikkelsen et al., citados por Buresh et al., 2008).

Las pérdidas de amoníaco, el pH del suelo, la presión parcial del amoníaco alcanzan su pico generalmente entre las 12 y 14 horas y son más bajas durante la noche (Denmead et al., citados por Buresh et al., 2008). Elevaciones en el pH al medio día en estos suelos por encima de 9 en la semana siguiente a la fertilización nitrogenada, han sido reportadas comúnmente en sistemas arroceros (Fillery y De Datta, 1986).

Pérdidas de amoníaco por aplicaciones de fertilizantes en etapas tempranas del cultivo aumentan linealmente con la velocidad del viento y la presión parcial del amoníaco (Fillery y De Datta, 1986). El aumento en la velocidad del viento favorece las pérdidas de amoníaco mediante la aceleración de la transferencia de amoníaco por fuera de la interfase agua-atmosfera, por lo tanto manteniendo un gradiente en la presión parcial de amoníaco entre el agua y la atmosfera próxima (De Datta, 1981).

En la década de los 80 numerosos experimentos, en diversas localidades se realizaron con la intención de cuantificar las pérdidas de nitrógeno por esta vía en lo que refiere a, métodos, momentos y dosis de urea aplicada (De Datta y Buresh, citados por Buresh et al., 2008).

Las pérdidas encontradas se pudieron observar pocas horas luego de la aplicación y llegaron hasta más de 50% entre 7 y 10 días posteriores a la aplicación. Esta diferencia se explica por un mayor sombreado por parte del cultivo en etapa avanzada, la cual reduce la actividad fotosintética de la biomasa acuática, por lo tanto reduce el agotamiento de CO_2 y la asociada elevación de pH y presión parcial de amoníaco. La presencia de una mayor biomasa del cultivo contribuye a disminuir las pérdidas de amoníaco por la disminución en el intercambio gaseoso en la interfase atmosfera-suelo inundado (Humphreys et al., citados por Buresh et al., 2008).

La acumulación de nitrógeno amoniacal en suelos inundados puede ser reducida mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados a suelos que se encuentren a capacidad de campo y luego se inunden (De Datta et al., Schnier et al., Devasenapathy y Palaniappan, citados por Buresh et al., 2008), la aplicación de fertilizantes nitrogenados inmediatamente antes de la inundación en suelos secos (Bacon et al., Humphreys et al., citados por Buresh et al., 2008), fertilizantes de liberación controlada (Oertli, citado por Buresh et al., 2008) e inhibidores de la ureasa (Buresh et al., Byrnes y Amberger, Freney, citados por Buresh et al., 2008).

2.8.5 Nitrificación-desnitrificación

La nitrificación es la conversión biológica de NH_4^+ a NO_3^- , proceso que requiere oxígeno libre. Por esta razón este proceso se da únicamente en la capa oxidada de los suelos inundados, que se encuentra en la estrecha zona de contacto entre suelo y agua, además de en la rizósfera. El amonio que se encuentra en esta zona aeróbica proviene vía amonificación de la materia orgánica, de ingresos externos, principalmente vía fertilizantes, y mediante la difusión de amonio proveniente de la capa anaeróbica del suelo. El nitrato formado a partir de este amonio vía nitrificación es estable en una zona aeróbica, pero puede ser rápidamente reducido en zonas adyacentes

anaeróbicas del suelo. Por este motivo, la disponibilidad de oxígeno es el factor más limitante para la nitrificación en suelos agrícolas inundados (Buresh et al., 2008).

El nitrato no se acumula en la zona anaeróbica debido a la alta demanda de éste para servir como aceptor de electrones en ausencia de oxígeno. La desnitrificación es la reducción desasimilativa de NO_3^- , donde este sirve como aceptor final de electrones y es reducido a productos finales gaseosos como óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno gas (N_2). La desnitrificación es llevada a cabo por microorganismos heterotróficos, y la velocidad de este proceso depende de la concentración de NO_3^- y la disponibilidad de CO_2 , el cual sirve como fuente de energía o dador de electrones. El suministro de NO_3^- que se origina en la zona aeróbica es generalmente el factor limitante para la desnitrificación en suelos inundados (Aulakh et al., citados por Buresh et al., 2008).

Según Buresh et al. (2008) en suelos inundados, la demanda de NO_3^- como aceptor de electrones es generalmente mucho mayor comparado con la demanda del mismo para servir como fuente de nitrógeno para los microorganismos y las plantas. En estas condiciones de suelo se promueve la acumulación de amonio, siendo éste la principal fuente de nitrógeno para microorganismos y plantas. La reducción asimilativa de NO_3^- solo ocurre cuando las concentraciones de NH_4^+ son bajas y las de NO_3^- son altas.

La reducción desasimilativa de NO_3^- a NH_4^+ es realizada por microorganismo anaerobios estrictos (Caskey y Tiedje, citados por Buresh et al., 2008) y consecuentemente requiere la presencia de NO_3^- en una zona estrictamente anaeróbica (Buresh y Patrick, 1981). Sin embargo esta representa una pequeña fracción del total de la reducción asimilativa de NO_3^- en suelos inundados. La reducción de NO_3^- a NH_4^+ representa el 5% de la reducción total de NO_3^- en estos suelos (Buresh et al., 2008). La desnitrificación es el camino principal de reducción asimilativa de NO_3^- en suelos inundados (Patrick, Aulakh et al., citados por Buresh et al., 2008).

Una característica de los suelos inundados con importantes implicancias en el ciclo del nitrógeno es la presencia de dos zonas adyacentes una aerobia donde ocurre la nitrificación y una anaerobia donde ocurre la desnitrificación. Los ambientes adecuados para el crecimiento de microorganismos nitrificantes y desnitrificantes son mutuamente excluyentes, pero el transporte de los sustratos y productos entre estas zonas permite que ocurran ambos procesos, la nitrificación y la desnitrificación. Las pérdidas de nitrógeno mediante estos procesos acoplados y simultáneos es una característica única de suelos inundados (Reddy y Patrick, 1986). El nitrato derivado del proceso de nitrificación en la zona aerobia logra difundir

rápidamente a las zonas anaerobias del suelo, donde puede ser utilizado como aceptor de electrones y reducirse generalmente a N_2O y N_2 .

El rápido pasaje de NO_3^- de la zona aeróbica a la zona anaeróbica se ve favorecido por un gradiente de concentración de NO_3^- entre las dos zonas, generado por la gran demanda de aceptores de electrones y el suficiente suministro de donantes de electrones (carbono orgánico disponible) en las zonas anaeróbica (Reddy y Patrick, 1986). Debido a que el nitrato se pierde rápidamente vía desnitrificación, niveles bajos de nitratos en suelos inundados no refleja necesariamente bajas pérdidas de nitrógeno vía nitrificación-desnitrificación.

Además de la capa aeróbica del suelo, la rizósfera es un sitio importante donde potencialmente puede ocurrir este proceso (Arth et al., Arth y Frenzel, citados por Buresh et al., 2008).

Mosier et al., citados por Buresh et al. (2008) realizaron experimentos en India donde encontraron que la evolución de las pérdidas de N_2 y N_2O era inferior al 10 % de las pérdidas totales de aplicaciones de urea. Por otro lado, investigaciones realizadas por Chen et al., citados por Buresh et al. (2008) apoyan la idea de que las pérdidas de nitrógeno vía desnitrificación están limitada por la tasa de nitrificación.

Estimaciones indirectas de las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación provenientes de la urea aplicada, descontando del nitrógeno perdido total el nitrógeno perdido vía volatilización, alcanzaron valores de hasta 50%, llevan a la especulación que los procesos de volatilización de NH_3^+ y desnitrificación eran mecanismos de pérdidas complementarios (De Datta y Buresh, Freney et al., citados por Buresh et al., 2008). En tal sentido el manejo en aplicaciones de urea para reducir las pérdidas vía volatilización de NH_3^+ podría llevar a un aumento simultáneo en la desnitrificación, resultando en un bajo o nulo efecto en las pérdidas totales. Sin embargo estos estudios presentan una alta varianza, debido a los métodos indirectos utilizados para la cuantificación de las variables.

El drenaje y secado de suelos inundados aumenta la penetración de oxígeno y los poros en el suelo ocupados por éste. Esto puede llevar a aumentos en la nitrificación, generado por un aumento en el número de microorganismos nitrificantes. El nitrato remanente en el suelo al momento de la inundación puede ser utilizado rápidamente como aceptor de electrones debido al agotamiento del oxígeno y por lo tanto desnitrificarse a N_2 y N_2O . Numerosos estudios se han realizado y demostraron aumentos en las pérdidas de nitrógeno a través de esta vía realizando prácticas de secado e inundación (Patrick y Wyatt, Sah y Mikkelsen, Sharif Zia y Waring, citados por Buresh et al., 2008).

Como regla general la magnitud de estas pérdidas de nitrógeno dependen de la cantidad de nitrato acumulado en el suelo durante el período seco, el cual es el sustrato principal para este proceso.

La mayoría de los sistemas de producción de arroz, se caracteriza por una etapa de secado entre cultivos y se genera un ambiente aeróbico, lo cual favorece la nitrificación y acumulación de nitrato (George et al., Ladha et al., citados por Buresh et al., 2008). Este nitrato acumulado se desnitrifica luego de la inundación (Buresh y De Datta, citados por Buresh et al., 2008).

Las pérdidas de fertilizantes nitrogenados por medio de la desnitrificación pueden ser controlados mediante el control de la nitrificación, la acumulación de nitrato puede ser regulada por la aplicación de fertilizantes nitrogenados a zonas anaeróbicas de suelo (Reddy y Patrick, citados por Buresh et al., 2008), el agregado de fertilizantes con inhibidores de la nitrificación (Keerthisinghe et al., citados por Buresh et al., 2008) y el uso de fertilizantes de liberación controlada (Shoji y Kanno, citados por Buresh et al., 2008).

2.8.6 Lixiviación

La lixiviación no es un mecanismo de pérdida importante en sistemas arroceros, los cuales en su gran mayoría se realizan sobre suelos con baja infiltración. El nitrato se puede acumular durante el período previo a la inundación y una pequeña parte de este se puede perder por lixiviación una vez saturado el suelo (Becker et al., citados por Buresh et al., 2008).

La inundación puede transportar el nitrógeno amoniacal proveniente de la fertilización hacia el interior del suelo, donde se predispone más a la nitrificación y desnitrificación que a la volatilización de amoníaco. Si esto es acompañado por una baja disponibilidad de carbono en el subsuelo se puede limitar la desnitrificación (Aulakh et al., citados por Buresh et al., 2008), lo que podría llevar a una acumulación de nitrato por debajo de la zona radicular del cultivo. El uso ineficiente de la inundación y las elevadas fertilizaciones nitrogenadas son reconocidas por haber contribuido en el aumento de contaminaciones de aguas subsuperficiales con nitrato (Bijay-Singh et al., Bijay-Singh y Yadvinder Singh, citados por Buresh et al., 2008).

2.9 MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA

El sistema arrocero uruguayo presenta algunas características que lo diferencian de la mayoría de los sistemas productores del mundo. Dentro de las más importantes encontramos aspectos agronómicos como la siembra en suelo seco, la rotación con otros cultivos, el uso de pasturas con leguminosas en un

porcentaje cercano al 25% de la superficie nacional, una alta variabilidad en los tipos de suelos y micro cuencas climáticas, mencionándose dentro de los aspectos logísticos una alta tecnificación e integración en todas las etapas de la cadena arrocerá (MGAP. DIEA, 2016).

Esta diversidad de situaciones (manejos, suelos, antecesores, historia, etc.) podría significar que la oferta de nitrógeno no sería igual para todas las situaciones, por lo que contar con parámetros que ayuden a identificar esas situaciones resultarían en una herramienta de utilidad (Castillo et al., 2014).

Según Chebataroff (2012) para nuestro sistema de producción el fraccionamiento de las dosis de nitrógeno permite reducir las pérdidas de nitrógeno provenientes de las fertilizaciones, principalmente la de macollaje por volatilización. Cuando se compararon las pérdidas según los momentos de aplicación, se encontró que aplicaciones en etapas tempranas del cultivo, 21 días luego de instalado, presentaban mayor magnitud que las aplicaciones realizadas en el cultivo en estado de iniciación panicular. En una serie de experimentos realizados en Filipinas que contabilizaron pérdidas de nitrógeno por esta vía en aplicaciones tempranas, tomaron valores con rangos de 27 a 56 % del nitrógeno proveniente de la urea. En tanto las pérdidas encontradas en aplicaciones a iniciación panicular, en contraste con lo anterior fueron inferiores, tomando valores de 10 a 15 % (Fillery y De Datta, 1986).

En nuestras condiciones de manejo del cultivo, se ha demostrado la conveniencia de aplicar el nitrógeno en forma fraccionada de acuerdo a las necesidades de las plantas, minimizando las posibilidades de pérdida del nutriente e incrementando su eficiencia de uso (Chebataroff y Deambrosi, Ferrés y Píriz, citados por Deambrosi y Méndez, 2007). Según la capacidad de suministro de nitrógeno del suelo, se recomienda dividir la aplicación de nitrógeno en dos o tres épocas (siembra, macollaje y primordio). De acuerdo a los resultados obtenidos en 3 años de evaluación (Deambrosi y Méndez, Deambrosi et al., citados por Deambrosi y Méndez, 2007), se sugiere realizar las aplicaciones de macollaje en suelo seco, con inmediata inundación del cultivo lo que permite reducir las pérdidas.

Barrios y Adams (1996) confirman la influencia de la tecnología de fertilización (dosis, época y forma de aplicación) sobre el aprovechamiento del nitrógeno, lo cual se traduce en mayor contenido de nitrógeno en planta y rendimiento en materia seca. La aplicación fraccionada del fertilizante ofrece a la planta una mayor disponibilidad de nitrógeno durante todo su ciclo, explicando porque en determinadas situaciones el fertilizante aplicado en forma fraccionada determina mayor rendimiento que el suministrado en una única aplicación.

Evatt y Hodges, citados por Gamarra (1996) enfatizan en que el fraccionamiento de la fertilización se hace necesario debido a que es difícil determinar la dosis necesaria antes de la zafra, las dosis demasiado elevadas pueden incrementar el vuelco y promover la infestación por malezas, y ésta constituye en una importante práctica en reducir las pérdidas de nitrógeno.

Por otro lado, De Datta (1981) estableció que no existen ventajas en aplicar el nitrógeno en forma fraccionada, si la variedad utilizada es resistente al vuelco y se cultiva sobre un suelo de alta fertilidad. Si no se cumplen dichas condiciones, los rendimientos se ven significativamente aumentados por realizar el fraccionamiento de la fertilización nitrogenada.

En Uruguay a partir de la zafra 2011/2012 se viene realizando trabajos experimentales con el objetivo de evaluar la respuesta en rendimiento frente al agregado de nitrógeno a macollaje (V5) y primordio (R0). Estos trabajos revelaron que los indicadores, potencial de mineralización de nitrógeno del suelo (PMN), y absorción de nitrógeno por el cultivo, son de mejor ajuste para modelar la respuesta a fertilizaciones nitrogenadas para cada momento respectivamente (Castillo et al., 2014).

