

Evaluación de Nitrox como estrategia de bioestimulación y nutrición en maíz

Proyecto BioRoad - América Agroinnova
Campaña 2025-2026
Informe de resultados

Introducción

Se llevó a cabo un ensayo en el Campo Experimental de América Agroinnova (América, Buenos Aires) durante la campaña 2025-2026, con el objetivo de evaluar el efecto del producto Nitrox, provisto por la empresa BioRoad, sobre el crecimiento, el estado fisiológico y la generación del rendimiento del cultivo de maíz. El análisis se orientó a cuantificar cambios en la captura de radiación, el rendimiento, los componentes numéricos del rendimiento, la altura de plantas en R1 y el estatus nitrogenado del cultivo en R2.

El ensayo se planteó con tratamientos que combinaron tres niveles de fertilización nitrogenada y la presencia o ausencia de Nitrox. Esta estructura permitió comparar el efecto del producto dentro de cada condición de disponibilidad de nitrógeno, así como describir el comportamiento general del cultivo bajo un gradiente de manejo nitrogenado.

Materiales y Métodos

- Descripción general:

El ensayo se condujo en secano y se sembró el 25 de noviembre de 2025 con una sembradora experimental de cuatro surcos distanciados a 70 cm. El suelo era de textura franco-arenosa, presentaba 60% de arena, 20,5 ppm de fósforo Bray 1, 1,03 ppm Zn-DTPA, 1,5 mE/100 g de Mg y 2,5% de materia orgánica (0-20 cm). El cultivo antecesor fue maíz. El perfil del suelo estaba prácticamente en capacidad de campo al momento de la siembra, dado un otoño lluvioso y una recarga de 199 mm entre agosto y la fecha de siembra. Además, 5 días luego de la siembra ocurrió una lluvia de 40 mm. Las precipitaciones totales durante el ciclo del cultivo (diciembre-abril) fueron de 531 mm, con unos 106 mm caídos durante el período crítico del cultivo (fines de enero a fines de febrero). La densidad objetivo fue de 70000 semillas/ha. La fertilización nitrogenada, cuando correspondió, se realizó el 5 de enero de 2026 en V2, utilizando dosis de 190 o 240 kg/ha de urea. La aplicación de Nitrox se realizó el 7 de enero de 2026 en V4, a razón de 1 l/ha.

El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos incluyeron un testigo absoluto sin fertilización nitrogenada ni Nitrox, su equivalente con Nitrox, un control con 190 kg/ha de urea, su equivalente con Nitrox, un control con 240 kg/ha de urea y su equivalente con Nitrox.

- Tratamientos y diseño experimental:

Tabla 1. Tratamientos evaluados incluyendo fertilización nitrogenada, producto, dosis y momento de aplicación.

Tratamiento	Nombre	Fertilización nitrogenada	Nitrox	Momento
T1	Testigo absoluto	No	No	No
T2	Nitrox Testigo absoluto	No	1 l/ha Nitrox	V4
T3	Control 190Urea	Urea 190 kg/ha en V2	No	No
T4	Nitrox 190Urea	Urea 190 kg/ha en V2	1 l/ha Nitrox	V4
T5	Control 240Urea	Urea 240 kg/ha en V2	No	No
T6	Nitrox 240Urea	Urea 240 kg/ha en V2	1 l/ha Nitrox	V4

- Mediciones y estimaciones:

Se estimó la densidad lograda a partir del conteo de plantas en 6 m lineales de surco y su conversión a plantas/m². El seguimiento ecofisiológico del cultivo se realizó mediante estimaciones de la fracción de la radiación incidente interceptada por el cultivo (fPAR) en cuatro momentos del ciclo: 7 de enero, 19 de enero, 30 de enero y 18 de febrero. Las mediciones durante el período vegetativo se realizaron utilizando un GreenSeeker con medición de índice verde normalizado, para luego convertir ese valor a fPAR mediante el modelo de Gitelson et al. (2014). La última medición, entre los estadíos R1 y R2, se realizó mediante el uso de una barra PAR (Cavadevices) con una medición de la radiación incidente afuera de cada parcela y tres mediciones por encima de la última hoja senescida en cada parcela. Para integrar la captura de radiación a lo largo del ciclo se calculó el área bajo la curva de fPAR (AUC fPAR) mediante integración trapezoidal, considerando fPAR = 0 al momento de la siembra y los valores registrados el 7/1, 19/1, 30/1 y 18/2. A partir de la serie temporal de fPAR se estimó el área bajo la curva (AUC) para cada parcela mediante integración trapezoidal, incorporando un valor inicial de fPAR igual a cero al momento de la siembra. Este indicador se utilizó como una medida integrada de la captura de radiación durante el período de seguimiento.

