



Tecnologías de agricultura de precisión y manejo por ambiente de nutrientes en arroz

INFORME DE RESULTADOS

Campaña 2020/2021

MELCHIORI R.J.¹, HILL S.^{2,3}, HILL E.³,

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Paraná Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

² Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

³ Asesor privado, San Salvador, Entre Ríos, Argentina.

Resumen: Durante la campaña 2019 se evaluaron estrategias de fertilización con P, N, K y ZN, en dosis mayores a las prácticas habituales, en ambientes de productividad diferenciada dentro de los lotes. Se delimitaron zonas de baja (ZB) y alta productividad (ZB) mediante mapas de rendimiento de cultivos anteriores. Los suelos según ambientes, mostraron valores bajo de P, y moderados altos de K. en todos los casos, los contenidos de Ca fueron muy altos. Se utilizó un sensor soil optix, para relevar suelos, obteniéndose mapas de alta resolución espacial de múltiples variables de suelo. Algunas de las variables se validaron en forma preliminar obteniéndose valores similares a los de los análisis de suelo, excepto el contenido de materia orgánica y K que fueron subestimados. Los tratamientos de fertilización con PKNZn, no mostraron efectos estadísticamente significativos respecto al manejo del productor. Los tratamientos con dosis creciente de N incrementaron significativamente el rendimiento. Se determinaron relaciones entre el contenido de N en planta y curvas de referencia para estimar el status nutricional. De manera adicional, se utilizaron índices de vegetación estimados mediante monitoreo satelital que permitió obtener relaciones entre la acumulación de N en la planta, y el rendimiento del cultivo. Los resultados obtenidos, sugieren evaluar estrategias de manejo del N que incremente el rendimiento y/o la eficiencia, asistidas mediante técnicas y herramientas de la agricultura de precisión.

OBJETIVO GENERAL:

Generar información sobre manejo diferencial por zonas de productividad diferente, ajuste de fertilización diferenciadas con NPKZn y su monitoreo mediante imágenes satelitales en arroceras entrerrianas, para mejorar la productividad y la eficiencia de uso de insumos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Determinar zonas de productividad diferencial en base a mapas de rendimiento de cultivos anteriores de arroz.
2. Caracterizar los suelos de las zonas delimitadas mediante muestreos de suelos.
3. Relevar con un sensor Soil Optix y muestreos detallados los suelos de arroceras y su relación con la productividad del cultivo.
4. Monitorear el estatus nitrogenado del arroz utilizando índices de vegetación derivados de imágenes satelitales.

MATERIALES Y MÉTODOLOGIA

En la campaña 2020/21, se seleccionaron lotes en situaciones contrastantes, considerando la intensidad de uso agrícola anterior, los cultivos antecesores y las características de variabilidad observadas previamente utilizando información de mapas de rendimiento anteriores. A partir del análisis de mapas de rendimiento de cultivos anteriores se delimitaron zonas de alta y baja productividad diferencial, utilizando como criterio de diferenciación el valor de rendimientos relativos. Se establecieron zonas de baja productividad (ZB) cuando el rendimiento relativo promedio fue menor al 65% y zonas de alta productividad cuando el rendimiento relativo fue mayor al 85%.

Los cuatro lotes de producción seleccionados fueron Biguá, Colibrí Este, Urraca, y Doctor Sur. (Figura 1). En todos los casos los laboreos fueron realizados entre julio y agosto, con una pasada de rastra de discos pesada, y tres pasadas de rastrón nivelador. Las prácticas de manejo del cultivo de arroz, fueron en general las habitualmente realizadas en el establecimiento.

La siembra comenzó el 30 de septiembre del 2020 en el lote Colibrí Este con la variedad "MEMBY-PORA", intersembrándose un 30 % del lote el 5 de noviembre. Se continuó con el lote Biguá el 7 de octubre del 2020 con la variedad "GURI-INTA" y se intersembró un 70% del lote el 8 de noviembre del 2020. El Doctor Sur se sembró el 5 de octubre del 2020 con la variedad "MEMBY-PORA", lote que debió ser resembrado en el total del área el 10 de noviembre del 2020. El ultimo lote sembrado fue el Urraca el 11 de octubre del 2020. En todos los casos, las resiembras fueron realizadas por problemas de implantación que generaron bajos stand de plantas.

Las densidades de siembra fueron de 140 a 150 kg ha⁻¹ para las variedades de largo fino (GURI y MEMBY PORÁ) y de 180 kg ha⁻¹ para las variedades largo ancho (KIRA). La intersiembra se realizó con 100 kg ha⁻¹. La semilla fue tratada con zinc a

una dosis de 0,3 l (70% p/v) + un fungicida (carbendazim + tiram) a una dosis de 0,2 l; cada 100 Kg de semilla.

Se utilizaron herbicidas en pre-emergencia para el control de malezas. Los tratamientos utilizados fueron de 3,5 l ha⁻¹ de glifosato + 0,070 l ha⁻¹ de dicamba + 0,9 l ha⁻¹ de clomazone, para todos los lotes.

Las fertilizaciones de base, se realizaron en cobertura días previos a la siembra del cultivo; mientras que la fertilización previa al inicio de riego, se realizó con urea en una dosis de 140 kg aplicada en cobertura (a excepción del lote Doctor Sur, ver detalle Tabla 2). En este momento, también se realizaron tratamientos con herbicidas en post-emergencia con imazapic + imazapir en dosis de 280 gr ha⁻¹ para los lotes de arroz largo fino, mientras que en el caso del lote con KIRA-INTA se aplicó 2 l ha⁻¹ de cyhalofop butil y 0,25 l ha⁻¹ de profoxidim.

Luego de estas prácticas se comenzaron a realizar los riegos en cada uno de los lotes. En enero, en sincronía con el estadio de diferenciación del cultivo, se realizó una segunda fertilización de 90 kg ha⁻¹ de urea aplicada con avión. Mas tardíamente, en febrero cuando el cultivo se encontraba en inicio de floración, se realizó una aplicación de fungicida (azoxystrobina + ciproconazole) 0,5 l. ha⁻¹ y 0,3 l ha⁻¹ de un bioestimulante con avión.

En cada lote y zona delimitada se realizaron muestreos compuestos de suelos (0-20 cm de profundidad) para determinar el pH, la conductividad eléctrica (CE) y el contenido de MO, P, Nt, Zn, capacidad de intercambio de cationes (CIC) y cationes intercambiables (Ca, Mg, Na, K), y el porcentaje de saturación de bases.

En cada uno de los lotes y zonas de productividad delimitadas se realizó experimentos en franjas a nivel de cultivo con maquinaria comercial para evaluar las prácticas de manejo actual (manejo productor), vs alternativas con distintas combinaciones y dosis de nutrientes.

Los experimentos se establecieron mediante ensayos en franjas de al menos 60 m de ancho y 200 a 300 m de largo, dentro de las zonas diferenciadas. Los tratamientos evaluados fueron seleccionados en base a los resultados obtenidos en experimentos anteriores (Informe Proyecto Desarrollo de AP en ARROZ, 2019).

Se evaluaron tratamientos con fertilización de base tradicional (NPKZn), y alternativas utilizando mayores dosis de P, K y Zn (tres experimentos – **Tabla 1**) y combinaciones de las mismas fertilizaciones de base, con 3 niveles de N suministrados en aplicaciones pre riego (tres experimentos – **Tabla 2**).