En el primer caso este indicador permitió ajustar un modelo que indica dos zonas, una de respuesta lineal con un ajuste sobre los datos observados de ($R^2 = 0,62$) y una de no respuesta a partir de 53,6 ppm de NH_4^+ , valor el cual se identificó como nivel crítico (NC).

El equivalente de fertilizante encontrado es de 2 kg de nitrógeno por hectárea, por unidad de P.M.N. a subir hasta el NC (Castillo et al., 2014, anexo No. 1).

En tanto, para el estadio de R0 el indicador de mejor ajuste fue kg ha^{-1} de nitrógeno absorbido, pero el mismo presentó un menor ajuste comparado con el estadio anterior ($R^2 = 0,47$). El NC establecido para este estadio es de $51,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno absorbido.

El equivalente de fertilizante para este caso es de 6 kg de nitrógeno por hectárea por kg de nitrógeno absorbido por debajo del NC (Castillo et al., 2014, anexo No. 2)

2.10 ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

2.10.1 Espectro de luz

Las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, y viajan a través del espacio a través de los fotones, sin necesitar de un medio

físico (Rinker, 1994). El espectro electromagnético de radiación incluye diferentes ondas que van desde las de radio, microondas, ondas infrarrojas, luz visible, luz ultravioleta, rayos X, hasta rayos gamma, según su longitud. La luz visible está entre los 300 y 700 nanómetros, del rojo al azul.

La distancia de un máximo de la onda con el de la siguiente es la longitud de onda, mientras que el número de picos que pasan por un punto fijo en el espacio por unidad de tiempo, es la frecuencia. El comportamiento de las radiaciones electromagnéticas depende de su longitud de onda. Cuando la radiación electromagnética interactúa con átomos y moléculas puntuales, su comportamiento también depende de la cantidad de energía por quantum que lleve (Rinker, 1994).

Según Campbell (2007) la región del espectro que corresponde a la parte visible es muy pequeña, sin embargo la mayoría de la radiación que llega a la Tierra es de esta naturaleza. La mayoría de los sistemas de sensores remotos operan en una o varias fajas del espectro visible, el infrarrojo y microondas.

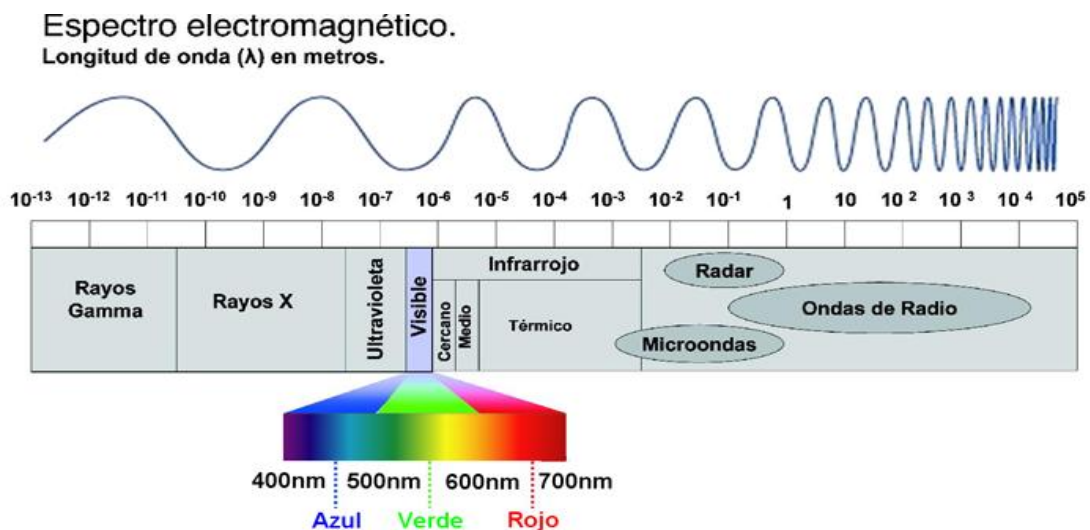


Figura No. 1. Espectro electromagnético (Fuente: Campbell, 2007).

2.10.2 Principios fisiológicos y técnicos

Las propiedades radiactivas de una superficie vegetal determinan su capacidad para absorber, reflejar y transmitir la luz. Los canopeos verdes con concentraciones adecuadas de nitrógeno y clorofila, absorben la luz fotosintéticamente activa (RFA, roja y azul), y reflejan la luz verde e infrarroja, delineando un patrón característico (Campbell, 2007).

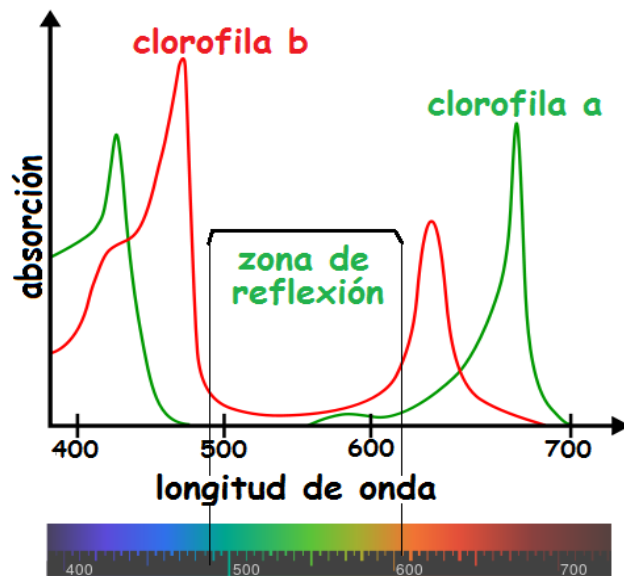


Figura No. 2. Absorción de luz por parte de las plantas (Fuente: Campbell, 2007).

En contraste con la absorción y utilización del RFA (400-700 nm), las hojas evolucionaron para dispersar (reflejar y transmitir) la radiación solar infrarroja (mayor a 700 nm), porque su nivel energético por fotón no es termodinámicamente suficiente para impulsar la síntesis de moléculas orgánicas (Campbell, 2007).

Los sensores remotos permiten cualificar y cuantificar el flujo de energía radiante. Los cuatro procesos (emisión, absorción, reflectancia y transmisión) ocurren simultáneamente y sus intensidades relativas en las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, caracterizan los contenidos de clorofila, nitrógeno o agua en la vegetación, obteniendo respuestas espectrales que representan dichos contenidos. La respuesta espectral de la vegetación puede variar en función de muchos factores tales como; tipo, densidad, fase fenológica, estado nutricional, condición fitosanitaria y el contenido de humedad entre otros. Estos factores pueden ser modificados en el caso de que ocurran fenómenos meteorológicos adversos o incidencias de plagas o enfermedades en el caso de los cultivos (Sá y Almorox, citados por Ramos García, 2015).

2.10.3 Índice de vegetación de diferencia normalizada

El NDVI es un índice que permite integrar y analizar mediciones de luz del espectro en las zonas del rojo y rojo lejano, realizados con sensores

remotos o próximos a las plantas, e identificar la presencia de vegetación verde y viva con base en su reflexión en los ámbitos de frecuencia de la luz correspondiente a estas longitudes de onda. Por este motivo, existe una fuerte relación del índice verde con algunas características de la vegetación como puede ser la biomasa, el índice de área foliar (IAF) o la productividad, entre otras (Sellers, 1985).

Fuentes Ponce et al. (2010) concuerdan con lo mencionado anteriormente, en donde el NDVI ha sido correlacionado con numerosas variables como la deficiencia de nutrientes en los cultivos, el rendimiento de cereales de grano, y el estrés hídrico prolongado de las plantas. Sin embargo, más que reflejar el efecto de un solo parámetro, el NDVI tiene que ser considerado como una medida del crecimiento integral de la planta, incluyendo factores que intervienen en dicho crecimiento.

Investigaciones realizadas en India, han mostrados resultados alentadores acerca de esta tecnología. Ali et al. (2013) encontraron relaciones importantes entre el nitrógeno absorbido a primordio y el rendimiento en grano. El rendimiento en grano también se correlacionó altamente ($R^2= 0,79$) con las lecturas de NDVI a primordio. Y este último indicador se correlacionó positivamente ($R^2= 0,68$) con el nitrógeno absorbido en dicho estadio. Estos resultados nos llevan a plantearnos la interrogante del posible uso de esta herramienta para diagnosticar el estado nutricional del cultivo de manera sencilla, y para un posible ajuste de fertilizaciones nitrogenadas de manera de maximizar la eficiencia en el uso de este insumo.

La ecuación que lo define es la siguiente:

$$NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED)$$

Donde RED (micromoles/metro²/segundos) es la radiación roja incidente sobre la superficie vegetal (570-680nm) y NIR (micromoles/metro²/segundos) es la radiación infrarroja reflejada por ella (725-1020 nm, Jones et al., 2007).

Debido a su normalización, los rangos de mediciones de NDVI se encuentran entre -1 y 1, siendo los valores más altos (0,7-0,8) indicadores de plantas en las mejores condiciones. Un valor de 1 representaría la densidad de plantas más alta posible de hojas verdes y saludables (Viney et al., Monteith y Unstworth, citados por Gutiérrez-Soto et al., 2011). Los suelos descubiertos generan valores positivos bajos (0,1-0,2) y el agua libre valores que van desde -0,1 hasta 0,1 o 0,2 (Huete, 1988). Esto puede influir a la hora de realizar las mediciones en el cultivo de arroz, dado las condiciones en que se practica el mismo.

2.10.4 GreenSeeker

El GreenSeeker (Trimble Inc.) es un instrumento que provee un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los cultivos (Inman et al., 2005).

Yao et al. (2013) en estudios realizados en China utilizando diferentes sensores remotos para estimar el rendimiento potencial del cultivo de arroz, encontraron que lecturas de NDVI se asociaban positivamente ($R^2= 0,42$) con el rendimiento potencial del este cultivo.

Dicha herramienta utiliza diodos que emiten la luz con base en la cual se calcula el NDVI. La luz incidente natural es separada de la producida por el instrumento electrónicamente. Una señal de voltaje permite cuantificar las razones de NIR y de RED pertenecientes de los diodos (Jones et al., citados por Gutiérrez-Soto et al., 2011).

Este sistema provee información obtenida en forma rápida mediante mediciones terrestres que pueden contribuir a disminuir los costos de producción, porque permitiría aplicar la cantidad exacta de fertilizante y agua y la mitigación del estrés en el momento apropiado y en el lugar correcto (Verhulst et al., 2009), reduciéndose así el gasto de insumos agrícolas de alto costo financiero y ambiental.

2.11 INIA MERÍN

INIA Merín (ex L5903) es un nuevo cultivar de arroz del subtipo índico creado y lanzado por el programa de mejoramiento genético de INIA. Dicha variedad resalta principalmente en rendimiento, calidad molinera e importante resistencia a brusone (*Pyricularia oryzae Cav.*, Pérez de Vida et al., 2016).

2.11.1 Características agronómicas

Este cultivar se caracteriza por su gran macollaje, porte erecto y con elevada resistencia al vuelco, alcanzando una altura máxima de 85 cm. El largo de la hoja bandera es de 25 cm. Tiene un ciclo de siembra a 50% de floración de 111 días, estadísticamente similar que su progenitor INIA Cuaró y El Paso 144, y levemente mayor a Olimar. Además presenta una alta respuesta a la fertilización nitrogenada asociada al mantenimiento de un índice de área foliar (IAF) a floración no muy elevado (6,5-7).

En lo que se refiere a enfermedades por hongos, en el caso de brusone presenta reacción de resistencia en hoja. En la evaluación realizada en la zafra

2012/2013 así como en años anteriores la reacción en hoja y cuello de panoja de este material fue de 1 (resistente), mientras que en los testigos (El Paso 144 y Olimar) alcanzaron valores de 7 y 8 (susceptible). En cuanto a enfermedades de tallos lo más encontrado son síntomas asociados a *Sclerotium oryzae* Catt, con muy baja frecuencia *Rizoctonia oryzae-sativae* Mordue.

La productividad de este cultivar es 5% superior a los de los cultivares comerciales más utilizados, El Paso 144 e INIA Olimar. En lo que respecta a calidad de grano la variedad presenta valores superiores de % de blanco total respecto a las demás variedades comerciales. En tanto el % de grano entero resulta superior solamente en algunas localidades. Respecto al % de granos yesosos se encontraron valores intermedios a los obtenidos en El Paso 144 (7,1-10,7) e INIA Olimar (4,5-6, Pérez de Vida et al., 2016).

2.12 HIPÓTESIS

Las hipótesis manejadas son que existe respuesta diferencial en rendimiento a la aplicación de nitrógeno y que existe una asociación importante entre las lecturas de índice verde y el contenido de nitrógeno en planta en arroz, indicador éste que se recomienda utilizar en la actualidad, para realizar recomendaciones de re-fertilización nitrogenada durante el cultivo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

Se realizaron tres ensayos similares en la zona centro del país en el departamento de Tacuarembó, en las localidades de Paso Casildo, Pueblo del Barro y Cerro Cardozo, difiriendo entre sí únicamente en el antecesor, que fueron campo nuevo, retorno largo de pradera y rastrojo de arroz, respectivamente.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Cada ensayo consistió de 6 tratamientos (diferentes estrategias de fertilización nitrogenada) con 3 repeticiones distribuidas completamente al azar, constituyendo un total de 18 unidades experimentales por ensayo. Las unidades experimentales eran parcelas de 32 m² (4x8 m) en todos los casos, y las mismas no contaban con la presencia de taipas.

En el ensayo de Paso Casildo, debido a factores de manejo que afectaron los resultados de una repetición, se decidió eliminar los tratamientos de la misma.

3.3 TRATAMIENTOS

1. (Test) Testigo (sin N a macollaje ni a primordio)
2. (PMN) Corrección de fertilización nitrogenada a macollaje en base a PMN y sin fertilización nitrogenada a primordio
3. (INDI) Corrección de fertilización nitrogenada a macollaje en base a PMN y corrección de N a primordio en base a absorción de nitrógeno
4. (PR/2) Corrección de fertilización nitrogenada a macollaje en base a PMN y corrección de N a primordio con la mitad de la dosis en base a absorción de nitrógeno
5. (PR*2) Corrección de fertilización nitrogenada a macollaje en base a PMN y corrección de N a primordio con el doble de la dosis en base a absorción de nitrógeno
6. (PLUS) 30% más con relación a corrección por indicador a macollaje y 30% más con relación a corrección por indicador a primordio

Cabe destacar que las dosis aplicadas a primordio en los tratamientos 3, 4 y 5 se basan en la información obtenida de muestras mezcla de estos ya que hasta aquí tenían el mismo manejo, mientras que la dosis a primordio aplicada al tratamiento 6 se basa en información obtenida del propio tratamiento (biomasa y % de nitrógeno).