En R1 se midió la altura de diez plantas por parcela. A partir de esas mediciones se calculó la altura promedio de cada parcela y el desvío estándar de la altura dentro de cada parcela, con el objetivo de evaluar tanto el tamaño medio del cultivo como la uniformidad relativa de altura. En R2 se realizaron mediciones del estatus nitrogenado del cultivo a partir de un sensor de colorimetría verde (N-tester) en cinco plantas por parcela, considerando mediciones en la base, el medio y la punta de la hoja insertada en dos nudos inferiores a la espiga y se utilizó el valor promedio por parcela para el análisis.

Al momento de cosecha (4,2 m² por parcela) se estimó el rendimiento en grano corregido a 14,5% de humedad, el peso de mil granos corregido a la misma humedad y el número de granos por metro cuadrado. El número de granos se obtuvo a partir de la relación entre el rendimiento y el peso individual del grano.

- Análisis de datos:

Para evaluar el efecto de los tratamientos se realizaron análisis de la varianza mediante modelos lineales que consideraron al tratamiento como factor fijo y al bloque o repetición como factor de control del diseño experimental. Se analizaron la densidad lograda, el AUC de fPAR, el rendimiento, el número de granos por metro cuadrado, el peso de mil granos, la altura media de las plantas en R1, el desvío estándar de la altura en R1 y el valor promedio de N-tester en R2. Cuando correspondió, las medias se compararon mediante LSD Fisher con alfa = 0,05. Además, se exploraron relaciones entre rendimiento y componentes numéricos mediante regresiones lineales simples.

Resultados

i) Seguimiento del cultivo y captura de radiación

La evolución de fPAR mostró un incremento marcado desde las primeras mediciones vegetativas hasta R1 (Figura 1). El AUC de fPAR presentó una tendencia a diferir entre tratamientos ($p = 0.100$), con valores más altos en los tratamientos asociados a mayor fertilización nitrogenada, especialmente Nitrox 240Urea (26.2) y Control 240Urea (25.2). No obstante, la diferencia entre tratamientos no alcanzó el umbral de significancia estadística definido para el ensayo (Tabla 2).

Tabla 2. Densidad lograda y AUC de fPAR para los tratamientos evaluados en América, Buenos Aires, campaña 2025-2026.

Tratamiento	Densidad lograda (plantas/m ²)	AUC fPAR
Testigo absoluto	6.25	22.6
Nitrox Testigo absoluto	6.73	23.5
Control 190Urea	6.85	21.6
Nitrox 190Urea	6.79	23.0
Control 240Urea	6.49	25.2
Nitrox 240Urea	6.96	26.2
p-valor	0.573	0.100