Tabla 1. Tratamientos para evaluar efectos aditivos de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), y cinc (Zn) sobre el rendimiento del cultivo de arroz en ambientes de productividad diferencial delimitados a escala intra-lote, mediante el uso de mapas de rendimiento de cultivos anteriores. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21)

TRATAMIENTOS	Fertilización	P	K	N	N	Zn	N
	Base pre siembra	Dosis base kg ha ⁻¹			Dosis pre riego kg ha ⁻¹		diferenciación kg ha ⁻¹
T1 (base productor)	Mezcla química (PKNZn)	6	3	21	69	0,1	46
T2 (base FDA+K)	FDA + KCl	16	21	14	69	0,1	46
T3 (base FDA+K)	FDA + KCl	16	21	14	69	1,4	46
T4 (base FDA+K)	FDA + KCl	16	42	14	69	1,4	46

Tabla 2. Tratamientos para evaluar la respuesta a nitrógeno (N) sobre tratamientos de base con distintas dosis de fósforo (P) y potasio (K), sobre el rendimiento del cultivo de arroz en ambientes de productividad diferencial delimitados a escala intra-lote, mediante el uso de mapas de rendimiento de cultivos anteriores. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21)

TRATAMIENTOS	Fertilización	P	K	N	N
	Base pre siembra	Dosis base kg ha ⁻¹		Dosis pre riego kg ha ⁻¹	diferenciación kg ha ⁻¹
T1 (base productor)	Mezcla química	6	3	46	46
T2 (base productor)	Mezcla química	6	3	69	46
T3 (base productor)	Mezcla química	6	3	92	46
T4 (base FDA+K)	FDA + KCl	16	21	46	46
T5 (base FDA+K)	FDA + KCl	16	21	69	46
T6 (base FDA+K)	FDA + KCl	16	21	92	46

En tres de los lotes experimentales, se realizó un relevamiento utilizando un sensor “proximal” Soil Optix, (<https://soiloptix.com>). En cada caso, se utilizó para la metodología implementada por el servicio del Dpto. de Agricultura de Precision AGD. Para la realización del relevamiento se realizaron transectas en algunos casos siguiendo el contorno de taipas, y en otros en forma transversal siguiendo líneas paralelas. En cada uno de los lotes relevados se realizaron muestreos de suelo adicionales dirigidos según los mapas obtenidos con el sensor, con extracción de una muestra compuesta cada 6 has. En los puntos seleccionados, se extrajeron muestras (0- 20 cm de profundidad) las que fueron analizadas y utilizadas para realizar las calibraciones requeridas por el sensor. El equipo permite generar estimaciones de 25 variables físico químicas mediante software propietario (arcilla, limo, arena, MO, pH, MO, P, Ca, Mg, Na, K, CIC, CE, Zn, Cu, Mn, Bo, S, Fe, y relaciones de bases). El sistema utilizado, otorga informes y mapas en formatos de intercambio (.shape), los cuales se obtienen con una muy alta resolución espacial (852 puntos interpolados por ha⁻¹).

Durante el crecimiento del cultivo, se realizaron mediciones de biomasa mediante muestreos de $0,33 \text{ m}^2$, en cada uno de los tratamientos y zonas dentro de cada uno de los lotes experimentales. Las muestras se llevaron a estufa de circulación de aire forzada para determinar el contenido de materia seca (MS), luego fueron molidas y analizadas para determinar el contenido de Nt y K, a los fines de determinar el estado nutricional. A partir de la MS acumulada y la concentración de N en la biomasa se calculó el N acumulado en planta hasta diferenciación. Asimismo, con la concentración de N actual en el tejido y los contenidos de N críticos (N_c) correspondientes para los distintos valores de MS acumulada en cada caso medido, según la curva de dilución ($N_c = 3,53 W^{-0,28}$; donde W = materia seca acumulada en tn ha^{-1}) (Ata-ul-Karim, et al., 2013), se calcularon índices de nutrición nitrogenada ($\text{INN} = N_a/N_c$).

Para evaluar la variabilidad espacial en el crecimiento y el estatus nitrogenado, durante el crecimiento del cultivo se realizó un monitoreo mediante índices de vegetación derivados de imágenes satelitales multiespectrales (SENTINEL 2). Se estimaron relaciones entre mediciones al estadio de diferenciación para evaluar la capacidad predictiva de la biomasa, el nitrógeno acumulado por el cultivo hasta diferenciación y el rendimiento en grano. En todos los lotes experimentales el rendimiento del cultivo se determinó mediante la utilización de cosechadoras equipadas con monitor de rendimiento, previamente calibrados. Los mapas de rendimiento, fueron depurados y los resultados de los experimentos de fertilización fueron extraídos de los mapas de rendimiento mediante procedimientos en QGis v. 3.6 y se analizaron con el programa INFOSTAT v 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

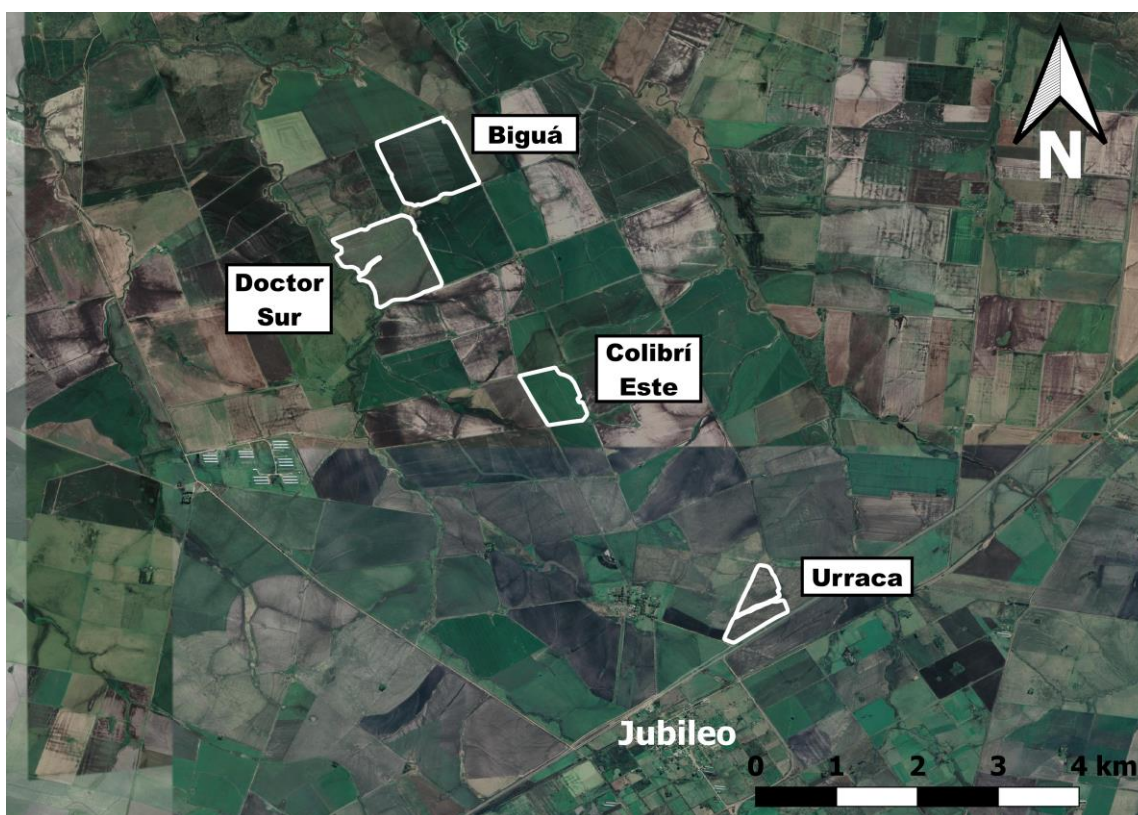


Figura 1- Ubicación del área de estudio y lotes experimentales con cultivos de arroz seleccionados para el estudio en la campaña 2020/2021. (Ea. Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos).

Mapas de rendimiento relativo y zonas de productividad diferente delimitadas

Se procesaron mapas de rendimiento de las campañas previas de arroz mediante el uso de metodologías estándar para depurar de valores erróneos los mapas de rendimiento mediante el uso de procedimientos en Qgis. Se calcularon rendimientos relativos, como el cociente de cada dato respecto al máximo observado por lote. La delimitación de zonas de productividad diferente se realizó considerando valores de 65 y 85% de rendimiento relativo.



Figura 2- Mapas de rendimiento relativo de cultivos de arroz y zonas de productividad delimitadas y localización de franjas de experimentos de fertilización campaña 2020/2021. (Lote Biguá Ea Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos).