3.4 MODELO ESTADÍSTICO

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$j = 1, 2, 3$$

Dónde:

Y_{ij} = corresponde a la variable aleatoria observable

μ = media poblacional

α_i = efecto del "i-ésimo" tratamiento

ε_{ij} = error experimental

Supuestos:

- ε_{ij} son variables independientes,
- idénticamente distribuidas,
- su distribución es NORMAL
- $E[\varepsilon_{ij}] = 0$
- $V[\varepsilon_{ij}] = \sigma^2$ constante para todo i, j ε_{ij} iid $N(0, \sigma^2)$
- El modelo es correcto y aditivo en relación al material experimental.
- No existe interacción entre los tratamientos

Hipótesis estadísticas

1) $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$

H_a : al menos una media es diferente

2) $H_0: \beta_1 / \beta_2 = 0$

$H_a: \beta_1 / \beta_2 \neq 0$

Hipótesis agronómica

- 1) H_0 : no existen diferencias en los rendimientos alcanzados con los manejos de fertilización nitrogenada evaluados
 H_a : al menos uno de los manejos en fertilización nitrogenada explica una respuesta diferencial en el rendimiento del cultivo.
- 2) H_0 : no existe correlación entre lecturas de NDVI a primordio y el status nitrogenado del cultivo de arroz en dicho estadio.

Ha: existe una fuerte y significativa correlación entre lecturas de NDVI a primordio y el status nitrogenado del cultivo de arroz en dicho estadio.

3.5 MANEJO DE LOS ENSAYOS

Las muestras para los análisis de suelo, en lo que se refiere a % de materia orgánica (M.O), pH y nutrientes fueron obtenidas aproximadamente un mes previo de la siembra. En tanto la muestra utilizada para obtener los datos de PMN fue realizada, pocos días pre-siembra siguiendo el protocolo establecido para dicho muestreo, detallado en anexos (ver anexo No. 3).

3.5.1 Ensayo Paso Casildo

Este ensayo se estableció sobre un campo nuevo, al que se le aplicó herbicida glifosato a fines de otoño del 2015. Posteriormente en invierno se realizó el laboreo, que consistió en una pasada de excéntrica, dos pasadas de disquera y dos pasadas de landplane.

La siembra se realizó el 20 de octubre de 2015, con una densidad de semilla de 140 kg ha⁻¹ con una distancia entre hilera de 0,17 m y posteriormente se prosiguió a la construcción de taipas y resembrado de las mismas.

Cuadro No. 1. Análisis de suelo de Paso Casildo

pH H ₂ O	M.O %	P ac. cit. ppm	K meq 100g ⁻¹	Ca meq 100g ⁻¹	Mg meq 100g ⁻¹	PMN mg kg ⁻¹ NH ₄ ⁺
5,3	3,08	8	0,13	10,6	3,7	33

Fuente: INIA. La Estanzuela. Laboratorio de Suelos.¹

La fertilización en la base del cultivo se realizó en base a datos de análisis de suelo e historia de chacra, sin considerar niveles críticos. La misma constó en 120 kg ha⁻¹ de 5(N)-25(P)-25(K) más 50 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio (KCl) y una fertilización complementaria pre-siembra de 100 kg ha⁻¹ de KCl.

3.5.2 Ensayo Pueblo del Barro

Este ensayo se realizó posterior a un retorno largo desde pradera (4 años). La aplicación de glifosato para la desecación de dicha pradera se efectuó a principios de primavera, luego se prosiguió con un laboreo reducido que constó de dos pasadas de disquera y dos pasadas de landplane y

¹ INIA. La Estanzuela. Laboratorio de Suelos. 2016. Análisis de suelos (sin publicar).

posteriormente se hizo la sistematización pre-siembra. La siembra se realizó el 5 de octubre, a una densidad de 170 kg ha⁻¹ y una distancia entre hileras de 0,19 m.

Cuadro No. 2. Análisis de suelo de Pueblo del Barro

pH H ₂ O	M.O %	P ac. cit. ppm	K meq 100g ⁻¹	Ca meq 100g ⁻¹	Mg meq 100g ⁻¹	PMN mg kg ⁻¹ NH ₄ ⁺
5,8	2,3	13	0,21	7,5	3,3	12

Fuente: INIA. La Estanzuela. Laboratorio de Suelos.¹

La fertilización basal en este caso fue de 50 kg ha⁻¹ de 18(N)-46(P) y 50 kg ha⁻¹ de KCl, más una fertilización complementaria post-siembra de 70 kg ha⁻¹ de KCl.

3.5.3 Ensayo Cerro Cardozo

El mismo se instaló sobre un rastrojo de arroz, sobre el cual a fines de invierno se le hizo un laboreo reducido que constó de dos pasadas de disquera y dos pasadas de landplane. La siembra se efectuó el 6 de octubre, a una densidad de 140 kg ha⁻¹ y una distancia entre hileras de 0,19 m. Luego se realizó la sistematización de la chacra y resembrado de taipas.

Cuadro No. 3. Análisis de suelo de Cerro Cardozo

pH H ₂ O	M.O %	P ac. cit. ppm	K meq 100g ⁻¹	Ca meq 100g ⁻¹	Mg meq 100g ⁻¹	PMN mg kg ⁻¹ NH ₄ ⁺
5,0	3,17	7	0,39	10	4,2	25

Fuente: Laboratorio de suelos INIA La Estanzuela.¹

La fertilización basal constó de 100 kg ha⁻¹ de 5(N)-25(P)-25(K) más 50 kg ha⁻¹ de KCl, más una fertilización complementaria pre-siembra de 40 kg ha⁻¹ de KCl.

Cabe destacar que en lo que respecta a manejo de riego, herbicidas, fungicidas, insecticidas y demás prácticas de manejo culturales son particulares de cada productor. Y se consideró que no tuvieron efectos significativos sobre los resultados obtenidos.

La variedad utilizada en todos los ensayos fue INIA Merín. Se seleccionó dicha variedad debido al alto potencial de rendimiento que presenta y a la importante respuesta a la fertilización nitrogenada que ha mostrado en ensayos anteriores. Esto, sumado a su muy buena resistencia a brusone, la

hace una variedad con elevado potencial de inserción en los sistemas productivos de la región centro.

3.6 DETERMINACIONES

3.6.1 Biomasa en kg de materia seca (MS ha⁻¹)

Para la obtención de la variable se realizaron tres cortes de plantas de un metro lineal y a ras del suelo, en cada parcela experimental, al momento previo al estado de primordio. Luego se determinó su peso verde, y se llevó a estufa por 48 horas a temperaturas de 50-60 °C, para luego volver pesarlas.

Cabe destacar que se realizó el promedio de las tres mediciones de cada parcela y se trabajó con un único valor por unidad experimental.

Esta misma práctica se volvió a realizar 15 días posteriores a las aplicaciones de nitrógeno a primordio para cuantificar la evolución del cultivo y de la absorción de nitrógeno por el mismo.

3.6.2 Porcentaje de nitrógeno en planta

Para determinar el % de nitrógeno en planta al momento de primordio se tomaron sub-muestras de las muestras utilizadas para el cálculo de biomasa, se agruparon por tratamiento de nitrógeno dentro de cada repetición, se trituraron y enviaron para análisis de laboratorio (LAAI). El método de extracción utilizado para obtener el % de nitrógeno en planta fue el método Kjeldahl.

Con el dato de % nitrógeno en planta y MS ha⁻¹ se pudo determinar los kg ha⁻¹ de nitrógeno absorbido. Luego se prosiguió con los cálculos correspondientes y se determinó las dosis a aplicar en cada caso, según Castillo et al. (2014). Las aplicaciones se ejecutaron inmediatamente luego de recibir los resultados del laboratorio y realizar el cálculo de las dosis. Debido al tamaño de las parcelas dichas aplicaciones se efectuaron en forma manual.

También se analizó el % de nitrógeno en planta de las muestras del segundo corte realizado 15 días post-aplicación para cuantificar la evolución del cultivo.

3.6.3 Eficiencia de conversión de nitrógeno en biomasa parcial (EUNP)

Para la obtención de dicha eficiencia se restó a la biomasa 15 días post-primordio de los tratamientos que recibieron fertilizaciones nitrogenadas, la biomasa 15 días post-primordio correspondiente al tratamiento testigo, el cual no recibió fertilización nitrogenada, y luego se dividió ese delta biomasa entre los kg ha⁻¹ de nitrógeno agregados a los tratamientos correspondientes.

3.6.4 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Las mediciones de NDVI se obtuvieron mediante el uso de un GreenSeeker, caminando cada parcela en franjas. Se ejecutaron al mismo día en que fueron realizados los cortes para el cálculo de MS, a primordio y 15 días posteriores a las aplicaciones, para ver la evolución y respuesta de dichas aplicaciones.

Debido a la variabilidad de los resultados obtenidos por el GreenSeeker, se optó por realizar 5 mediciones por parcelas, las que se promediaron, tratando así de obtener un dato más representativo.

3.6.5 Rendimiento en grano del cultivo (kg ha⁻¹)

Para determinar el rendimiento del cultivo se esperó a que se encontrara apto para cosecha, con un valor aproximado de 18% de humedad y un 10 % de grano verde.

La cosecha se realizó en forma manual con una hoz. Se seleccionaron las 10 hileras centrales de cada parcela y se cosecharon 3 metros lineales (totalizando un área de 5,7 m² en el caso de 0,19 m de distancia entre hileras y 5,1m² para el caso de 0,17 m² de distancias entre hileras). Luego en las instalaciones de INIA Tacuarembó, se prosiguió con el trillado, limpieza, y secado individual de cada parcela.

Después de obtener el rendimiento de cada parcela se corrigió por el área correspondiente a las mismas y se obtuvo el rendimiento por hectárea.

3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados se realizó utilizando análisis de varianzas y correlaciones con el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2005). Para todos los casos se utilizó un 5% de confianza, y en lo que se refiere a pruebas de comparaciones de medias, se utilizó LSD Fisher.

Para la presentación de las graficas se optó por el modelo Box-Plots (anexo No. 4).

Es importante resaltar que se analizaron los datos de las diferentes localidades en conjunto y no se realizó un análisis específico para cada sitio en particular. Se optó por esta decisión debido al bajo número de repeticiones presentes en cada localidad, lo que llevaría a un análisis de dato con bajo peso estadístico.

3.8 REGISTRO CLIMÁTICO

Los datos utilizados para el análisis climático fueron obtenidos a través de INIA. GRAS, correspondiente a la estación meteorológica de Tacuarembó.

Cabe destacar la limitante que ofrece las distancias entre los ensayos y la estación experimental de la cual se obtuvieron los datos, aproximadamente 80 kilómetros.

Las variables climáticas tomadas en cuenta fueron temperatura y radiación debido participación en la definición de los rendimientos.

3.8.1 Condiciones climáticas

A continuación se presentan datos de las variables climáticas de mayor participación en la definición del rendimiento, como son temperaturas máximas, mínimas y medias, y radiación solar con el fin de caracterizar las condiciones ambientales en las que se desarrollaron los cultivos pertenecientes a los ensayos.

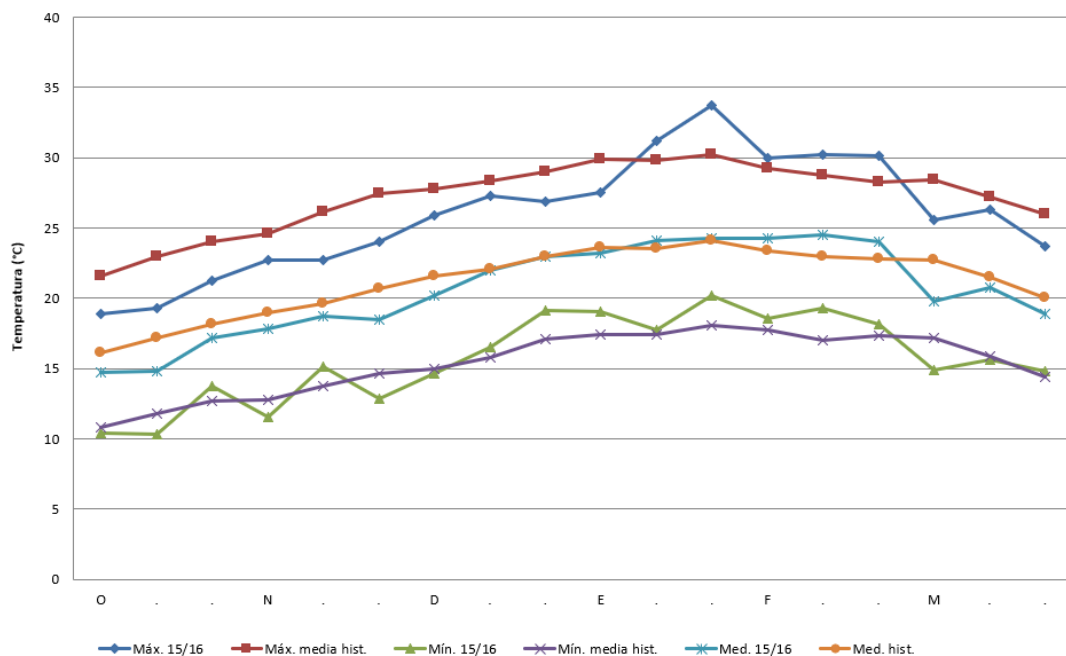


Figura No. 3. Temperaturas máximas, medias y mínimas para la zafra 2015/2016 y la serie histórica 1986-2016, Tacuarembó.²

² INIA. Tacuarembó. GRAS. 2016. Condiciones climáticas y serie histórica 1986 – 2016; adaptado (sin publicar).

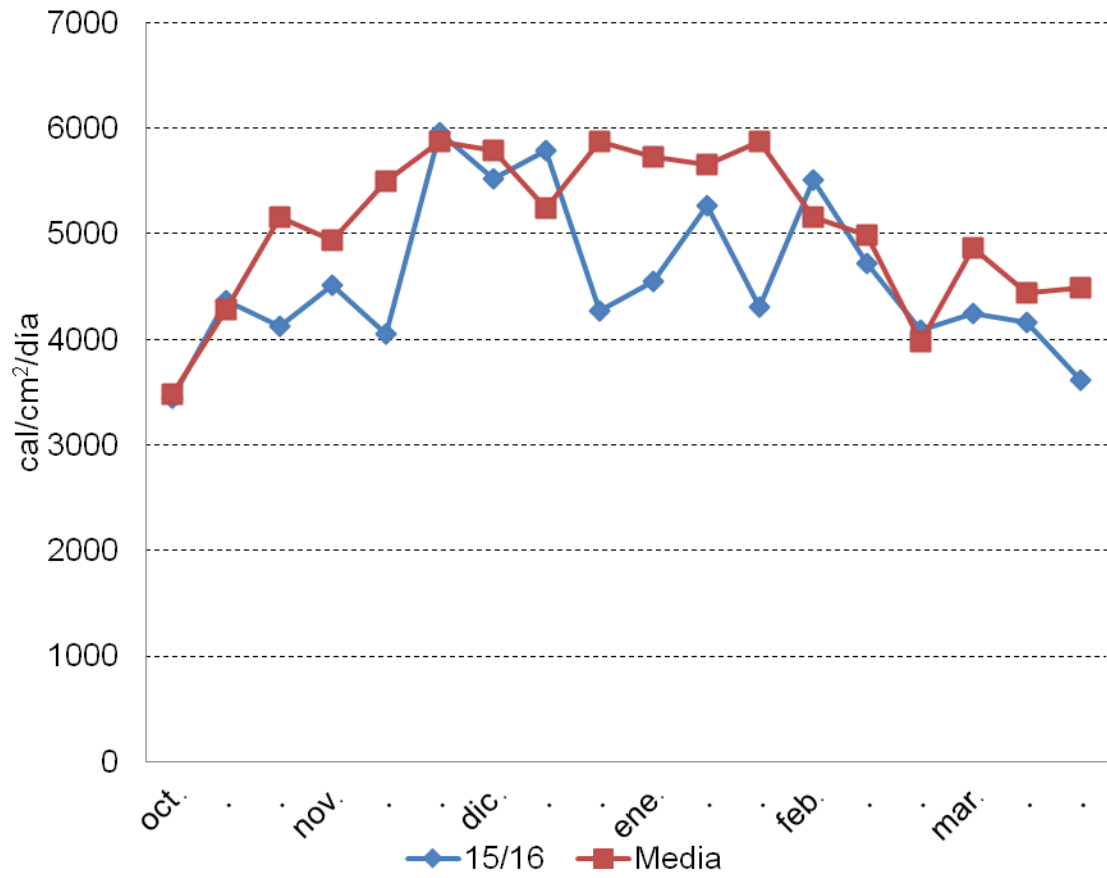


Figura No. 4. Radiación acumulada por décadas durante el ciclo de desarrollo del cultivo en cal/cm²/día para Tacuarembó.²

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como ya se mencionó anteriormente los resultados presentados a continuación no corresponden a ningún sitio específico, y si son la agrupación de los datos correspondientes a las tres localidades.