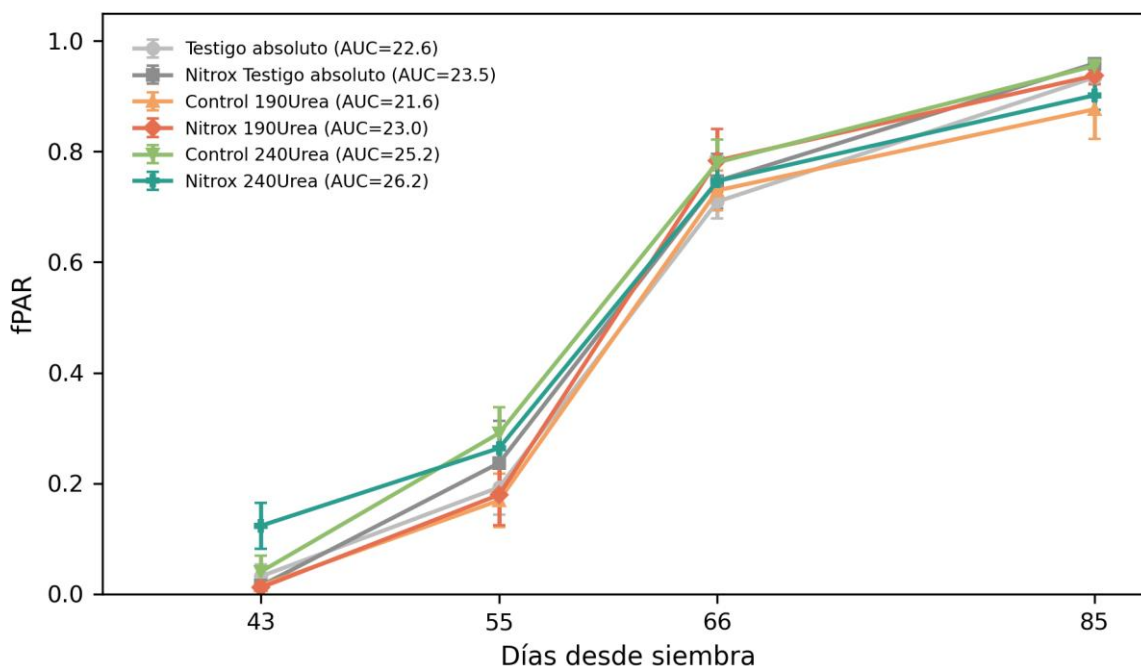


Figura 1. Evolución de la fPAR a lo largo del ciclo del cultivo de maíz para los tratamientos del ensayo de evaluación de Nitrox en América, Buenos Aires, campaña 2025-2026. Los puntos indican el promedio de cuatro repeticiones y las barras de error indican el error estándar de la media. Los valores indicados en la leyenda corresponden al AUC promedio de fPAR.

ii) Rendimiento y componentes numéricos

El rendimiento promedio del ensayo fue de 11483 kg/ha a 14,5% de humedad. No se observaron diferencias significativas entre tratamientos para el rendimiento ($p = 0.126$), aunque los tratamientos con fertilización nitrogenada tendieron a presentar mayores rendimientos que el testigo absoluto. El mayor rendimiento medio correspondió a Control 190Urea (12305 kg/ha), seguido por Nitrox 240Urea (12162 kg/ha) y Control 240Urea (11865 kg/ha) (Tabla 3, Figura 2).

El número de granos por metro cuadrado tampoco presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.161$), aunque siguió una tendencia general similar a la del rendimiento. El peso de mil granos fue estable entre tratamientos ($p = 0.693$), indicando que las variaciones de rendimiento estuvieron más asociadas con diferencias en la generación de granos que con cambios en el peso individual de los granos.

Tabla 3. Análisis de la varianza y comparación de medias del efecto de los tratamientos sobre rendimiento, número de granos y peso de mil granos. Letras diferentes indican diferencias significativas según LSD Fisher ($\alpha = 0,05$).

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha; 14,5% HR)	NG/m ²	P1000 (g; 14,5% HR)
Testigo absoluto	10084 A	3284 A	309.1 A
Nitrox Testigo absoluto	10930 A	3425 A	320.4 A
Control 190Urea	12305 A	3825 A	322.0 A
Nitrox 190Urea	11550 A	3643 A	316.6 A
Control 240Urea	11865 A	3779 A	313.0 A
Nitrox 240Urea	12162 A	3998 A	304.2 A
p-valor	0.126	0.161	0.693