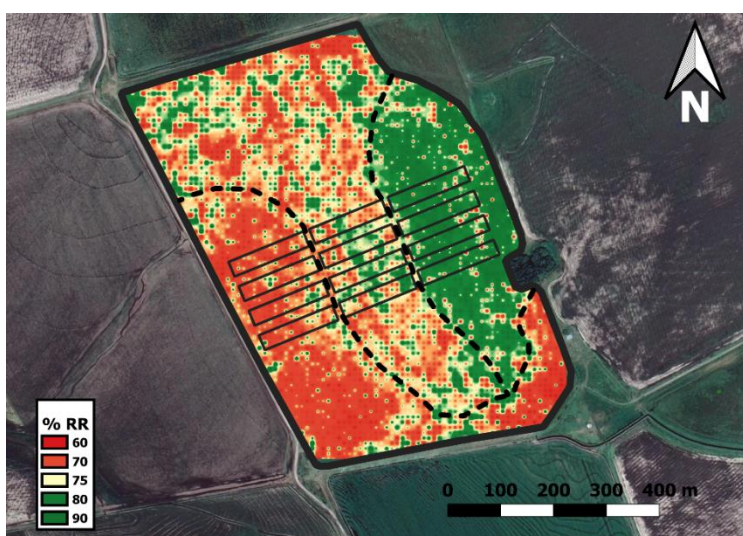


Figura 3- Mapas de rendimiento relativo de cultivos de arroz y zonas de productividad delimitadas y localización de franjas de experimentos de fertilización campaña 2020/2021. (Lote Colibrí Este, Ea Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos).



Figura 4- Mapas de rendimiento relativo de cultivos de arroz, zonas de productividad delimitadas y localización de franjas de experimentos de fertilización campaña 2020/2021. (Lote Urraca Ea Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos).

Características químicas de los suelos según zonas de productividad diferente

En cada una de los lotes y zonas delimitadas se realizaron muestreos dirigidos de suelos previo a la siembra de los cultivos. Los resultados obtenidos, estuvieron dentro de los valores habitualmente reportados para suelos de arroceras en la región y se reportan en la (**Tabla 3**).

El pH del suelo estuvo en todos los casos en valores cercanos o superiores a 7, indicando condiciones levemente alcalinas. Los datos relevados también reflejan los muy altos contenidos de Ca que se observan para todos los lotes y zonas evaluadas. La CIC fue alta tanto en zonas de alta como de baja productividad, con bajos valores de PSI en todos los casos. El contenido de Ca intercambiable fue muy alto, evidenciando en consecuencia situaciones de desbalance en las bases intercambiables, y condiciones que podrían inducir deficiencias o inmovilización de algunos nutrientes como el caso de K, Zn, Fe.

Los valores de MO determinados evidenciaron claramente las diferencias de manejo anterior de los lotes, donde en el caso del lote Urraca, con pocas campañas agrícolas desde una situación de antecesor pradera mostraron valores relativamente altos de MO y Nt, muy por encima de los valores observados en los demás lotes experimentados. El contenido de Zn mostró valores medios y en un solo sitio se observaron valores por debajo del umbral de 1 ppm, sugeridos como nivel de suficiencia para el nutriente en cultivos agrícolas. Por otra parte, los valores P determinados fueron bajos a muy bajos, (Hernandez y Berger 2002, Quinteros 2019)

característicos de los suelos de la región (Plan mapa de suelos de ER, INTA EEA Paraná) y sugieren que este nutriente puede constituir un problema potencialmente más importante en suelos en rotación con otros cultivos agrícolas en secano. El contenido de K intercambiable, fue moderado a alto, por encima de valores sugeridos como deficitarios (< 120 ppm, según Barbazán et al., 2013), aunque no hay umbrales calibrados para el cultivo en la región.

Tabla 3. Características químicas del suelo previo a la siembra del cultivo de arroz, determinadas a la profundidad de 0-20 cm, en zonas de alta (ZA) y baja productividad (ZB) en tres lotes experimentales (Urraca, Colibrí y Biguá). (Ea Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos). pH, contenidos de materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), fósforo extraíble (P), cinc (Zn), S de sulfato (S), potasio intercambiable (K), conductividad eléctrica del suelo (CE) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI). (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Lote	Zona	pH	MO (%)	Nt (%)	P	Zn	K mg kg ⁻¹	Ca	Mg	CIC cmol(+) kg ⁻¹	PSI (%)	CE (dS.m ⁻¹)
URRACA	ZA	6,65	4,48	0,22	11,3	1,04	257	5671	559	36,1	2,6	0,693
	ZB	6,98	4,70	0,22	11,3	1,16	232	6072	511	40,3	2,5	0,567
COLIBRI	ZA	7,24	2,80	0,14	3,2	0,78	264	3928	681	30,4	3,8	0,518
	ZB	7,14	3,25	0,15	6,1	0,81	242	5010	632	32,2	3,3	0,522
BIGUA	ZA	7,24	3,25	0,14	4,0	1,03	304	4228	620	30,2	3,1	0,84
	ZB	7,18	3,30	0,14	6,5	1,09	326	4248	450	30,8	3,0	0,796

Relevamiento de suelos con el sensor Soil Optix.

La caracterización de la variabilidad espacial en los suelos a nivel de lote y zonas de productividad diferencial, se realizó mediante la utilización de un sensor Soil Optix, lo cual no ha sido anteriormente utilizado ni reportando para ambientes como los de las arroceras entrerrianas, con suelos vérticos con muy altos contenidos de arcillas. El relevamiento de los suelos se desarrolló con los lotes ya taipados (Figura 5), lo cual limitó la velocidad de tránsito e incrementó el tiempo de relevamiento. No obstante, la condición limitante del terreno, el relevamiento detallado de aproximadamente 200 has, fue realizado en 1,5 jornadas de trabajo de 6 hs., lo cual demuestra la muy alta capacidad del sistema para realizar el relevamiento y muestreo detallado de calibración requerido en cada campo.



Figura 5- Relevamiento de suelos de arrocería con sensor Soil Optix. a) muestreo de suelos convencional para calibración del sensor. b) detalle del sensor y montaje para relevamiento a campo. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21)

El relevamiento de suelos mediante el sensor proximal Soil Optix, fue validado mediante comparaciones de los valores medidos en suelo mediante los muestreos dirigidos a nivel de zonas para las variables de mayor interés, entre ellas el pH y el contenido de MO, K, y Ca. De manera preliminar, los resultados obtenidos mostraron estimaciones de los valores de MO menores a los determinados en los análisis de suelo convencionales, mientras que los valores como los de pH y Ca estuvieron en valores similares, con diferencias del orden de 5 a 10%. En el caso del contenido de K, esta variable fue medida en suelos y también en el contenido en planta, por lo cual se compararon ambas alternativas. El contenido de K estimado, estuvo muy bien relacionado con el K medido en muestras de suelo a nivel de zonas, aunque en valores absolutos las estimaciones estuvieron subestimadas en promedio en un 20% (**Figura 6**). La validación presentada, debe ser tomada con precaución, dado que las resoluciones espaciales y el área representadas son diferentes. El sensor releva en mayor medida el área total de la zona mientras que, con el muestreo de suelos compuesto, se asume que este valor obtenido representa el valor medio de una zona considerablemente extensa en los casos estudiados, ya que las zonas de diferente productividad pueden ser de superficie variable. En los lotes estudiados se han encontrado zonas relativamente homogéneas (en productividad) en el orden de las 10 a las 50 ha aproximadamente.