Para una mejor interpretación de los datos, los mismos fueron divididos en resultados a primordio, los cuales cuantifican las respuestas de las aplicaciones de macollaje, y resultados post-primordio, los cuales cuantifican las respuestas de las aplicaciones de primordio.

4.1 INFLUENCIAS CLIMÁTICAS

Los registros climáticos previamente expuestos permiten observar que no ocurrieron limitantes para el correcto desarrollo del cultivo en lo que se refiere a temperaturas; en tanto para radiación se observan valores menores a la media histórica en los momentos de generación y concreción de rendimiento potencial, que pueden haber influido negativamente en los mismos.

4.2 RESULTADOS A PRIMORDIO

4.2.1 Producción de biomasa y absorción de nitrógeno

Como se puede observar en la figura No. 5, las mayores producciones de biomasa a primordio, se encuentran asociadas a las mayores dosis de nitrógeno agregadas a macollaje. Esto está acorde a lo esperado, ya que el arroz, como gramínea que es, responde en forma importante al uso de N (De Datta, 1981).

Los datos obtenidos nos indican que en promedio el tratamiento TEST tiene una biomasa 22% inferior al tratamiento PMN, y 74 % inferior al tratamiento PLUS.

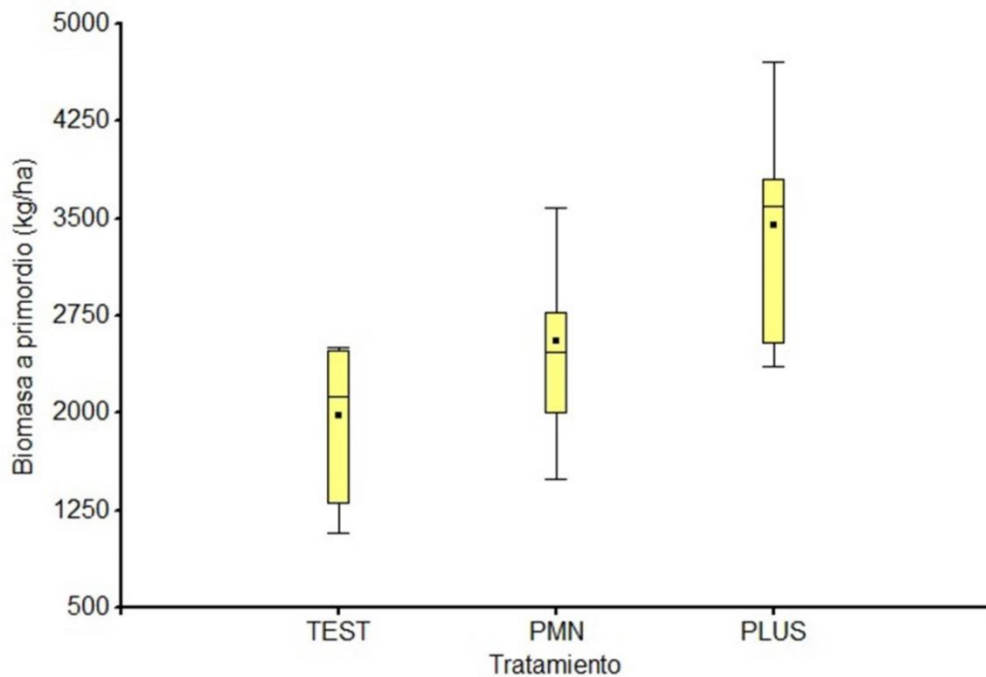


Figura No. 5. Producción de biomasa a primordio (kg ha^{-1}), según tratamientos.

En la figura No. 6 se puede observar que la absorción de nitrógeno a primordio sigue la misma tendencia que la producción de biomasa. A mayor aporte de nitrógeno a macollaje, mayor es la absorción del mismo a primordio por parte del cultivo.

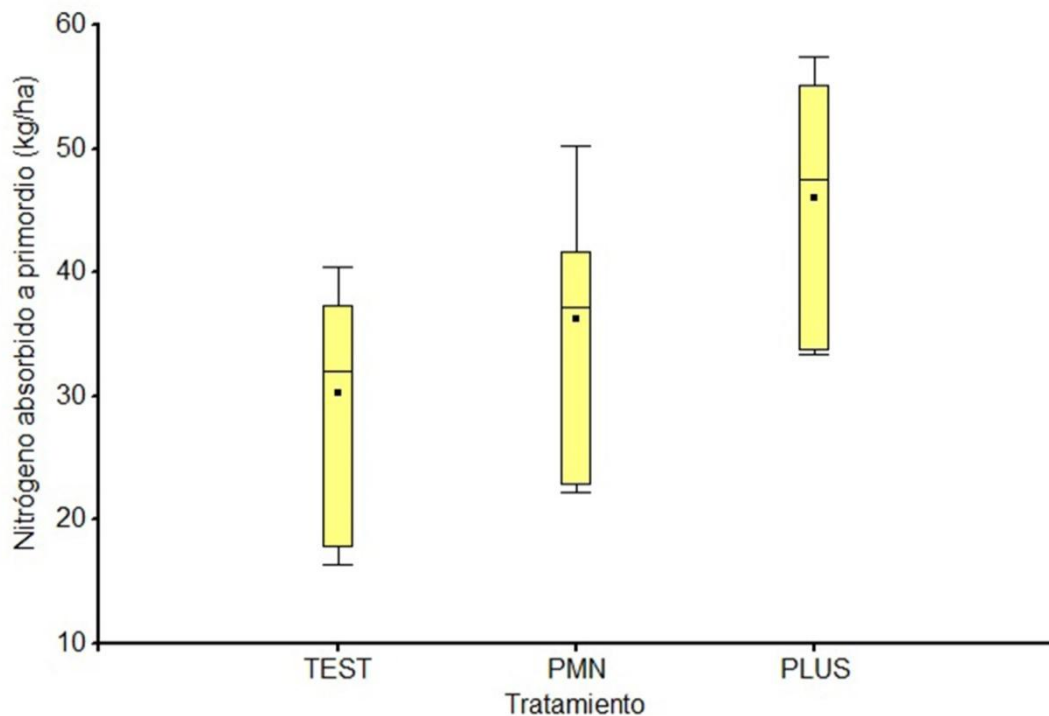


Figura No. 6. Absorción de nitrógeno (kg ha^{-1}) a primordio según tratamientos.

Cuando evaluamos las variables que componen la absorción de nitrógeno del cultivo, podríamos inferir que el peso relativo de la producción de biomasa es superior al % de nitrógeno en planta. Analizando el % de N en planta, se observa que el mismo varía entre 1,07 y 1,77% entre los tratamientos (anexo No. 4), y a medida que aumenta la producción de biomasa, el mismo disminuye. Podríamos estar al frente de un efecto de dilución del nitrógeno (figura No.7).

A la luz de los resultados se podría decir que la absorción de nitrógeno por parte del cultivo no sería el indicador más preciso a la hora de conocer el estatus nitrogenado del cultivo, ya que podemos estar frente a cultivos con una alta producción de biomasa, lo que elevaría el indicador, pero el % de N en planta sea subóptimo.

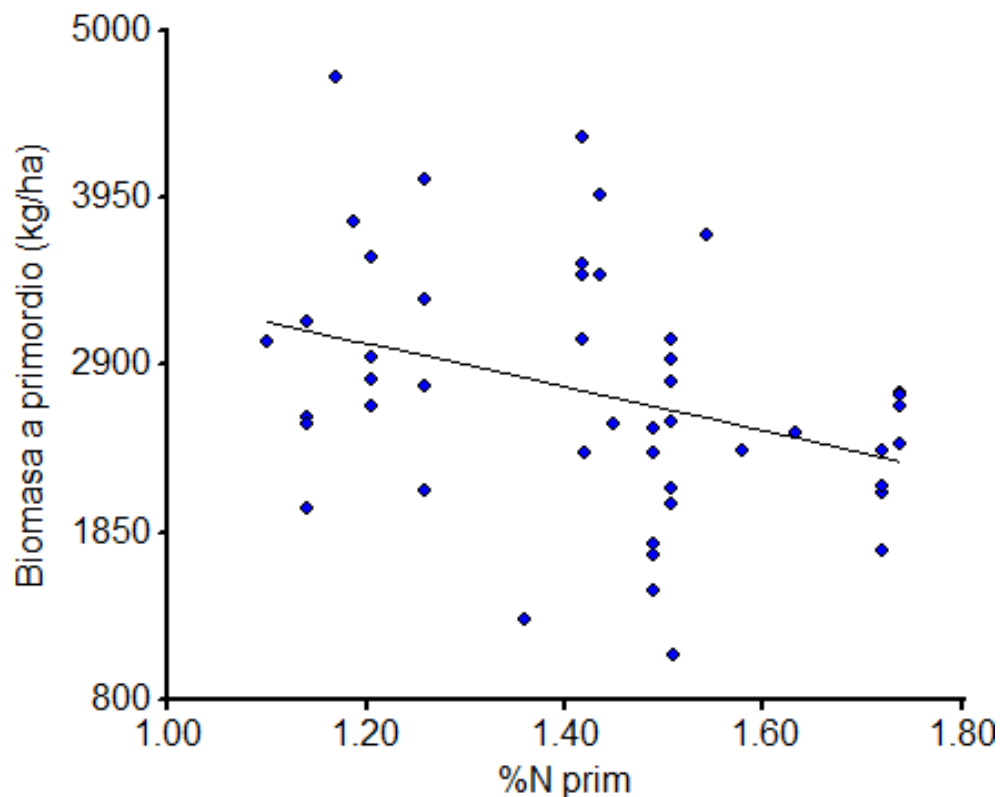


Figura No. 7. Asociación entre % N a primordio y biomasa a primordio.

El tratamiento 1 (TEST), que no recibió aporte de nitrógeno a macollaje mediante fertilizantes, promedió una absorción de 30 kg ha^{-1} , aportados por el suelo. El tratamiento 2 (PMN) en el cual la fertilización nitrogenada a macollaje fue corregida por indicador (PMN), por cada $7,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno agregados, la absorción por parte del cultivo aumentó en 1 kg ha^{-1} . En el tratamiento 6 (PLUS) en el cual la dosis agregada a macollaje es un 30% superior a la recomendada según el indicador, por cada $3,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno agregados, la absorción por parte del cultivo aumento en 1 kg ha^{-1} , un 100% más eficiente (cuadro No. 4).

Al comparar los tratamientos 2 (PMN) y 6 (PLUS) con el testigo se observó que en promedio los mismos presentaron 36% más de absorción de nitrógeno a primordio. Asumiendo que el aporte del suelo es igual en todos los casos, los tratamientos que fueron fertilizados obtuvieron en promedio el 64% del nitrógeno absorbido proveniente del suelo, o de una fuente distinta al agregado como fertilizante. En tal sentido, Deambrosi y Méndez (2009) en experimentos basados en la zona este, comprobaron que hasta el 70% del nitrógeno absorbido hasta iniciación panicular provienen de fuentes diferentes al fertilizante aplicado. De la misma forma anteriormente, Koyama y Broadbend, citados por De Datta (1981) reportaron que el arroz fertilizado obtiene de 50 a

80 % de nitrógeno del suelo, dependiendo de la capacidad de aporte del mismo y la cantidad de nitrógeno agregado.

Cuadro No. 4. Biomasa de arroz (kg ha^{-1}), N absorbido (kg ha^{-1}), y lecturas de NDVI a primordio, según tratamientos (dosis de N agregada al macollaje).

Tratamientos	Dosis de N agregada a macollaje (kg ha^{-1})	Biomasa a primordio (kg ha^{-1})	N absorbido a primordio (kg ha^{-1})	Lecturas de NDVI a primordio
1 TEST	0	1.982 B	30 B	0,42 B
2 PMN	46	2.551 B	36 AB	0,50 A
6 PLUS	60	3.450 A	46 A	0,52 A
Media gral.		2.661	37,5	0,48
D.M.S. (Fisher)		754	10,58	0,06581
C.V.		26,24	26,23	12,75
p-valor		**	*	*

ns: no significativo * : < 5% ** : < 1% *** : < 0,1%

Se puede afirmar que existe una relación clara entre la absorción de nitrógeno por parte del cultivo y la producción de biomasa. Ambas variables presentan correlación positiva y significativa ($p\text{-valor} = < 0,0001$), y con un ajuste elevado ($R^2 = 0,81$). Este resultado es esperable, ya que la absorción de nitrógeno por parte del cultivo se obtiene a partir de la biomasa producida (kg MS ha^{-1}) y el % de nitrógeno de dicha biomasa (figura No. 8).

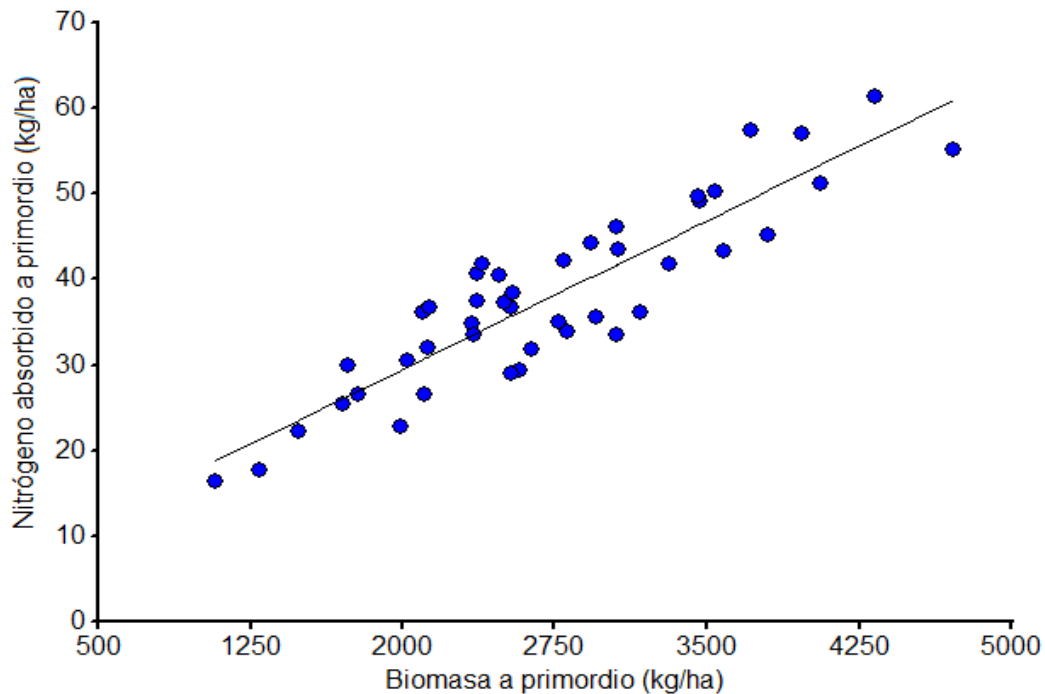


Figura No. 8. Asociación entre la biomasa de arroz producida y el nitrógeno absorbido, en estadio de primordio.