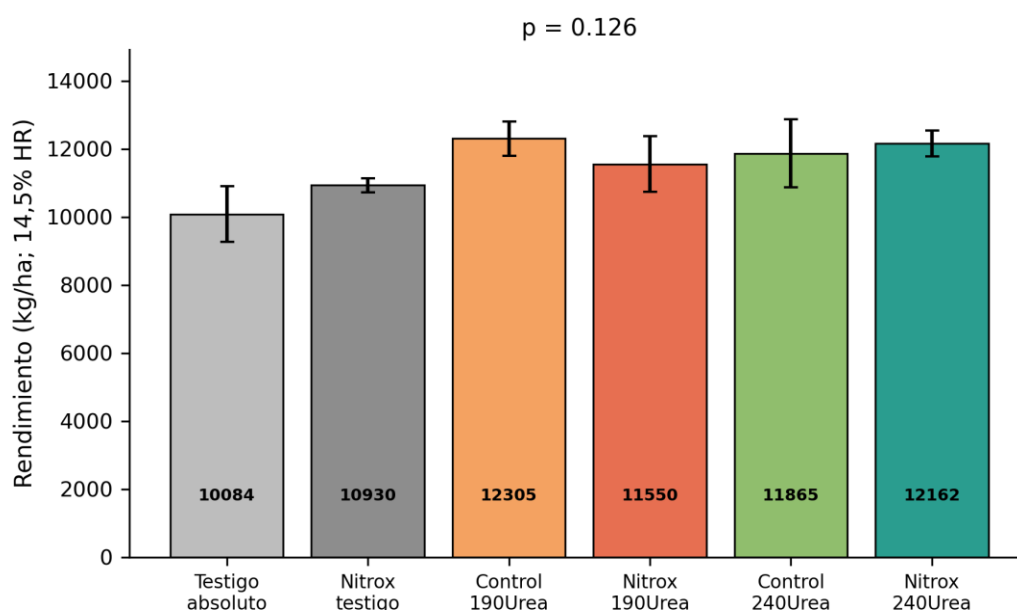


Figura 2. Rendimiento de grano de maíz corregido a 14,5% de humedad para los tratamientos del ensayo de evaluación de Nitrox. Las barras de error indican el error estándar de la media.

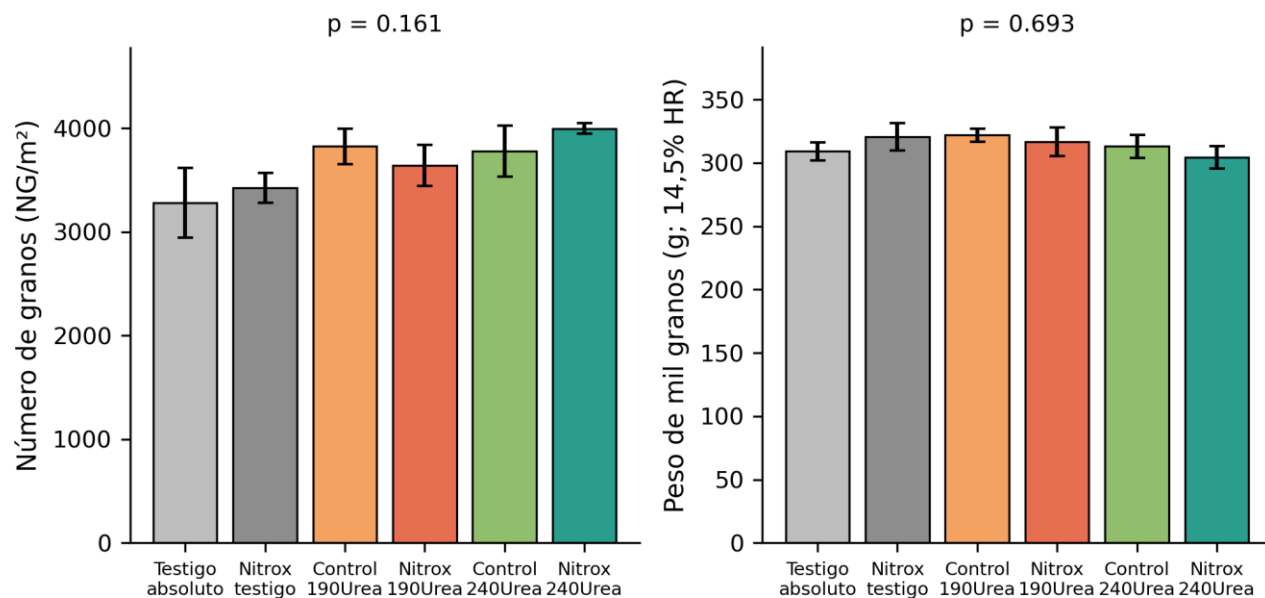


Figura 3. Componentes numéricos del rendimiento para los tratamientos del ensayo de evaluación de Nitrox. Panel izquierdo: número de granos por metro cuadrado. Panel derecho: peso de mil granos corregido a 14,5% de humedad.

iii) Altura de plantas en R1 y N-tester en R2

La altura media de las plantas en R1 no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.808$), con valores promedio que se ubicaron en un rango estrecho entre 203.3 y 208.7 cm. El desvío estándar de la altura dentro de cada parcela tampoco difirió entre tratamientos ($p = 0.685$), indicando que no se detectaron efectos claros de los tratamientos sobre la uniformidad de altura del cultivo en R1 (Tabla 4, Figura 4).