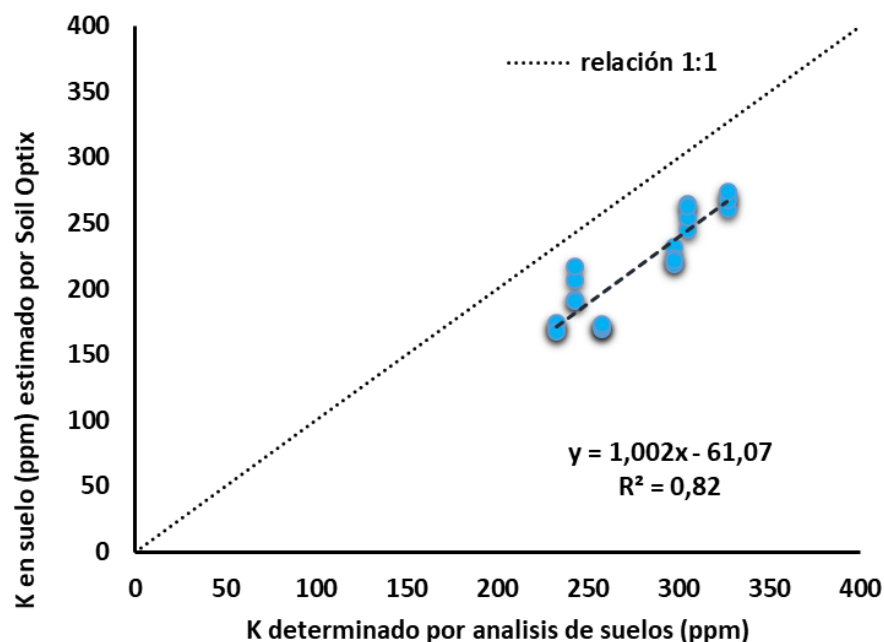


Figura 6- Relación entre el contenido de potasio (K), determinado mediante muestreos y análisis de suelos en arrozceras y el estimado mediante relevamiento con un sensor Soil Optix. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

De manera, adicional ambas formas de medición del contenido de K se relacionaron con las determinaciones del contenido de K en planta medido en muestras del cultivo al momento de diferenciación. Si bien en todos los casos el nivel de K en suelo estuvo en valores que no implicaría deficiencia, los valores medidos (análisis de suelos) y estimados (Soil Optix) reflejaron sin embargo incrementos en el contenido de K en planta ante incrementos en el contenido de K determinado en suelo por ambas metodologías, demostrando que ambas formas de medición y estimación demostraron sensibilidad para detectar situaciones de disponibilidad de K variables (**Figuras 7a, b**)

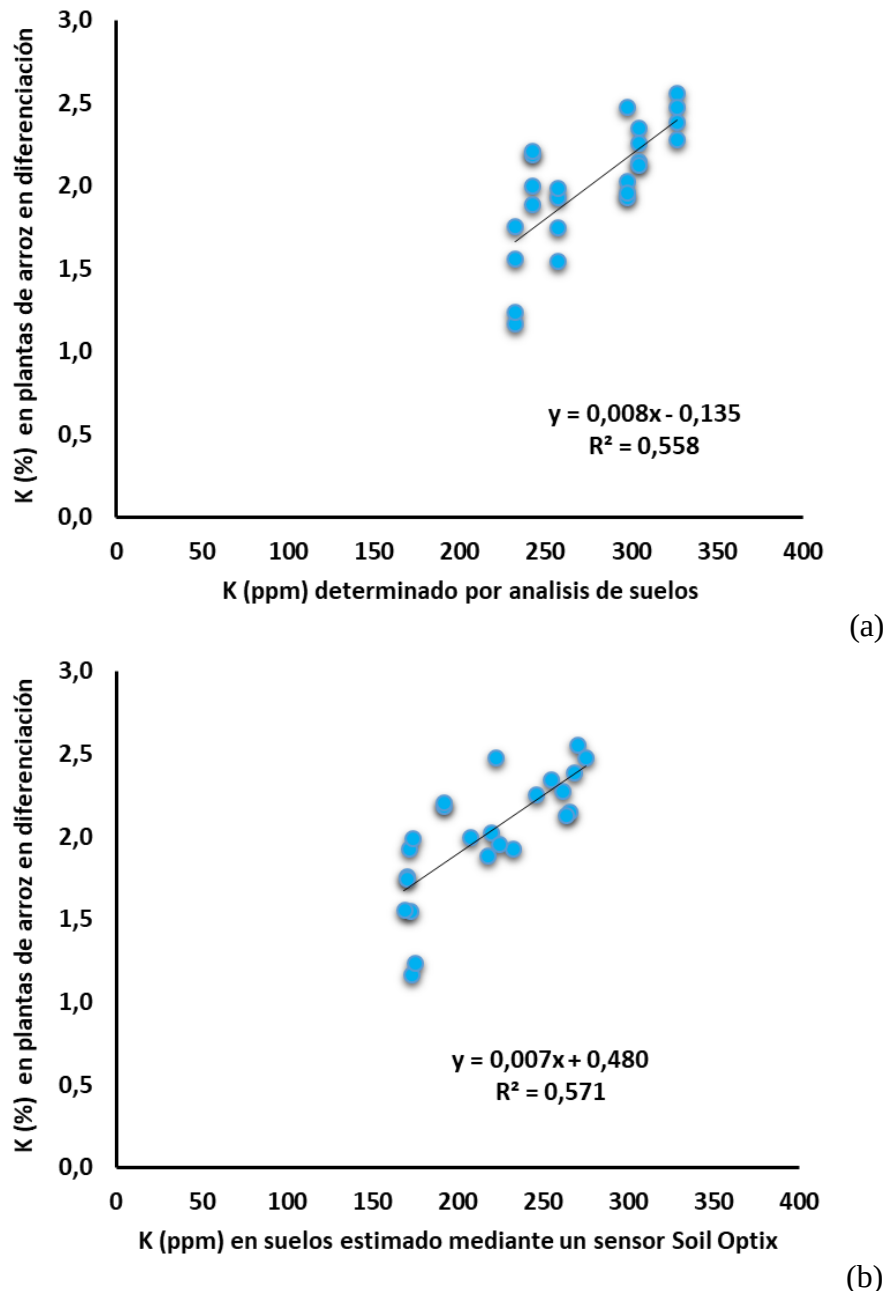


Figura 7- Relación entre el contenido de potasio en planta (K) al estadio de diferenciación, (a) el contenido de K en suelos determinado mediante muestreos y análisis de suelos en arroceras, (b) estimado mediante relevamiento con un sensor Soil Optix. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

El sistema soil optix, permite estimar más de 25 variables, las que son mapeadas en una resolución espacial de 850 muestra por ha. Los mapas obtenidos, permiten tener de manera expeditiva, y muy alta densidad de puntos y conocer la variabilidad a escala intralote. A continuación, se muestra casos seleccionados (Figura 8) y adicionales en anexo 2.