4.2.2 Lecturas de NDVI a primordio

Como se puede apreciar en el cuadro No. 4, el GreenSeeker logró detectar diferencias entre el tratamiento testigo con respecto a los demás, y no así entre los demás tratamientos. Mediante el NDVI se diferenciaron el tratamiento 1 (TEST), el cual absorbió 30 kg ha^{-1} de N, del tratamiento 2 (PMN), que absorbió 36 kg ha^{-1} de N. En tanto no logró diferenciar el tratamiento 2 (PMN) del tratamiento 6 (PLUS), el cual absorbió 46 kg ha^{-1} de N.

En este caso en que se trata de un cultivo inundado y con un canopeo aún no completamente desarrollado, especialmente en las parcelas testigo, el agua cubre parte de la superficie que lee el sensor. Por tal motivo el reflejo causado por el agua y la falta de cobertura del suelo por parte del cultivo pueden haber generado subvaloraciones de las lecturas, ya que ambos parámetros presentan magnitudes de lecturas de NDVI cercanas al 0,1 - 0,2 e incluso negativas, las cuales son inferiores a las encontradas por el canopeo del cultivo.

Contrariamente a las investigaciones realizadas por Ali et al. (2013) no se encontró relación entre las lecturas de NDVI a primordio con las variables biomasa producida (kg ha^{-1}) y nitrógeno absorbido (kg ha^{-1}) en ese estadio (figura No. 9).

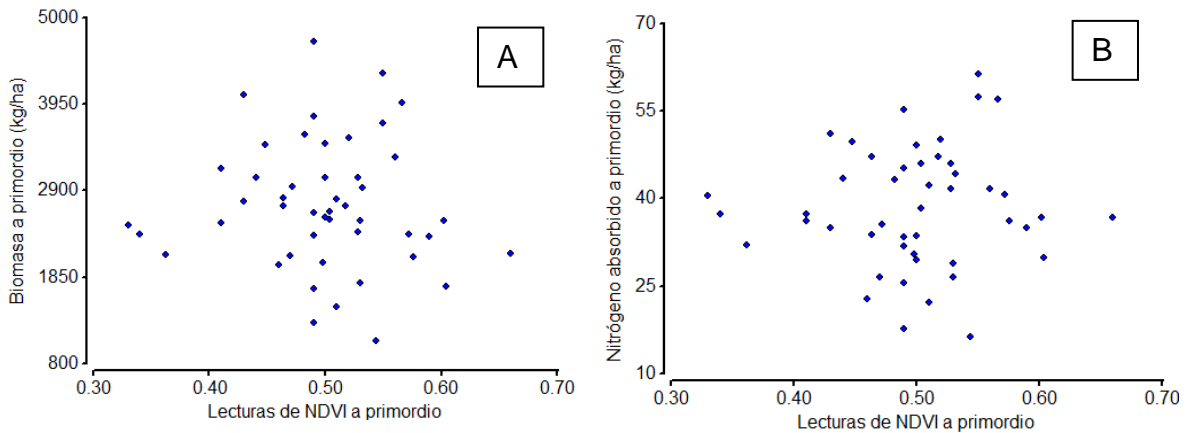


Figura No. 9. A. Asociación entre lecturas de NDVI a primordio con biomasa producida (kg ha^{-1}). B. Asociación entre lecturas de NDVI a primordio con nitrógeno absorbido (kg ha^{-1}) en dicho estadio.

Podemos afirmar, en base a la información analizada, que ésta herramienta por sí sola no sería de utilidad para predecir el estatus nitrogenado del cultivo, al momento de realizar recomendaciones de aplicaciones de nitrógeno a primordio.

4.3 RESULTADOS POST-PRIMORDIO

4.3.1 Producción de biomasa y absorción de nitrógeno

La producción de biomasa evaluada a los 15 días posteriores a las aplicaciones de nitrógeno de primordio, sigue en general, la misma tendencia que la presentada, a mayores dosis de nitrógeno agregadas, mayor es la producción de biomasa (figura No. 10).

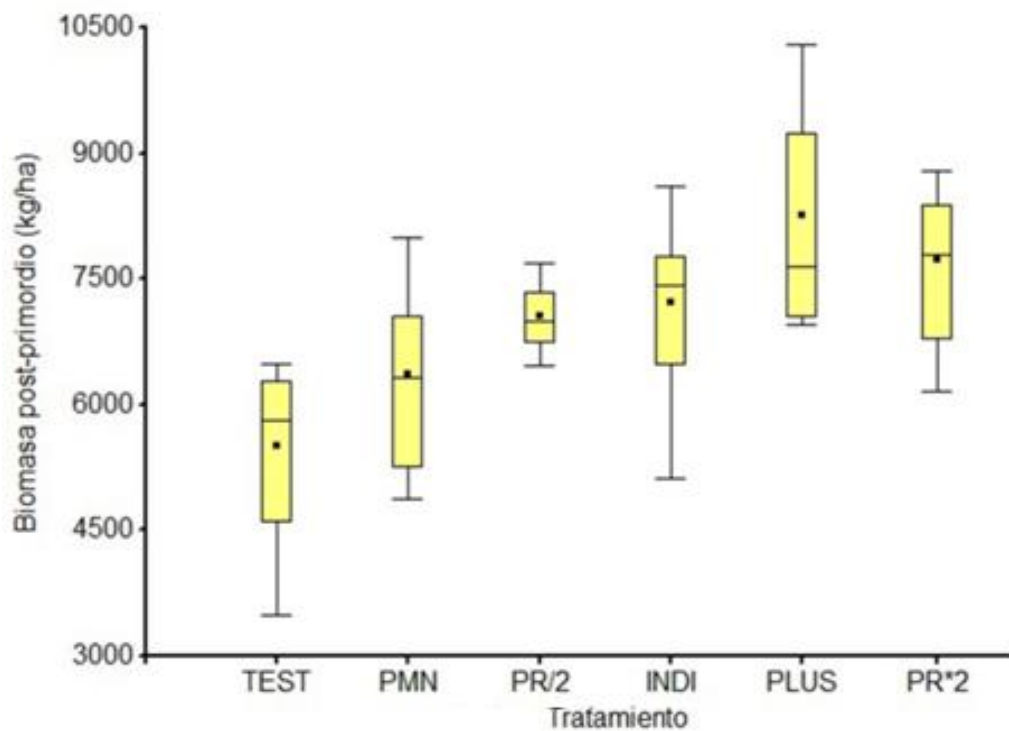


Figura No. 10. Producción de biomasa (kg ha^{-1}) en post-primordio, según los tratamientos de N aplicados en macollaje y primordio.

Al ordenar los tratamientos de acuerdo a dosis totales de nitrógeno, la respuesta es de tipo cuadrática, $R^2=0,29$ y $p\text{-valor}=0,0006$ (anexo No. 16). Presenta una primera fase con incrementos decrecientes hasta PLUS alcanzando aquí el máximo valor de biomasa, y a partir de ahí disminuye; sin embargo, estadísticamente el PLUS no se diferencia del INDI ni del PR*2.

Como se discutió en figuras No. 5, No. 6 y cuadro No. 4, el PLUS había mostrado una mayor respuesta en producción de biomasa y absorción de N a primordio. Al no contar con un tratamiento PLUS solo al macollaje, comparado con el PLUS de los dos momentos, no podemos saber si esa cantidad extra de N al macollaje se pueda traducir en una menor respuesta al primordio.

Cuadro No. 5. Biomasa producida (kg ha^{-1}), N absorbido (kg ha^{-1}), eficiencia de uso de N (kg biomasa/kg N), y lecturas de NDVI post-primordio, según dosis totales de N aplicados.

Tratamientos	Dosis N total agregada (kg ha^{-1})	Biomasa post-primordio (kg ha^{-1})	EUNP (biomasa/kg N)	N absorbido 15 días post-primordio (kg ha^{-1})	NDVI post-primordio (kg ha^{-1})
1 TEST	0	5.513 C	-	58 D	0,48 B
2 PMN	46	6.370 CD	18,6	65 CD	0,56 A
3 INDI	95	7.180 ABC	17,5	78 BC	0,60 A
4 PR/2	71	7.024 BC	21,3	74 BCD	0,58 A
5 PR*2	144	7.753 AB	15,6	88 AB	0,60 A
6 PLUS	106	8.258 A	25,9	97 A	0,59 A
Media gral.		7.016		77	0,57
D.M.S.		1.109		10,58	0.0644
C.V.		14,89		21,10	11,06
p-valor		***		***	***

ns: no significativo * : < 5% ** : < 1% *** : < 0,1%

Comparando el tratamiento PR*2 con el PLUS, observamos que el primero, si bien recibió 38 kg ha^{-1} de N más que el tratamiento PLUS, fundamentalmente a primordio, este N no se tradujo en producción de biomasa ni en N absorbido (-500 y -11 kg ha^{-1} , respectivamente, no estadísticamente diferente). Esto refuerza el concepto de que un exceso de N a primordio no tendría un impacto, al menos a nivel de biomasa y nitrógeno absorbido en este período de tiempo evaluado.

Comparando los tratamientos contrastantes PLUS y TEST con respecto a INDI, se observa que se diferencian significativamente en lo que refiere a nitrógeno absorbido y no así en biomasa producida.

La eficiencia con que el N está siendo utilizado por el cultivo (EUNP) es variable. Es interesante ver que, en términos absolutos, la mayor eficiencia está relacionada al mayor uso de N al macollaje (PLUS), y la menor con la mayor dosis de N utilizada al primordio (PR*2, cuadro No. 5).

La información presentada nos muestra que la absorción de nitrógeno está muy asociada a las dosis de N que se aplican (cuadro No. 6). Sin tener en cuenta la absorción que el cultivo logra sin agregado de N (TEST), ya

comentado anteriormente, tanto el N aplicado al macollaje como el aplicado a primordio tuvieron respuestas claras. Al tener alta variabilidad en los ensayos, es difícil detectar las diferencias estadísticamente significativas. Es interesante observar que en números absolutos, al duplicar la dosis de primordio (PR*2) la absorción aumentó un 17,5% respecto a INDI, y al reducirla a la mitad (PR/2), la absorción disminuye un 17,5%.

Cuadro No. 6. Nitrógeno absorbido a primordio, post-primordio y total (kg ha^{-1}), según nitrógeno aplicado a macollaje, a primordio y total (kg ha^{-1}).

Tratamientos	Dosis N aplicado a macollaje (kg ha^{-1})	Nitrógeno absorbido a primordio (kg ha^{-1})	Dosis N aplicado a primordio (kg ha^{-1})	N absorbido entre primordio y post-primordio (kg ha^{-1})	Dosis total (kg ha^{-1})	N absorbido total a post-primordio (kg ha^{-1})
1 TEST	0	30 B	0	28 C	0	58 D
2 PMN	46	36 AB	0	30 BC	46	65 CD
3 INDI	46	36 AB	49	40 BC	95	78 BC
4 PR/2	46	40 AB	25	33 BC	71	74 BCD
5 PR*2	46	38 AB	98	47 AB	144	88 AB
6 PLUS	60	46 A	46	51 A	106	97 A
Media gral.		38		38		77
D.M.S.		10,37		17,7		16,8
C.V.		25,9		42,8		21,1
p-valor		ns (8%)		*		***

ns: no significativo * : < 5% ** : < 1% *** : < 0,1%

4.3.2 Lecturas de NDVI post-primordio

Las lecturas de NDVI en esta etapa del cultivo muestran una baja variabilidad entre los tratamientos que recibieron nitrógeno, excepto el TEST (cuadro No. 5). Dichas lecturas no logran identificar las diferencias en nitrógeno absorbido entre tratamientos, y parecen estar más relacionadas a la biomasa del cultivo, asociada de manera significativa pero con un ajuste bajo ($R^2 = 0,13$), datos no presentados.

4.4 RESPUESTA EN RENDIMIENTO

Los rendimientos obtenidos en los ensayos fueron elevados, independientemente de los tratamientos que se trate, ya que superaron los 10.000 kg ha⁻¹. Esto se debe a la combinación de factores propios de los experimentos en donde las condiciones son relativamente controladas, las unidades experimentales son pequeñas, y no presentaban taipas.

Se observa una tendencia a tener mayores rendimientos asociados a los mayores niveles de fertilización nitrogenada (figura No.11 y cuadro No. 7), con disminución de rendimientos con dosis excesivamente altas, los datos se ajustan a un modelo cuadrático, $R^2 = 0,19$, p-valor = 0,0106 (anexo No. 23). El tratamiento TEST presenta el menor rendimiento, seguido por el tratamiento que recibió nitrógeno únicamente a macollaje (PMN). Los demás tratamientos, si bien recibieron dosis de nitrógeno diferentes, se comportaron estadísticamente iguales (cuadro No. 7). Considerando los datos de cada ensayo en particular (datos no presentados), se pudo observar para todos los experimentos la misma tendencia, independientemente del antecesor, que fue diferente en cada caso.

En general la respuesta a la fertilización nitrogenada se puede considerar baja, ya que sin aplicar N a macollaje y primordio, se obtuvieron 10.750 kg ha⁻¹ (TEST), un 84% del promedio de los mejores rendimientos. Estos resultados coinciden con los encontrados por Deambrosi y Méndez (2007) que afirman que en Uruguay la respuesta al agregado de nitrógeno es relativamente baja, obteniendo los testigos rendimientos entre 80 y 90 % respecto a las dosis óptimas, en función del año. Por otro lado los tratamientos PR/2, PR*2 y PLUS presentan respuestas cercanas al 20%, esto es alto para este tipo de sistemas.

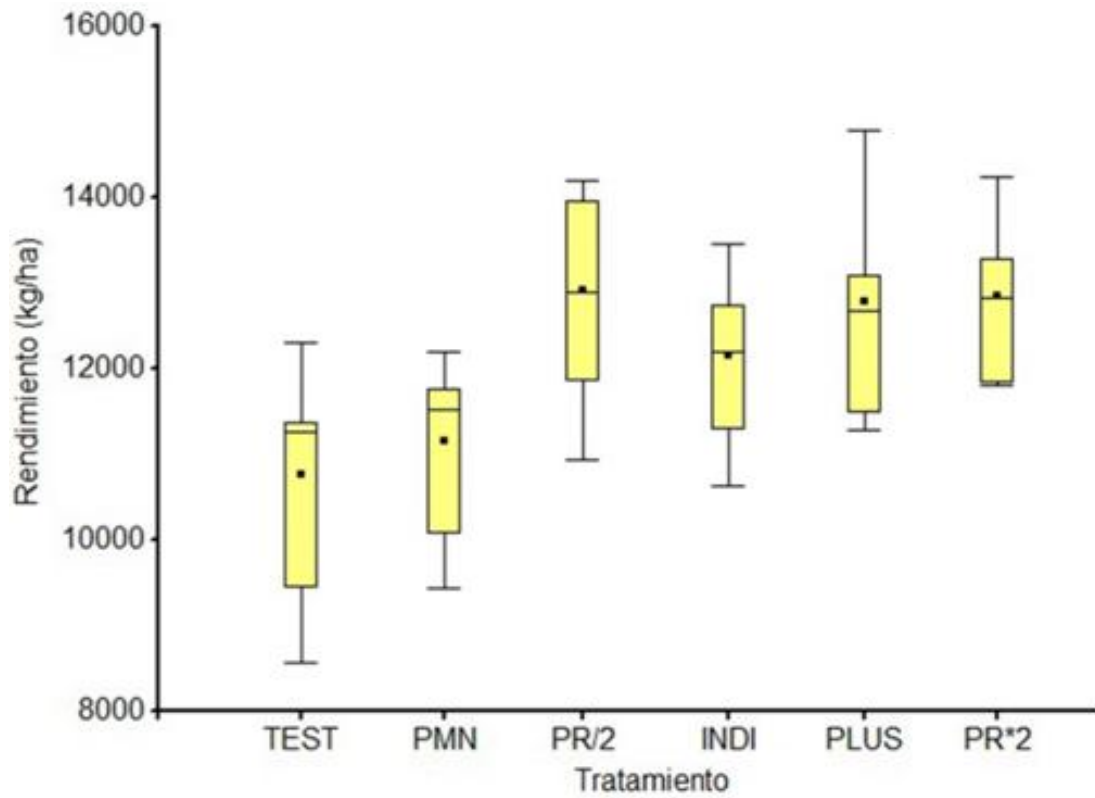


Figura No. 11. Rendimientos promedios en grano seco y limpio (kg ha^{-1}), según tratamientos de nitrógeno aplicados.

Cuadro No. 7. Rendimientos en grano seco y limpio (kg ha^{-1}) y eficiencia de uso del nitrógeno ($\text{kg grano kg N}^{-1}$), obtenidos según tratamientos.

Tratamientos	Rendimientos (kg ha^{-1})	Incrementos porcentuales	Eficiencia agronómica ($\text{kg grano kg N}^{-1}$)
1 Testigo	10.754 C	-	--
2 PMN	11.161 BC	4%	8,8
3 INDI	12.142 AB	13%	14,6
4 PR/2	12.902 A	20%	30,3
5 PR*2	12.844 A	20%	14,5
6 PLUS	12.775 A	19%	19,1
Media gral.	12.096	15%	17,5
DMS	1.133		
CV (%)	9,02		
p-valor	***		

ns: no significativo * : < 5% ** : < 1% *** : < 0,1%

En cuanto a la eficiencia agronómica, existe cierta contradicción que merece un análisis más profundo. Por un lado, la mejor conversión (30 kg grano por kg N) estuvo dada por una fertilización por PMN a macollaje (46 kg N ha^{-1}) y una fertilización sub óptima a criterio de los indicadores a primordio (25 kg N ha^{-1}). Por otro lado, el tratamiento PLUS (30% más de lo óptimo a macollaje y a primordio, 60 y 64 kg N ha^{-1} , respectivamente), también mostró una muy buena eficiencia (19 kg grano por kg N) y similar nivel de rendimiento. El tratamiento INDI no pudo concretar una alta eficiencia, obteniendo un rendimiento algo menor ($12.142 \text{ kg ha}^{-1}$). El tratamiento PR*2 queda evidentemente fuera de toda recomendación, ya que obtiene la misma eficiencia que el INDI, el mismo rendimiento que PR/2 y PLUS, pero con una dosis mucho mayor de nitrógeno, lo cual es riesgoso para el ambiente e ineficiente para el productor.

4.4.1 Regresión entre nitrógeno absorbido post-primordio y rendimiento

Mediante el análisis de la figura No. 12 se observa que existe una correlación significativa (p -valor = 0,0001) y positiva entre el nitrógeno absorbido post primordio y el rendimiento en grano, con un ajuste relativamente débil ($R^2 = 0,29$). Se puede decir que a mayores niveles de absorción de nitrógeno por parte del cultivo se obtienen mayores rendimientos. Serían necesarios más datos para mejorar el ajuste.

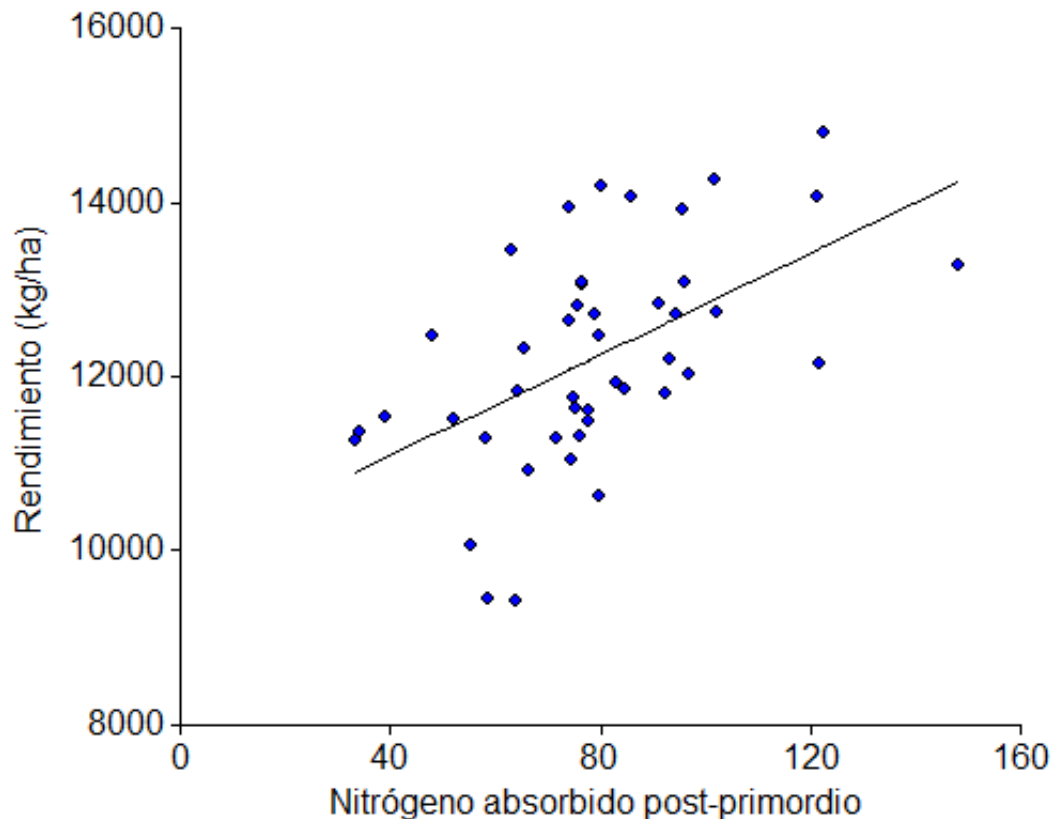


Figura No. 12. Asociación entre nitrógeno absorbido post primordio y rendimiento en grano.

4.4.2 Regresión entre lecturas de NDVI post-primordio y rendimiento

Cuando correlacionamos las lecturas de NDVI 15 días post-primordio con el rendimiento final encontramos que hay una correlación significativa (p -valor = 0,0001), pero con un ajuste relativamente bajo ($R^2 = 0,36$), podemos inferir que el NDVI post-primordio podría ser de utilidad como predictor de rendimiento (figura No. 13). Estos resultados, si bien presentan un menor ajuste, concuerdan con los encontrados por Yao et al. (2013).

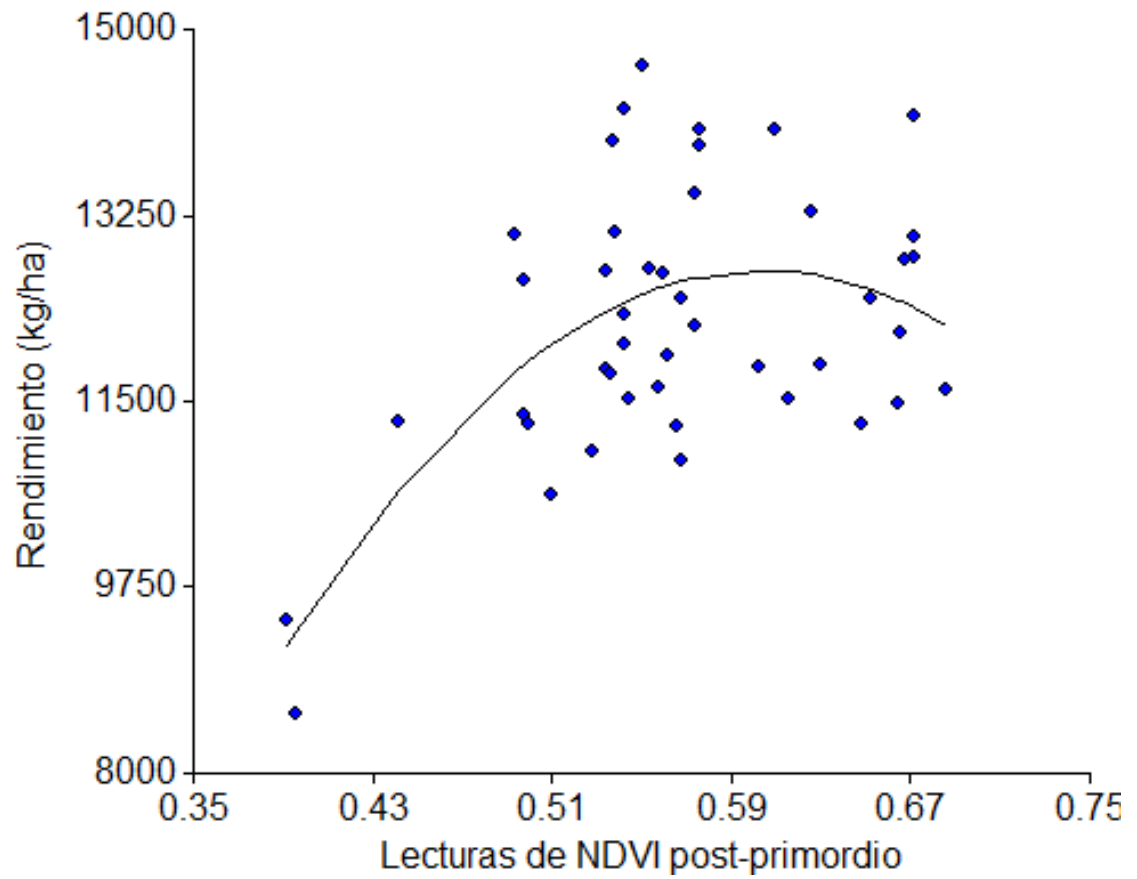


Figura No. 13. Asociación entre lecturas de NDVI 15 días post-primordio y rendimiento.

5. CONCLUSIONES

Se observa una clara respuesta a la aplicación de nitrógeno en el cultivar INIA Merín. Tanto en las observaciones realizadas a primordio, correspondientes a aplicaciones en macollaje, como en las observaciones de post primordio, correspondientes a aplicaciones a primordio, se observó respuesta a la aplicación nitrogenada, tanto en biomasa producida, como en nitrógeno absorbido. En lo que refiere a rendimiento en grano seco y limpio hay respuesta a la fertilización nitrogenada, que varía entre 5-20% con respecto al testigo, y es similar a estudios anteriores.

La relación entre el NDVI y el porcentaje de nitrógeno en planta no fue la esperada. El instrumento utilizado no tuvo la capacidad de discernir entre los diferentes niveles del indicador que utiliza el modelo de fertilización, el nitrógeno absorbido a primordio. Las lecturas de NDVI tanto a primordio como a post primordio, diferenciaron estadísticamente únicamente el testigo de los demás tratamientos de nitrógeno.

El trabajo revela además, la importancia de la fertilización nitrogenada tanto a macollaje como a primordio. Ya que se obtuvo respuesta al agregado de nitrógeno en los dos momentos, además quedo en evidencia que se deben de evitar los excesos en las dosis agregadas a primordio que no se traducen en mayor rendimiento en grano, y de esta manera no disminuir la eficiencia de uso de nitrógeno.

Las lecturas de NDVI, si bien no presentaron una asociación importante con el status nitrogenado del cultivo, mostraron una relación significativa con el rendimiento en grano. Esto podría ser de utilidad para predecir rendimientos, aunque un mayor número de evaluaciones serían necesarias para mejorar su ajuste. También puede ser de interés evaluar esta relación con lecturas en un estadio del cultivo más avanzado, para detectar en forma más precisa la respuesta a las aplicaciones de primordio.

El uso de nuevos índices que tienen en cuenta la reflectancia generada por parte del agua, y el estadio de desarrollo en que se encuentra el cultivo, serian de gran interés a la hora de recomendar una futura investigación en este tema.

6. RESUMEN

El experimento se realizó en INIA Tacuarembó en la zafra 2015-2016, y constó de tres ensayos iguales localizados en Pueblo del Barro, Cerro Cardozo y Paso Casildo. El objetivo del mismo fue evaluar la respuesta a fertilizaciones nitrogenadas diferenciales en el cultivo de arroz y estudiar la asociación entre lecturas de NDVI realizadas con la herramienta GreenSeeker y el nitrógeno absorbido por el cultivo en estadio de primordio, indicador utilizado actualmente para realizar recomendaciones de fertilización. Los ensayos constaban de seis tratamientos y tres repeticiones cada uno. Los tratamientos aplicados fueron, tratamiento testigo, el cual no recibió fertilización en ninguno de los estadios; tratamiento PMN, el cual fue fertilizado únicamente a macollaje en base al indicador; tratamiento INDI, el cual recibió fertilizaciones en los estadios de macollaje y primordio en base al modelo INIA; tratamiento PR/2, el cual a macollaje fue fertilizado en base al modelo propuesto por INIA, pero recibe la mitad de la dosis indicada por el mismo a primordio; tratamiento PR*2, el cual sigue la misma lógica que el anterior en el estadio de macollaje, pero con el doble de lo indicado por el modelo a primordio; y tratamiento PLUS, el cual recibe un 30% más de lo indicado por el modelo en ambos estadios. El diseño utilizado fue un diseño completamente al azar. Las determinaciones evaluadas fueron biomasa en kg de materia seca (MS ha⁻¹), porcentaje de nitrógeno en planta, eficiencia de conversión de nitrógeno en biomasa parcial (EUNP), lecturas de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y rendimiento en grano del cultivo (kg ha⁻¹). Se observó respuesta a la fertilización nitrogenada en lo que respecta a biomasa, y nitrógeno absorbido en ambos estadios. También se encontró respuesta en lo que refiere a rendimiento con datos similares a estudios previos, obteniéndose valores entre 5-20% de incremento con respecto al testigo con el modelo utilizado por INIA. Esta herramienta fue capaz de diferenciar status nitrogenados en ambos estadios, pero únicamente diferenció el tratamiento testigo a lo demás, por lo que es de poca utilidad para realizar un ajuste preciso de la fertilización. Si se encontró una relación interesante entre las lecturas de NDVI y el rendimiento en grano alcanzado, por lo cual no hay que descartar esta herramienta como posible predictora de rendimiento, aunque más ensayos serían necesarios.