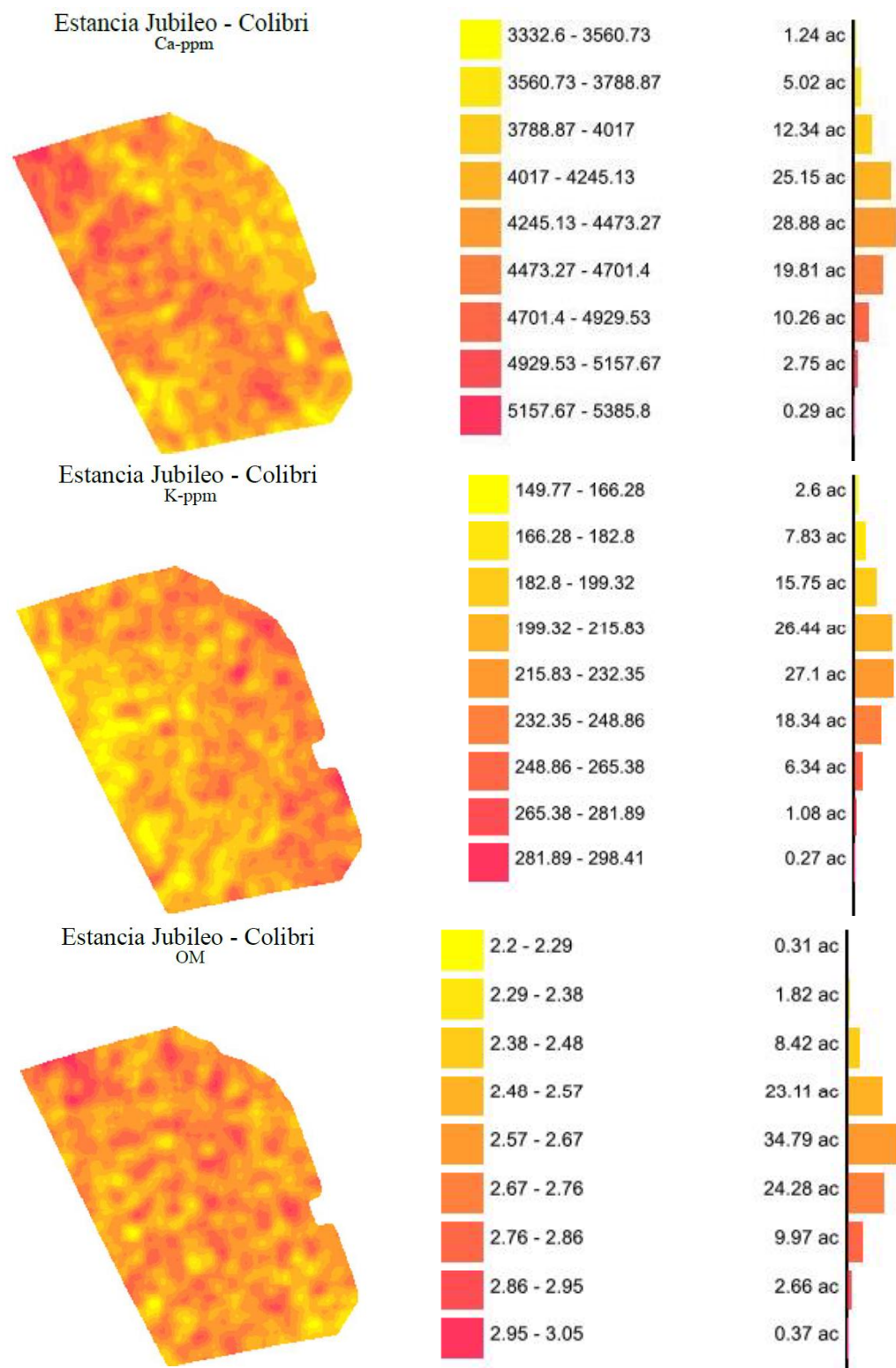


Figura 8. Mapas de variabilidad espacial del contenido de Ca, K, MO en suelos en arrozceras estimados mediante relevamiento con un sensor Soil Optix. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Experimentos de fertilización por ambientes con P, K, N y Zn.

En la presente campaña, se evaluaron tratamientos con fertilización de base tradicional (NPKZn), y alternativas utilizando mayores dosis de P, K y Zn en las zonas de productividad diferente delimitadas en tres lotes. Los rendimientos medios del cultivo fueron altos, entre 8 y 10,5 tn ha⁻¹. Los tratamientos de fertilización evaluados (Tabla 1), no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí, sugiriendo la ausencia de respuesta a la fertilización adicional con P aun en lotes con niveles bajos de P entre 3,2 y 11 ppm (Tabla 3) (ver Tablas de comparaciones de medias en ANEXO), respecto al uso de un fertilizante base con un aporte de solo 6 kg de P ha⁻¹. Asimismo, tampoco se observó respuesta a la fertilización con K en suelos con contenidos en el rango de 232 a 326 ppm. Solo se observaron diferencias de rendimiento estadísticamente significativas entre las zonas de productividad diferenciadas (**Fig. 8a, b, c**), que oscilaron entre 200 y 550 kg ha⁻¹.

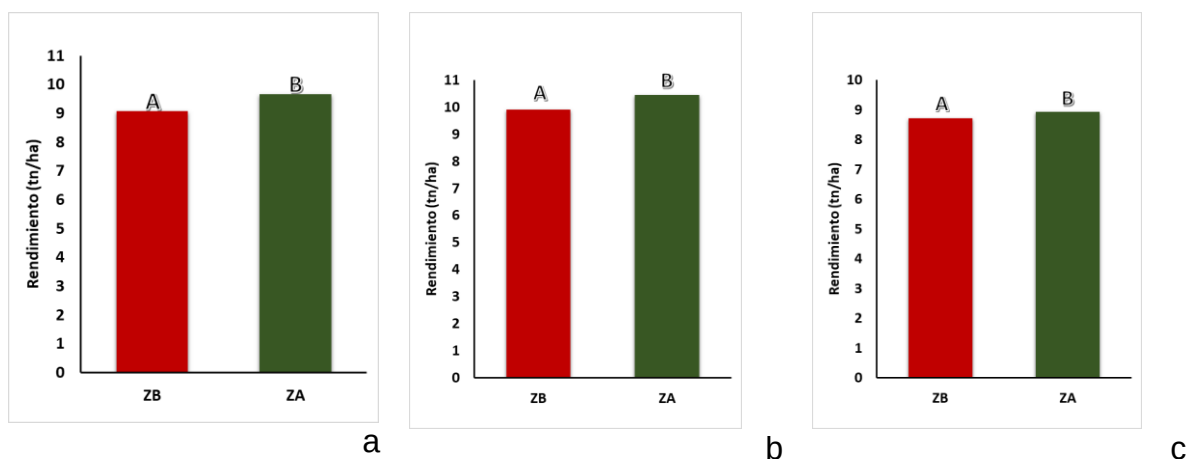


Figura 9. Rendimiento del cultivo de arroz con fertilización con nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), y zinc (Zn) en ambientes de productividad diferencial delimitados a escala intra-lote. Lotes a) Biguá, b) Colibrí Este, c) Urraca. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21). ZB: zonas de baja productividad; ZA: zona de alta productividad. (Letras diferentes indican diferencias significativas al test LSD Fisher, $\alpha = 5\%$).

En experimentos adicionales, (Lote Doctor Sur) se evaluaron tratamientos con dosis crecientes de fertilización nitrogenada aplicada en pre riego, (46 a 92 kg de N aplicados por hectárea), sobre cultivos implantados con diferente fertilización de base. En los resultados obtenidos no se observó respuesta significativa al aporte de K y P, ni interacción del aporte de este nutriente con la respuesta a N. En cambio, el aporte adicional de N en pre riego incrementó significativamente el rendimiento (**Fig 10**). Los tratamientos con 46 kg de nitrógeno arrojaron un promedio de rendimiento de 9,39 tn ha⁻¹, con 69 kg ha⁻¹ de nitrógeno el rendimiento fue de 9,51 tn ha⁻¹ y con una dosis de 92 kg ha⁻¹ de nitrógeno el rendimiento fue de 9,89 tn ha⁻¹. Estas respuestas fueron menores a las esperadas debido a que se retrasó el ciclo del arroz debido a que el lote se resembró por problemas en la implantación del cultivo.

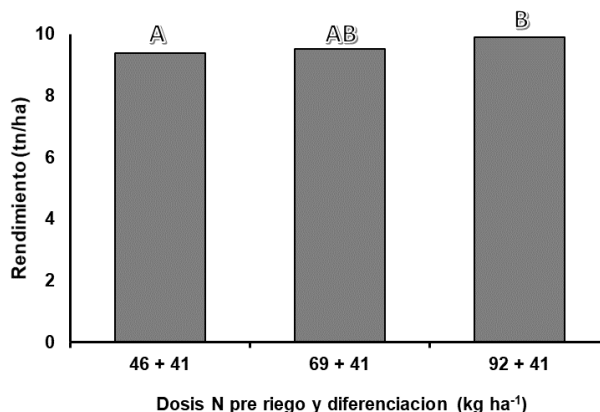


Figura 10. Respuesta media a la fertilización con dosis crecientes de N en pre riego para el cultivo de arroz (Lote Doctor Sur, Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21). (Letras diferentes indican diferencias significativas al test LSD Fisher, $\alpha = 5\%$).

Determinación del estatus nitrogenado de los cultivos mediante muestreos de planta y monitoreo con imágenes satelitales.

Durante el crecimiento de los cultivos, se realizaron mediciones de la biomasa acumulada para las distintas condiciones de cultivos disponibles, diferentes lotes, zonas de productividad diferente delimitadas en los lotes, así como también diferentes tratamientos de fertilización con P, K, N. Se determinaron situaciones que reflejan un amplio rango de condiciones de crecimiento y status de nutrición nitrogenada. Los resultados obtenidos, se graficaron en referencia a curvas de dilución del N (**Figura 11a**). De acuerdo a estas, el contenido de N podría estar siendo deficitario en muchos casos. En concordancia con este indicador, los experimentos con dosis de N en niveles mayores a los habitualmente utilizados mostraron incrementos en el rendimiento (**Figura 10**). De la misma manera, la relación obtenida entre el INN (grado de déficit o suficiencia de N en la biomasa) determinado en diferenciación y el rendimiento del cultivo muestran una relación que evidencia la concordancia entre un estatus de N adecuado (INN = 1) y rendimientos cercanos a las 10 tn ha⁻¹ (**Figura 11b**). Este resultado, y la posibilidad de alcanzar rendimientos mayores, podría indicar la necesidad de recalcular las curvas de dilución para condiciones locales con rendimientos mayores a los considerados en los estudios referidos (Ata-Ul-Karim, et al 2013).