Palabras clave: *Oryza sativa*; Fertilización nitrogenada; NDVI; GreenSeeker.

7. SUMMARY

The experiment was carried out at INIA Tacuarembó in the 2015-2016 season, and consisted on three similar trials located in Pueblo del Barro, Cerro Cardozo and Paso Casildo. The objective of this study was to evaluate the response to differential nitrogen fertilization in rice cultivation, and to study the association between NDVI readings performed with the GreenSeeker tool, and the nitrogen absorbed by the crop at reproductive stage. Currently, this parameter is used for fertilizer recommendations. The trials consisted on six treatments and three replicates each. The applied treatments were, control treatment that did not receive fertilization in any of the stages; PMN treatment, which was fertilized only at tillering based on the indicator; INDI treatment, which received fertilizations at the tillering and reproductive stages based on the INIA model; Treatment PR / 2, which N was applied at tillering on the basis of the model proposed by INIA, but receives half of the dose indicated at reproductive stage; Treatment PR * 2, which follows the same logic as the previous one at tillering, but with twice as indicated by the model at reproductive stage; and PLUS treatment, which receives 30% more than indicated by the model in both stages. The design used was a completely random one. The determinations evaluated were biomass in kg of dry matter (DM ha^{-1}), percentage of nitrogen in plant, nitrogen conversion efficiency in partial biomass (EUNP), normalized difference vegetation index (NDVI) and grain yield (kg ha^{-1}). Response to nitrogen fertilization was denoted with respect to biomass and nitrogen absorbed in both stages. Response was also found regarding yield, with data similar to previous studies, obtaining values between 5-20% increase respects to the control. The GreenSeeker instrument, used for the NDVI readings, was not able to associate in a significant and satisfactory way with the nitrogen absorbed by the crop, which by itself would not be an effective tool to relate to the model used by INIA. This tool was able to differentiate nitrogen status in both stages, but only differentiated the control treatment to the rest, so it is of little use to make an accurate adjustment of fertilization. Nevertheless, an interesting relationship was found between the readings of NDVI and yield achieved. This tool should not be ruled out as a predictor of performance, although more tests would be necessary.

Key words: *Oryza sativa*; Nitrogen fertilization; NDVI; GreenSeeker.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Acharya, C. N. 1935. Studies on the anaerobic decomposition of plant materials; the anaerobic decomposition of rice straw (*Oryza sativa*). *Biochemical Journal*. 29 (3): 528-541.
2. Ali, A.; Thind, H. 2014. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded rice use GreenSeeker optical sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*. 110: 114-120.
3. Araya-alfaro, J. M.; Cadet-Piedra, E.; Gutierrez-Soto, M. V.; Rodríguez-Montero, W. 2011. El Greenseeker y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*. 22: 397-403.
4. Atanasiu, N.; Samy, J. 1985. Arroz; uso eficaz de los fertilizantes. Zurich, Centro de Estudios del Nitrógeno (CEA). 100 p.
5. Baligar, V. C.; Fageria, N. K.; He, Z. L. 2001. Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32: 912-950.
6. Barrios, M.; Adams, M. 1996. Uso de fertilizantes nitrogenados en arroz irrigado en un suelo de la serie de Calabozo. *Venezuelos*. 4 (1-2): 28-35.
7. Bird, J. A.; Van Kessel, C.; Hortwath, W. R. 2002. Nitrogen dynamics in humic fractions under alternative straw management in temperate rice. *Soil Science Society of America Journal*. 66: 478-488.
8. Blanco, P.; Molina, F.; Pérez de Vida, F. 2016. INIA Merín, nuevo cultivar de arroz; alta productividad y resistencia a pyricularia. *Revista INIA*. no. 44: 15-19.
9. Brady, N. C. 1981. Soil factors that influence rice production. In: *Symposium on Paddy Soils (1st., 1981, Heidelberg)*. Proceedings. Berlin, Springer. pp. 1-19.
10. Buresh, R. J.; Patrick, W. H. Jr. 1981. Nitrate reduction to ammonium and organic nitrogen in an estuarine sediment. *Soil Biology and Biochemistry*. 13 (4): 279-283.
11. _____; Ramesh Reddy, K.; Van Kessel, C. 2008. Nitrogen transformations in submerged soils. *Nitrogen in Agricultural Soils*. 49: 401-436.

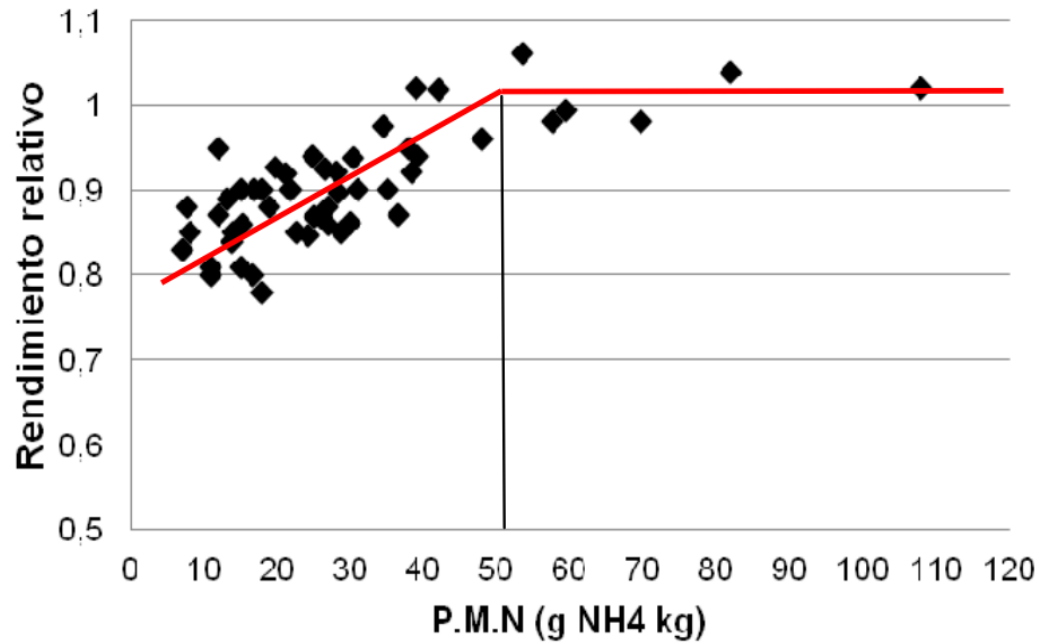
12. Campbell, J. 2007. Introduction to remote sensing. 4th.ed. New York, Guilford. 626 p.
13. Cantou, G.; Casales, L.; Deambrosi, E.; Ferreira, D.; Ferreira, R.; Molina, F.; Roel, A.; Terra, J. 2008. Manejo de suelos y nutrición vegetal; arroz resultados experimentales 2007-2008. Montevideo, INIA. 20 p.
14. Carvalho, G. D.; Fageria, N. K.; Ferreira, E. P. B.; Knupp, A. M.; Santos, A. B. 2011. Communications in soil science and plant analysis; chemistry of lowland rice. Goiás, EMBRAPA. National Rice and Bean Center. 1933 p.
15. Castillo, J.; Mori, C.; Perdomo, C.; Terra, J. 2011. Contribución relativa de las distintas fuentes de nitrógeno al cultivo de arroz evaluada mediante la técnica isotópica natural ^{15}N . In: Arroz; resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, INIA. pp. 54-68 (Actividades de Difusión no. 651).
16. _____; Ferreira, A.; Méndez, R.; Terra, J. 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. pp. 4-6 (Actividades de Difusión no. 735).
17. _____; Terra, J.; Vaz, P. 2015. Fertiliz-Arr; hacia una herramienta para la fertilización del cultivo de arroz. Revista INIA. no. 42: 19-21
18. Chebataroff, N. 2012. Arroz uruguayo. Montevideo, Hemisferio Sur. 335 p.
19. Deambrosi, E.; Méndez, R. 2007. Respuesta de cultivares de arroz de tipo Indica a densidades de siembra y aplicaciones de nitrógeno en la zona este de Uruguay. Montevideo, INIA. 36 p. (Serie Técnica no. 167).
20. De Datta, S. 1981. Principles and practices of rice production. New York, Wiley. 618 p.
21. Doberman, A.; Fairhurst, T. 2000. Rice; nutrients disorders and nutrient management. s.n.t. 191 p.
22. Fageria, N. K. 1984. Adubacao e nutricao mineral da cultura de arroz. Goiânia, EMBRAPA. 341 p.

23. _____. 2007. Yield physiology of rice. *Plant Nutrition*. 30 (6): 843-879.
24. _____. 2013. Mineral nutrition of rice. Boca Raton, FL, CRC. 535 p.
25. Fillery, I. R. P.; Roger P. A.; De Datta S. K. 1986. Ammonia volatilization from nitrogen sources applied to rice fields. Floodwater properties and submerged photosynthetic biomass. *Soil Science Society of America Journal*. 50:86-91.
27. Gamarra, G. 1993. Arroz; manual de producción. Montevideo, Hemisferio Sur. 439 p.
28. Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25 (3): 295-309.
29. Inman, D.; Khosla, R.; Mayfi, T. 2005. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review*. 25 (3): 209-214.
30. Kundu, D. K.; Ladha, J. K. 1997. Effect of growing rice on nitrogen mineralization in flooded soil. *Soil Science Society of America Journal*. 61 (3): 839-845.
31. Mejía de Tafur, S.; Menjivar, J. 2010. Nutrición mineral en arroz; nitrógeno, funciones importantes. In: Degiovanni, B.; Martínez, R.; Motta, O. eds. *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina*. Cali, Centro Internacional de Agricultura Tropical. pp. 306-335.
32. Mikkelsen, D. S. 1987. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. *Plant and Soil*. 100(1): 71-97.
33. Patrick, W. H.; Mikkelsen, D. S. 1971. *Fertilizer technology and use*. 2nd. ed. Madison, WI, Soil Science Society of America. 215 p.
34. _____.; Reddy, C. N. 1978. *Soil and rice. Chemical changes in soils*. Los Baños, Philippines, IRRI. 145 p.
35. Ponnampetuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*. 24: 29-96.
36. Ramos García, C. A. 2015. Método para estimar el contenido de Nitrógeno en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) con base en espectrometría. Tesis doctoral. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. 86 p

37. Reddy, K. R.; Patrick, W. H. Jr. 1986. Denitrification losses in flooded rice fields. *Fertilizer Research*. 9 (1-2): 99–116.
38. Rinker, J. N. 1994. Introduction to spectral remote sensing. Alexandria, Virginia, USA, Army Topographic Engineering Center Fort Belvoir. 40 p.
39. Salsas, L.; Chaillou, S.; Morot-Gaudry, J.F.; Lesaint, C.; Jovilet, E. 1987. Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 25(6): 805-812.
40. Sellers, P. J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*. 6(8): 1335-1372.
41. Stansel, J. W. 1975. Rice plant; six decades of rice research in Texas. Texas, Texas University. *The Texas Agriculture Experiment*. 50 p.
42. Verhulst, N.; Govaerts, B.; Sayre, K. D.; Deckers, J.; Francois, I. M.; Dendooven, L. 2009. Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant and Soil*. 317:41-59.
43. _____.; _____.; 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. *Conceptos y estudios de caso*. México, D. F., CIMMYT. 13 p.
44. Yao, Y.; Miao, Y.; Jiang, R.; Khosla, R.; Gnyp, M. L.; Bareth, G. 2013. Evaluating different active crop canopy sensors for estimating rice yield potential. *In: International Conference Agro-Geoinformatics (2nd., 2013, Virginia, USA)*. Proceedings. Ciudad, Arkansas, IEEE. pp. 538-542.
45. Yoshida, S. 1981. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute. 269 p.
46. Yuan Wang, M.; Siddiqi, Y.; Ruth, T. J.; Glass, A. 1993. Ammonium uptake by rice roots. *Plant Physiology*. 103 (4): 1259-1267.

9. ANEXOS

Anexo No. 1. Modelo para la fertilización nitrogenada a macollaje

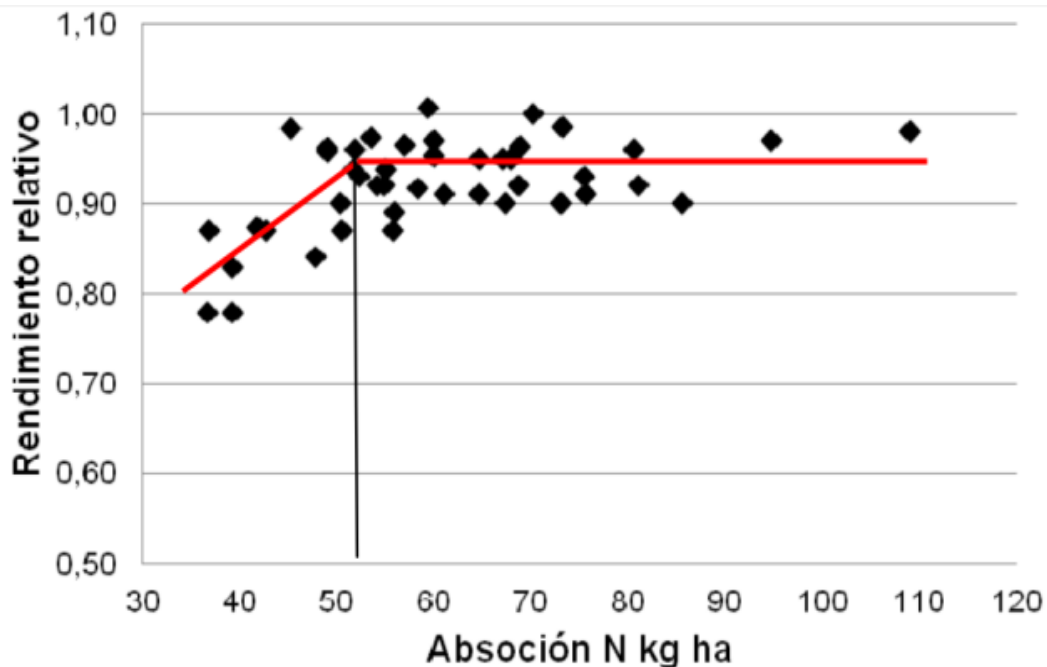


Respuesta a la fertilización N de 51 experimentos analizados en función del P.M.N al estadio de V5-6 en 3 zafras y diferentes localidades

Fuente: Castillo et al. (2014).

Anexo No. 2

MODELO PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA A PRIMORDIO



Respuesta a la fertilización N de 43 experimentos analizados en función de la absorción de N al estadio de R0 en 3 zafras y diferentes localidades.

Fuente: Castillo et al. (2014).