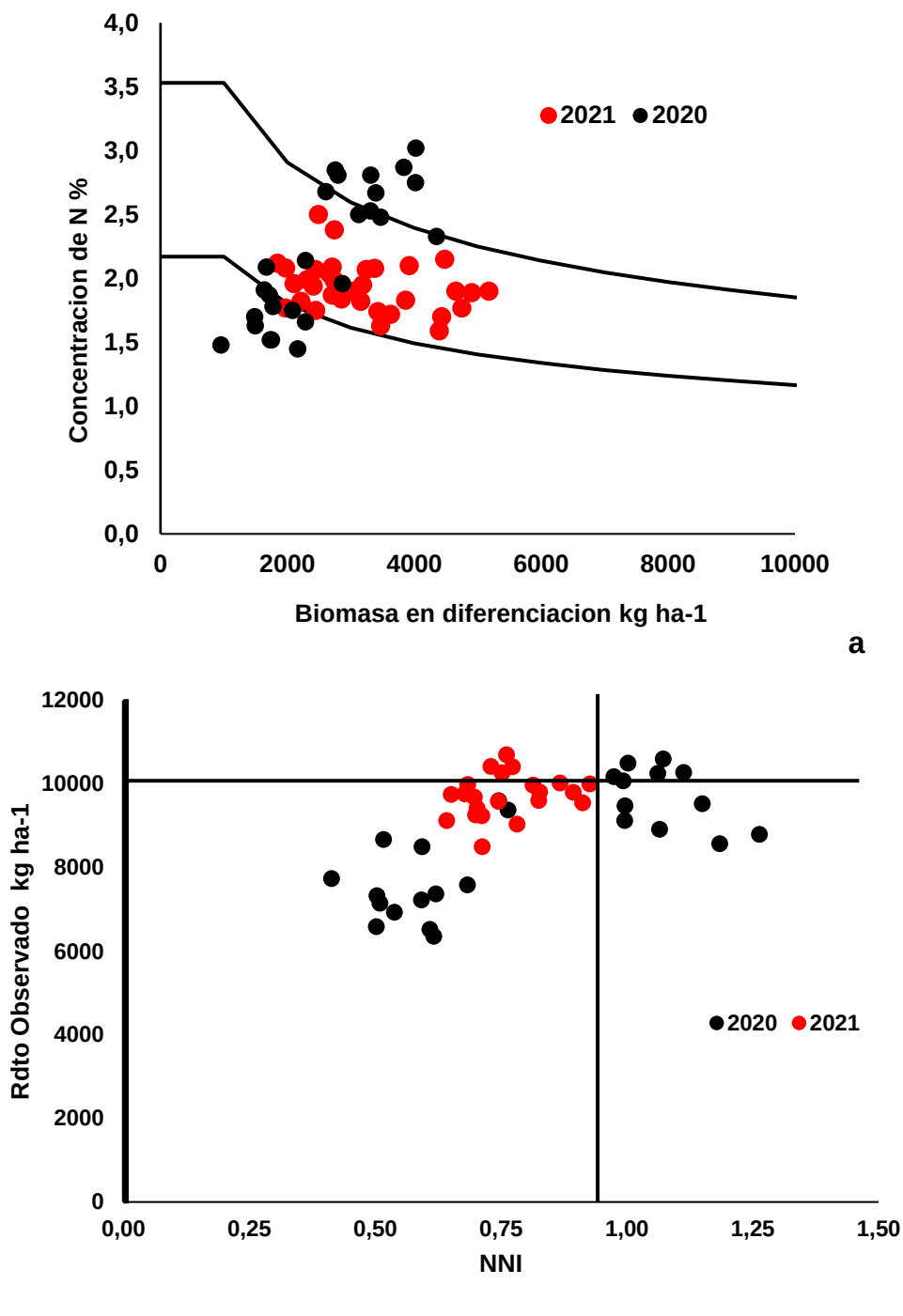


Figura 11: Estatus nutricional nitrogenado del arroz en diferenciación para distintos tratamientos de fertilización. A) Status nitrogenado en relación a la curva de dilución del nitrógeno de arroz (Ata-Ul-Karim et al., 2013). Círculos negros (datos 2019/20) y círculos rojos (datos campaña 2020/21). b) relación entre el INN y el rendimiento del cultivo, resultados 2019/20 y 2020/21 (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

El monitoreo remoto mediante imágenes permitió determinar relaciones entre el N acumulado en diferenciación, estimador referido en información local como predictor del rendimiento (Quinteros, 2016). Asimismo, el uso de índices clásicos como el NDVI mostraron relaciones con ambas variables (**Figura 12**). Es oportuno señalar que la relación entre el NDVI y el N acumulado en planta hasta diferenciación mostró una relación exponencial, donde por encima de un valor aproximado a 0,80, se observa que el índice pierde sensibilidad. En esta situación los cultivos alcanzan acumulaciones mayores a los 60 y hasta 120 kg N ha⁻¹, indicando la necesidad de explorar otros índices indicadores sensibles en un rango de medición más amplio de valores.

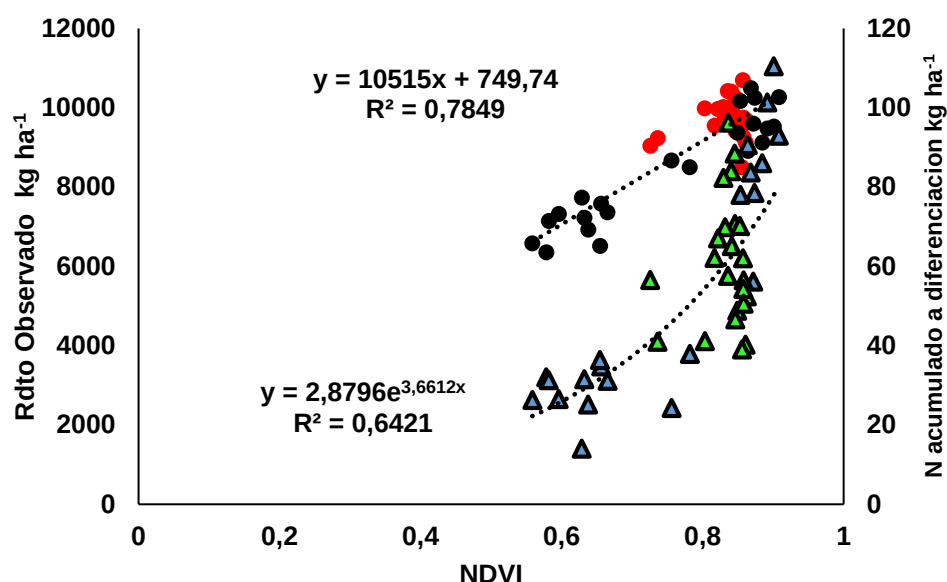


Figura 12: Relación entre el índice de verdor de diferencia normalizada (NDVI) (con el nitrógeno acumulado en la biomasa hasta el estadio de diferenciación y el rendimiento del cultivo de arroz. Rendimiento en grano: círculos negros llenos (datos 2019/20), círculos rojos (datos 2020/21); N acumulado en planta hasta diferenciación: triángulos celestes (datos 2019/2020) y triángulos verdes (datos 2020/2012), (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Se evaluaron índices de vegetación alternativos al NDVI a fin de obtener relaciones más adecuadas para estimar los cambios en la acumulación de N en planta y el rendimiento en condiciones de valores de NDVI mayores a 0,80. Entre los índices alternativos evaluados, el índice de clorofila, calculado como relación entre las bandas verde e infrarroja, demostró mayor sensibilidad para discriminar diferencias de rendimiento (**Figura 13**).

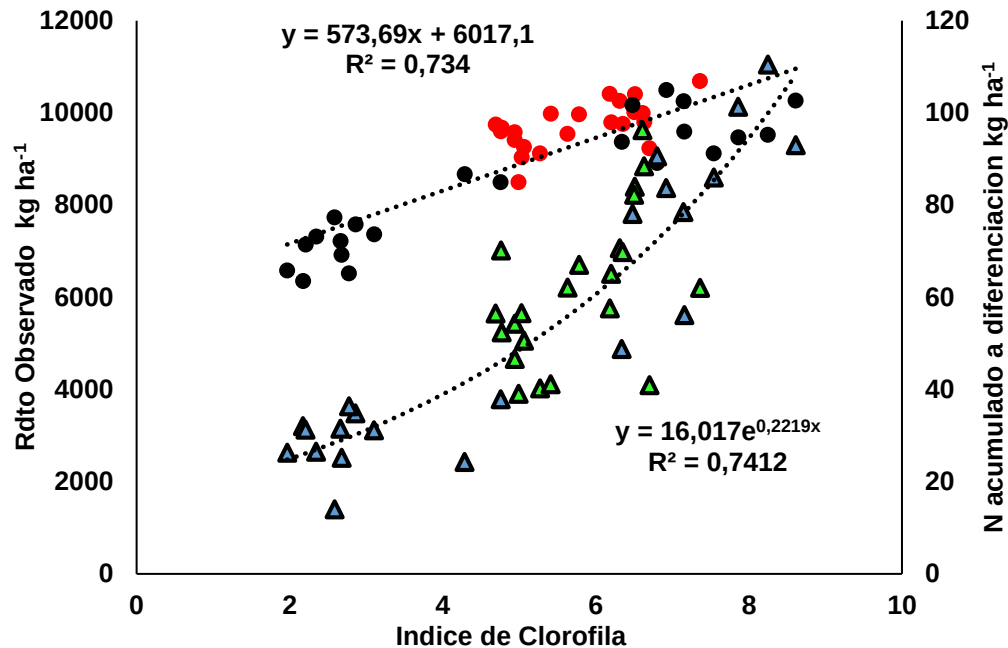


Figura 13: Relación entre el índice de clorofila (b) con el nitrógeno acumulado en la biomasa hasta el estadio de diferenciación y el rendimiento del cultivo de arroz. Rendimiento en grano: círculos negros llenos (datos 2019/20), círculos rojos (datos 2020/21); N acumulado en planta hasta diferenciación: triángulos celestes (datos 2019/2020) y triángulos verdes (datos 2020/2012), (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Consideración final.

Las experiencias y resultados obtenidos amplían el conocimiento y aplicación de prácticas de agricultura de precisión en el cultivo de arroz. Se valida la utilidad de los mapas de rendimiento para discriminar zonas de productividad diferencial. Asimismo, los muestreos de suelo dirigidos, permiten estimar la variabilidad a escala de zonas, y la validez de los valores de K, Zn, como elementos predictivos de la respuesta a la fertilización. La respuesta a N, es un aspecto donde se requiere intensificar los esfuerzos para determinar elementos diagnósticos, basados en distintas estrategias: análisis de suelos, tejidos y sensoramiento remoto.

ANEXO:

Tabla 1 (anexo): Comparaciones de medias para el rendimiento del cultivo de arroz en diferentes tratamientos con fertilización con nitrógeno (N), fosforo (P), potasio (K), y cinc (Zn) en ambientes de productividad diferencial delimitados a escala intra-lote. Lote Biguá. MP: Manejo del productor con una mezcla química de base. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1,00609 Error: 0,2855 gl: 8					
Zonas Biguá	Tratamiento	Rto (tn/ha)	n	E.E.	
ZB	MP	9,42	3	0,31	A B
ZB	DAP+CIK	9,12	3	0,31	A B
ZB	DAP+CIK+Zn	9,26	3	0,31	A B
ZB	DAP+CIK(x2)+Zn	8,5	3	0,31	A
ZA	MP	9,58	3	0,31	B
ZA	DAP+CIK	9,75	3	0,31	B
ZA	DAP+CIK+Zn	9,68	3	0,31	B
ZA	DAP+CIK(x2)+Zn	9,6	3	0,31	B

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

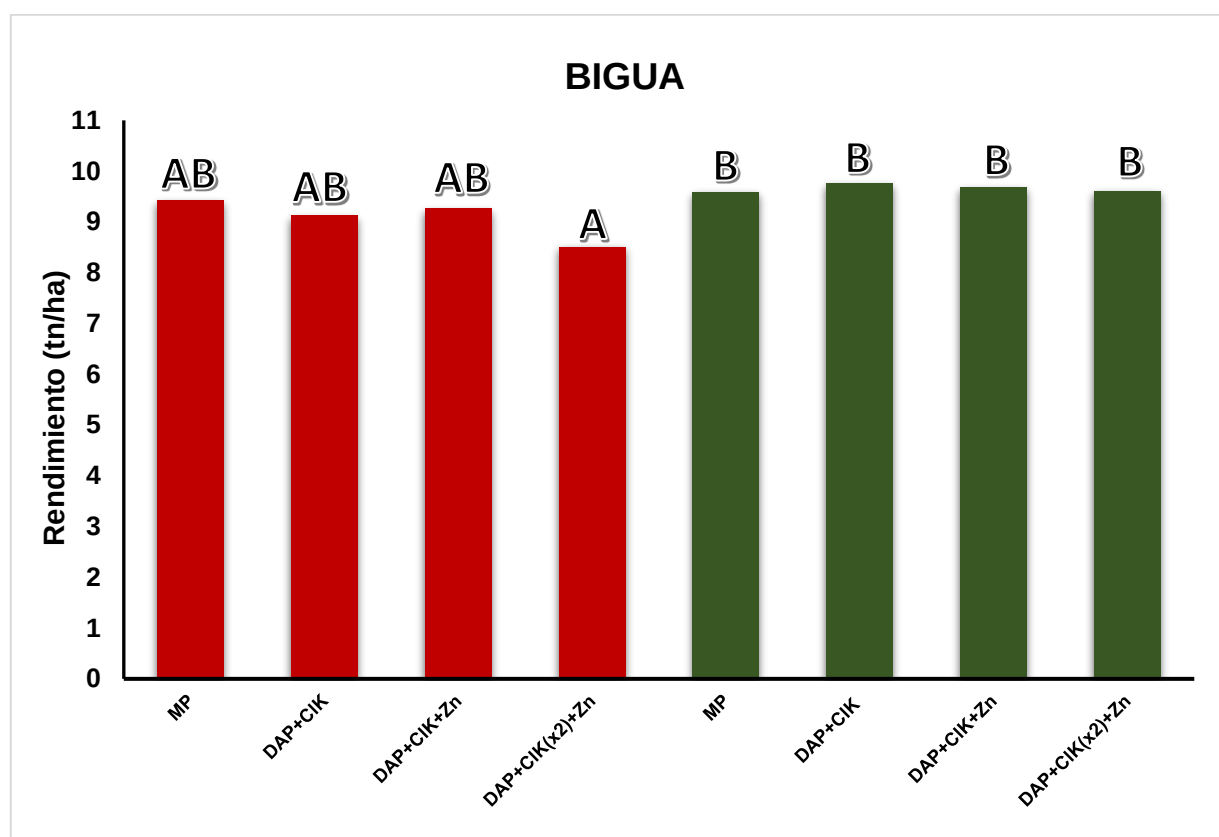


Tabla 2 (anexo): Comparaciones de medias para el rendimiento del cultivo de arroz en diferentes tratamientos con fertilización con nitrógeno (N), fosforo (P), potasio (K), y cinc (Zn) en ambientes de productividad diferencial delimitados a escala intra-lote. Lote Colibrí Este. MP: Manejo del productor con una mezcla química de base. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Test: SD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,84154. Error: 0,1998 gl: 8					
Zonas Colibrí Este	Tratamiento	Rto (tn/ha)	n	E.E.	
ZB	MP	9,76	3	0,26	A
ZB	DAP+CIK	10,02	3	0,26	A B
ZB	DAP+CIK+Zn	10	3	0,26	A B
ZB	DAP+CIK(x2)+Zn	9,8	3	0,26	A
ZA	MP	10,42	3	0,26	A B
ZA	DAP+CIK	10,7	3	0,26	B
ZA	DAP+CIK+Zn	10,27	3	0,26	A B
ZA	DAP+CIK(x2)+Zn	10,41	3	0,26	A B