Anexo No. 3

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PARA ANÁLISIS DE PMN

La muestra se toma con calador estando el suelo friable a una profundidad predefinida, para un análisis convencional es 0-15 cm. Requiere un mínimo de 15 tomas hacer una muestra compuesta representativa del sitio. Esta se debe enviar lo antes posible al laboratorio en bolsa de polietileno o ponerla en heladera (4-5°C) hasta el envío. En el laboratorio la muestra se desmenuza a mano lo más rápido posible, se pasa por un tamiz de 2 mm de malla. En otros 10 g de muestra se determina % de humedad y en base a ella se pesa el equivalente a 5 gramos de suelo seco. Esa cantidad se coloca en un tubo con tapa de rosca y agua destilada estéril, que se agita hasta homogeneizar el contenido y se coloca en estufa a 40° C durante 7 días.

Transcurrida la incubación se determina amonio por colorimetría. Paralelamente se analiza la cantidad de amonio inicial en la muestra en 5 g de suelo seco. La diferencia entre el amonio inicial y final es el PMN y se expresa como mg kg^{-1} N-NH^{+4} .

Anexo No. 4

Los gráficos Box-plot son una forma de presentación estadística destinada, fundamentalmente, a resaltar aspectos de la distribución de las observaciones en una o más series de datos cuantitativos.

Dentro de la caja se encuentran el 50 % de las observaciones, los bigotes son líneas que salen de las cajas e indican los valores que se encuentran fuera del 50% de las observaciones centrales, la línea ubicada dentro de la caja se corresponde con la mediana de las observaciones y el punto ubicado dentro de la caja se corresponde con el valor de la media general de las observaciones.

Anexo No. 5

Localidad	Repetición	Tratamiento	%N prim.
Pueblo del Barro	1	TEST	1.5
Pueblo del Barro	1	PMN	1.7
Pueblo del Barro	1	INDI	1.7
Pueblo del Barro	1	PR/2	1.7
Pueblo del Barro	1	PR*2	1.7
Pueblo del Barro	1	PLUS	1.5
Pueblo del Barro	2	PMN	1.5
Pueblo del Barro	2	INDI	1.5
Pueblo del Barro	2	PR/2	1.5
Pueblo del Barro	2	PR*2	1.5
Pueblo del Barro	2	PLUS	1.4
Pueblo del Barro	3	TEST	1.4
Pueblo del Barro	3	PMN	1.1
Pueblo del Barro	3	INDI	1.1
Pueblo del Barro	3	PR/2	1.1
Pueblo del Barro	3	PR*2	1.1
Pueblo del Barro	3	PLUS	1.1

Cerro Cardozo	1	TEST	1.5
Cerro Cardozo	1	PMN	1.2
Cerro Cardozo	1	INDI	1.2
Cerro Cardozo	1	PR/2	1.2
Cerro Cardozo	1	PR*2	1.2
Cerro Cardozo	1	PLUS	1.4
Cerro Cardozo	2	TEST	1.6
Cerro Cardozo	2	PMN	1.4
Cerro Cardozo	2	INDI	1.4
Cerro Cardozo	2	PR/2	1.4
Cerro Cardozo	2	PR*2	1.4
Cerro Cardozo	2	PLUS	1.2
Cerro Cardozo	3	TEST	1.6
Cerro Cardozo	3	PMN	1.3
Cerro Cardozo	3	INDI	1.3
Cerro Cardozo	3	PR/2	1.3
Cerro Cardozo	3	PR*2	1.3
Cerro Cardozo	3	PLUS	1.2
Paso Casildo	1	TEST	1.5
Paso Casildo	1	PMN	1.5
Paso Casildo	1	INDI	1.5
Paso Casildo	1	PR/2	1.5
Paso Casildo	1	PR*2	1.5
Paso Casildo	1	PLUS	1.5
Paso Casildo	2	TEST	1.5
Paso Casildo	2	PMN	1.7
Paso Casildo	2	INDI	1.7
Paso Casildo	2	PR/2	1.7
Paso Casildo	2	PR*2	1.7
Paso Casildo	2	PLUS	1.4

Anexo No. 6

ANÁLISIS DE VARIANZA DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PRIMORDIO

Todas las localidades

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Biomasa a primordio	23	0,45	0,40	26,24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	8280708,93	2	4140354,47	8,30	0,0024
Tratamiento	8280708,93	2	4140354,47	8,30	0,0024
Error	9976568,21	20	498828,41		
Total	18257277,15				

Anexo No. 7

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA A PRIMORDIO

Todas las localidades

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=753,96965

Error: 498828,4107 gl: 20

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
PLUS	3450,37	8	249,71	A
PMN	2551,86	8	249,71	B
TEST	1982,62	7	266,95	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo No. 8

ANAVA DE NITRÓGENO ABSORBIDO A PRIMORDIO

Todas las localidades

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Nitrógeno absorbido	23	0,33	0,26	26,23

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo	963,00	2	481,50	4,90	0,0186
Tratamiento	963,00	2	481,50	4,90	0,0186
Error	1965,82	20	98,29		
Total	2928,82	22			

Anexo No. 9

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE NITROGENO ABSORBIDO A PRIMORDIO

Todas las localidades

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=10,58365

Error: 98,2911 gl: 20

<u>Tratamiento</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>		
PLUS	46,02	8	3,51	A	
PMN	36,17	8	3,51	A	B
TEST	30,24	7	3,75		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo No. 10

ANAVA DE LECTURAS DE NDVI A PRIMORDIO

Todas las localidades

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Lecturas de NDVI a primordio	23	0,32	0,25	12,75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	0,04	2	0,02	4,68	0,0215
Tratamiento	0,04	2	0,02	4,68	0,0215
Error	0,08	20	3,8E-03		
Total	0,11	22			

Anexo No. 11

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE LECTURAS DE NDVI A PRIMORDIO

Todas las localidades

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,06581

Error: 0,0038 gl: 20

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
PLUS	0,52	8	0,02	A
PMN	0,50	8	0,02	A
TEST	0,42	7	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo No. 12

REGRESIÓN ENTRE BIOMASA Y NITRÓGENO ABSORBIDO A PRIMORDIO

Todas las localidades

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Nitrógeno abs. a prim.	47	0,77	0,76	27,49	289,23	294,78

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	6,95	2,69	1,54	12,36	2,59	0,0130		
Biomasa	0,01	9,5E-04	0,01	0,01	12,17	<0,0001	145,89	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3750,07	1	3750,07	148,09	<0,0001
Biomasa	3750,07	1	3750,07	148,09	<0,0001
Error	1139,54	45	25,32		
Total	4889,61	46			

Anexo No. 13

REGRESIÓN ENTRE NDVI Y BIOMASA A PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Lecturas de de NDVI	47	3,8E-03	0,00	4,7E-03	-117,71	-112,16

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	0,51	0,04	0,44	0,58	14,48	<0,0001		

Biom. -5,2E-06 1,3E-05 -3,0E-05 2,0E-05 -0,41 0,680 1,19 1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7,6E-04	1	7,6E-04	0,17	0,6805
Biomasa a prim.	7,6E-04	1	7,6E-04	0,17	0,6805
Error	0,20	45	4,4E-03		
Total	0,20	46			

Anexo No. 14

REGRESIÓN ENTRE LECTURAS DE NDVI Y NITRÓGENO ABSORBIDO A PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Lecturas de NDVI	47	2,5E-03	0,00	4,7E-03	-117,65	-112,10

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	0,4	0,04	0,41		0,56	12,90	<0,0001	
Nitrógeno	3,2E-04	9,5E-04	-1,6E-03	2,2E-03	0,33	0,7392	1,13	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4,9E-04	1	4,9E-04	0,11	0,7392
Nitrógeno abs.	4,9E-04	1	4,9E-04	0,11	0,7392
Error	0,20	45	4,4E-03		
Total	0,20	46			

Anexo No. 15

ANAVA PRODUCCIÓN DE BIOMASA POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Biomasa post-primordio	47	0,46	0,40	14,31

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	35838495,91	5	7167699,18	7,03	0,0001
Tratamiento	35838495,91	5	7167699,18	7,03	0,0001
Error	41781172,52	41	1019052,99		
Total	77619668,43	46			

Anexo No. 16

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLE DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1031,40818

Error: 1019052,9883 gl: 41

Tratamiento	Medias	n	E.E.				
PLUS	8257,62	8	356,91	A			
PR*2	7732,55	8	356,91	A	B		
INDI	7211,43	8	356,91		B	C	
PR/2	7062,63	8	356,91		B	C	
PMN	6369,53	8	356,91			C	D
TEST	5513,18	7	381,55				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo No. 17

REGRESIÓN ENTRE BIOMASA PRODUCIDA POST-PRIMORDIO Y NITRÓGENO AGREGADO TOTAL

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Biomasa post-prim.	47	0.29	0.25	1447702.25	798.48	805.88

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	5820.20	356.03	5102.66	6537.73	16.35	<0.0001		
N total	24.76	8.28	8.07	41.45	2.99	0.0046	10.76	8.80
N total ²	-0.07	0.04	-0.15	0.01	-1.82	0.0750	5.27	8.80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	22175100.55	2	11087550.27	8.80	0.0006
N total	17984822.73	1	17984822.73	14.27	0.0005
N total ²	4190277.82	1	4190277.82	3.33	0.0750
Error	55444567.88	44	1260103.82		
Total	77619668.43	46			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	22175100.55	2	11087550.27	8.80	0.0006
N total	22175100.55	2	11087550.27	8.80	0.0006
Error	55444567.88	44	1260103.82		
Total	77619668.43	46			

Anexo No. 18

ANAVA NITRÓGENO ABSORBIDO POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Nitrógeno absorbido post-prim.	47	0,41	0,34	23,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9691,35	5	1938,27	5,81	0,0004
Tratamiento	9691,35	5	1938,27	5,81	0,0004
Error	13681,50	41	333,70		
Total	23372,85	46			

Anexo No. 19

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE NITRÓGENO ABSORBIDO POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=18,66410

Error: 333,6951 gl: 41

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
PLUS	97,41	8	6,46	A		
PR*2	95,74	8	6,46	A	B	
INDI	77,52	8	6,46		B	C
PR/2	74,31	8	6,46			C D
PMN	65,28	8	6,46			C D
TEST	58,12	7	6,90			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05).

Anexo No. 20

ANAVA DE LECTURAS DE NDVI POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Lecturas de NDVI post-prim.	47	0,31	0,22	11,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,07	5	0,01	3,64	0,0081
Tratamiento	0,07	5	0,01	3,64	0,0081
Error	0,16	41	4,0E-03		
Total	0,24	46			

Anexo No. 21

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE LECTURAS DE NDVI POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,06443

Error: 0,0040 gl: 41

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
INDI	0,60	8	0,02	A
PR*2	0,60	8	0,02	A
PLUS	0,59	8	0,02	A
PR/2	0,58	8	0,02	A
PMN	0,56	8	0,02	A
TEST	0,48	7	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo No. 22

REGRESIÓN ENTRE LECTURAS DE NDVI Y NITRÓGENO ABSORBIDO POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Nitrógeno absorbido	47	0,07	0,05	521,60	427,76	433,31

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	30,70	26,02	-21,70	83,11	1,18	0,2442		
Lecturas	83,78	45,27	-7,39	174,96	1,85	0,0708	4,37	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1653,29	1	1653,29	3,43	0,0708
Lecturas de NDVI	1653,29	1	1653,29	3,43	0,0708
Error	21719,56	45	482,66		
Total	23372,85	46			

Anexo No. 23

REGRESIÓN ENTRE LECTURAS DE NDVI Y BIOMASA PRODUCIDA POST-PRIMORDIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Biomasa post-prim.	47	0,13	0,12	1618371,95	805,50	811,06

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	3260,74	1447,10	346,13	6175,35	2,25	0,0292		
Lecturas	6655,13	2517,80	1584,03	11726,23	2,64	0,011	7,86	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10431620,12	1	10431620,12	6,99	0,0113
Lecturas	10431620,12	1	10431620,12	6,99	0,0113
Error	67188048,30	45	1493067,74		
Total	77619668,43	46			

Anexo No. 24

REGRESIÓN ENTRE RENDIMIENTO Y NITRÓGENO TOTAL AGREGADO
RENDIMIENTO EN FUNCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Rendimiento (kg/ha)	47	0.19	0.15	1803562.33	809.46	816.86

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	11108.42	400.16	10301.96	11914.89	27.76	<0.0001		
N total	23.21	9.31	4.45	41.96	2.49	0.0165	8.10	8.80
N tot^2	-0.07	0.04	-0.16	0.01	-1.68	0.0993	4.79	8.80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16082210.59	2	8041105.29	5.05	0.0106
N total	11569986.58	1	11569986.58	7.27	0.0099
N total^2	4512224.01	1	4512224.01	2.83	0.0993
Error	70040686.30	44	1591833.78		
Total	86122896.89	46			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16082210.59	2	8041105.29	5.05	0.0106
N total	16082210.59	2	8041105.29	5.05	0.0106
Error	70040686.30	44	1591833.78		
Total	86122896.89	46			

Anexo No. 25

ANAVA DE RENDIMIENTOS SECO Y LIMPIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento (kg/ha)	47	0,32	0,24	9,80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	27487323,56	5	5497464,71	3,84	0,0060
Tratamiento	27487323,56	5	5497464,71	3,84	0,0060
Error	58635573,32	41	1430135,93		
Total	86122896,89	46			

Anexo No. 26

PRUEBA DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE RENDIMIENTO SECO Y LIMPIO

Todas las localidades

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1221,85832

Error: 1430135,9347 gl: 41

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
PR/2	12902,99	8	422,81	A		
PR*2	12844,30	8	422,81	A		
PLUS	12775,02	8	422,81	A	B	
INDI	12142,38	8	422,81	A	B	
PMN	11597,18	8	422,81		B	C
TEST	10754,12	7	452,00			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Anexo No. 27

REGRESIÓN ENTRE NITRÓGENO ABSORBIDO 15 DIAS POST-PRIMORDIO Y RENDIMIENTO SECO Y LIMPIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Rendimiento (kg/ha)	45	0.29	0.28	1203048.87	757.63	763.05

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const.	9921.45	567.94	8776.09	11066.82	17.47	<0.0001		
Nitrógeno	29.15	6.91	15.22		43.09	4.22	0.0001	18.43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	19587994.43	1	19587994.43	17.81	0.0001
Nitrógeno absorbido pos.	19587994.43	1	19587994.43	17.81	0.0001
Error	47287263.89	43	1099703.81		
Total	66875258.32	44			

Anexo No. 28

REGRESIÓN ENTRE LECTURAS DE NDVI 15 DIAS POST-PRIMORDIO Y RENDIMIENTO SECO Y LIMPIO

Todas las localidades

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Rendimiento (kg/ha)	44	0.36	0.33	1180363.18	739.60	746.74

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpM	VIF
Const.	-15807.37	7028.66	-30002.03	-1612.71	-2.25	0.0299		
Lectura	94433.90	25332.25	43274.39	145593.41	3.73	0.0006	15.59	129.55
Lectura	-78116.76	22664.38	-123888.38	-32345.13	-3.45	0.0013	13.62	129.55

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	24165532.67	2	12082766.33	11.56	0.0001
Lecturas de NDVI	11744723.07	1	11744723.07	11.23	0.0017
Lecturas de NDVI post.	12420809.60	1	12420809.60	11.88	0.0013
Error	42867962.79	41	1045560.07		
Total	67033495.46	43			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	24165532.67	2	12082766.33	11.56	0.0001
Lecturas de NDVI	24165532.67	2	12082766.33	11.56	0.0001
Error	42867962.79	41	1045560.07		
Total	67033495.46	43			