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

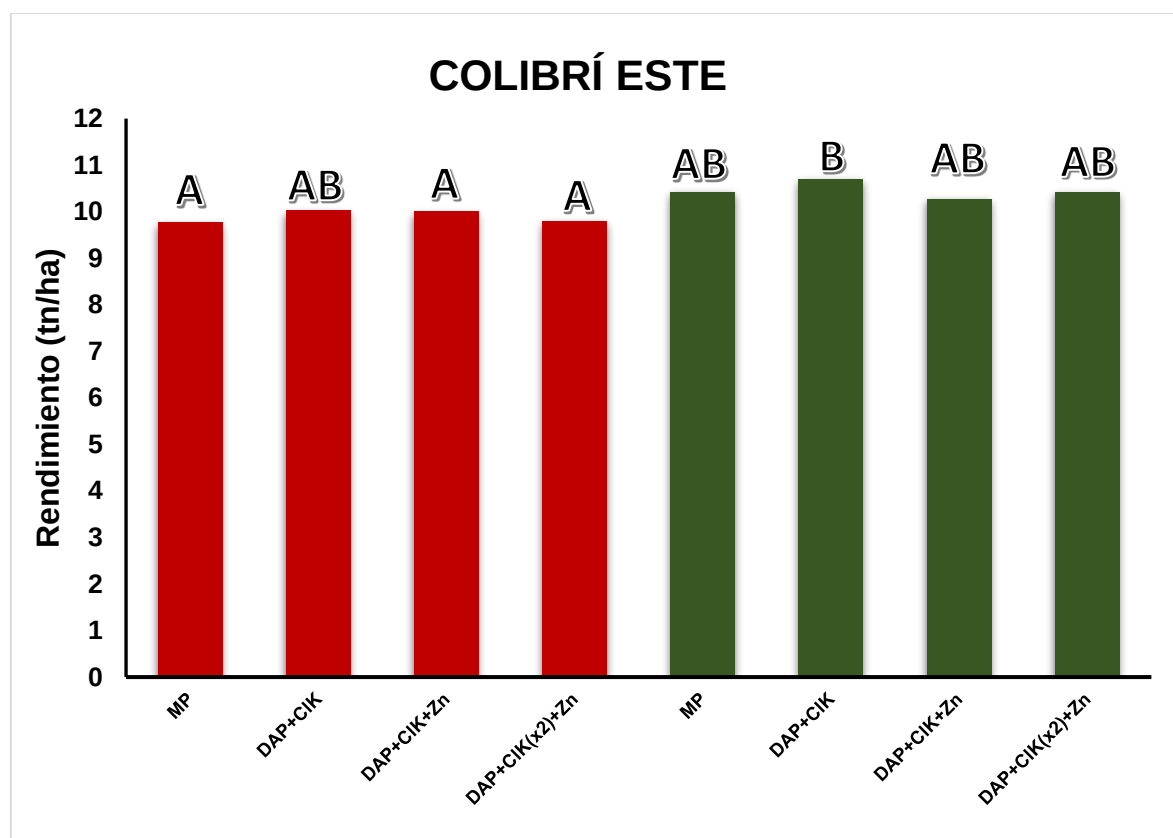


Tabla 3 (anexo): Comparaciones de medias para el rendimiento del cultivo de arroz en diferentes tratamientos con fertilización con nitrógeno (N), fosforo (P), potasio (K), y cinc (Zn) en ambientes de productividad diferencial delimitados a escala intra-lote. Lote Urraca. MP: Manejo del productor con una mezcla química de base. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Test: SD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,22825 Error: 0,0147 gl: 8					
Zonas Urraca	Tratamiento	Rto (tn/ha)	n	E.E.	
ZB	MP	8,57	3	0,07	A
ZB	DAP+CIK	8,73	3	0,07	A B
ZB	DAP+CIK+Zn	8,62	3	0,07	A
ZB	DAP+CIK(x2)+Zn	8,95	3	0,07	B C
ZA	MP	8,87	3	0,07	B
ZA	DAP+CIK	8,76	3	0,07	A B
ZA	DAP+CIK+Zn	9,14	3	0,07	C
ZA	DAP+CIK(x2)+Zn	8,94	3	0,07	B C

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

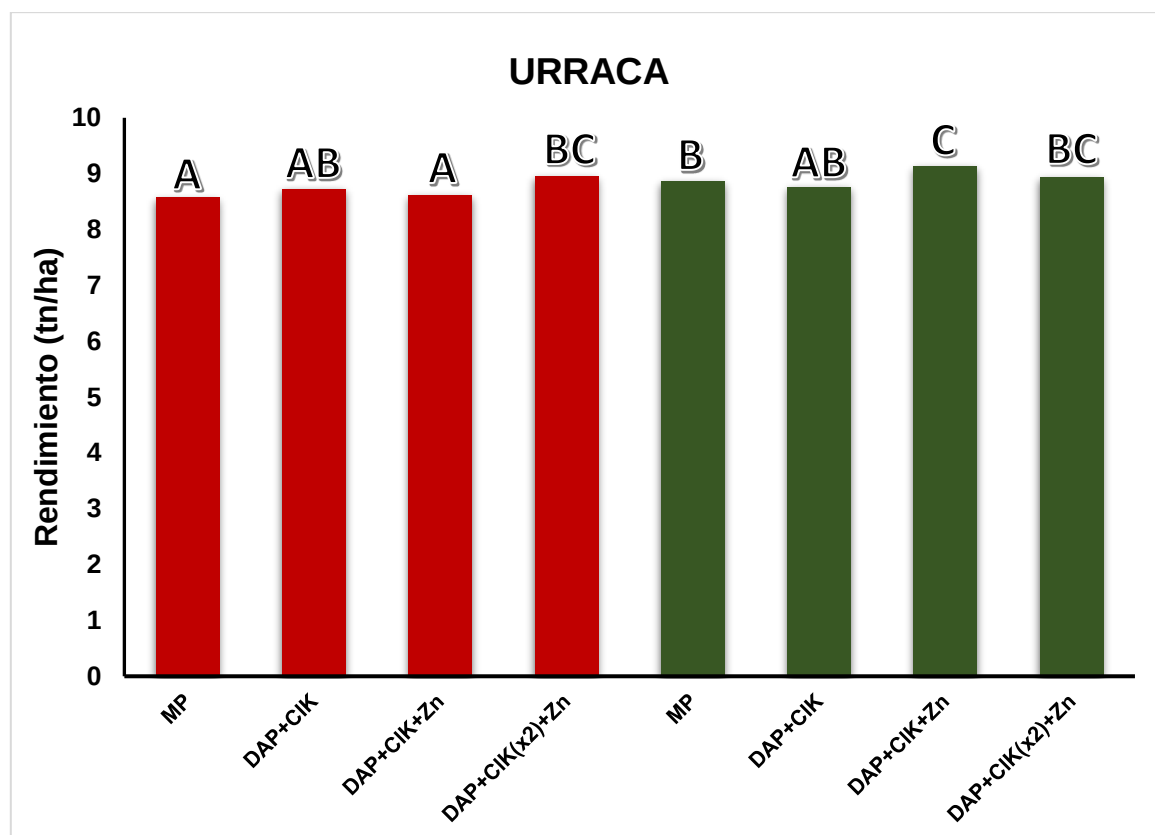


Tabla 4 (anexo): Comparaciones de medias para el rendimiento del cultivo de arroz en diferentes tratamientos con diferentes dosis de nitrógeno (N) preriego, y con diferentes fertilizantes de base. Lote Doctor Sur. MP: Manejo del productor con una mezcla química de base. (Jubileo, Dpto. Villaguay, Entre Ríos 2020/21).

Test: LSD Fisher. Alfa=0.05. DMS=0.57445. Error: 0,0997. gl: 10

Fertilizante de base	Dosis de N pre riego	Rto (tn/ha)	n	E.E.			
DAP+CIK	46	9,55	3	0,18	A	B	C
DAP+CIK	69	9,99	3	0,18			C
DAP+CIK	92	9,8	3	0,18		B	C
MP	46	9,24	3	0,18	A	B	
MP	69	9,04	3	0,18	A		
MP	92	9,97	3	0,18			C

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