El valor promedio de N-tester en R2 sí presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.001$). Los mayores valores se observaron en Nitrox 240Urea (844), Control 240Urea (824) y Nitrox 190Urea (812), mientras que los menores valores correspondieron a los tratamientos sin fertilización nitrogenada. Este resultado indica que el N-tester reflejó principalmente el gradiente de disponibilidad nitrogenada generado por los tratamientos de fertilización, con una respuesta más clara que la observada en rendimiento.

Tabla 4. Altura media de plantas en R1, desvío estándar de la altura en R1 y valor promedio de N-tester en R2 para los tratamientos evaluados. Letras diferentes indican diferencias significativas según LSD Fisher ($\alpha = 0,05$).

Tratamiento	Altura media R1 (cm)	DE altura R1 (cm)	N-tester R2
Testigo absoluto	206.9 A	7.3 A	714 B
Nitrox Testigo absoluto	204.0 A	9.0 A	676 B
Control 190Urea	206.7 A	7.1 A	740 B
Nitrox 190Urea	203.3 A	7.1 A	812 A
Control 240Urea	208.6 A	7.8 A	824 A
Nitrox 240Urea	208.7 A	6.8 A	844 A
p-valor	0.808	0.685	0.001

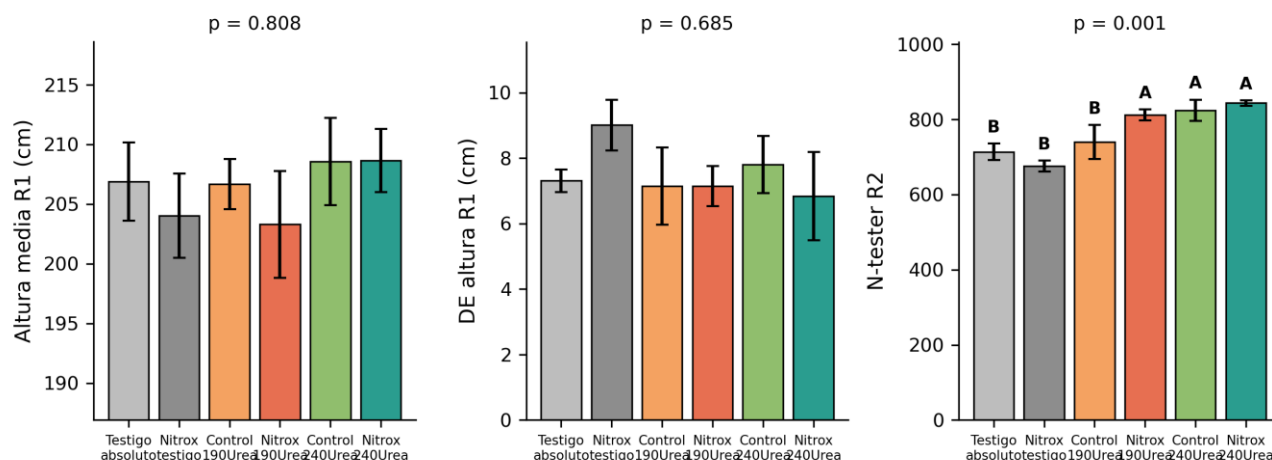


Figura 4. Efecto de los tratamientos sobre la altura media de plantas en R1, el desvío estándar de la altura en R1 y el valor promedio de N-tester en R2. Las barras de error indican el error estándar de la media.

iv) Relaciones entre rendimiento y componentes

Las relaciones entre el rendimiento y sus componentes numéricos mostraron que la variación del rendimiento estuvo más asociada con el número de granos por metro cuadrado ($R^2 = 0.81$) que con el peso de mil granos ($R^2 = 0.06$). La relación entre número de granos y peso de mil granos fue débil ($R^2 = 0.04$), lo que sugiere que no hubo una compensación marcada entre ambos componentes dentro del rango de datos observado (Figura 5).

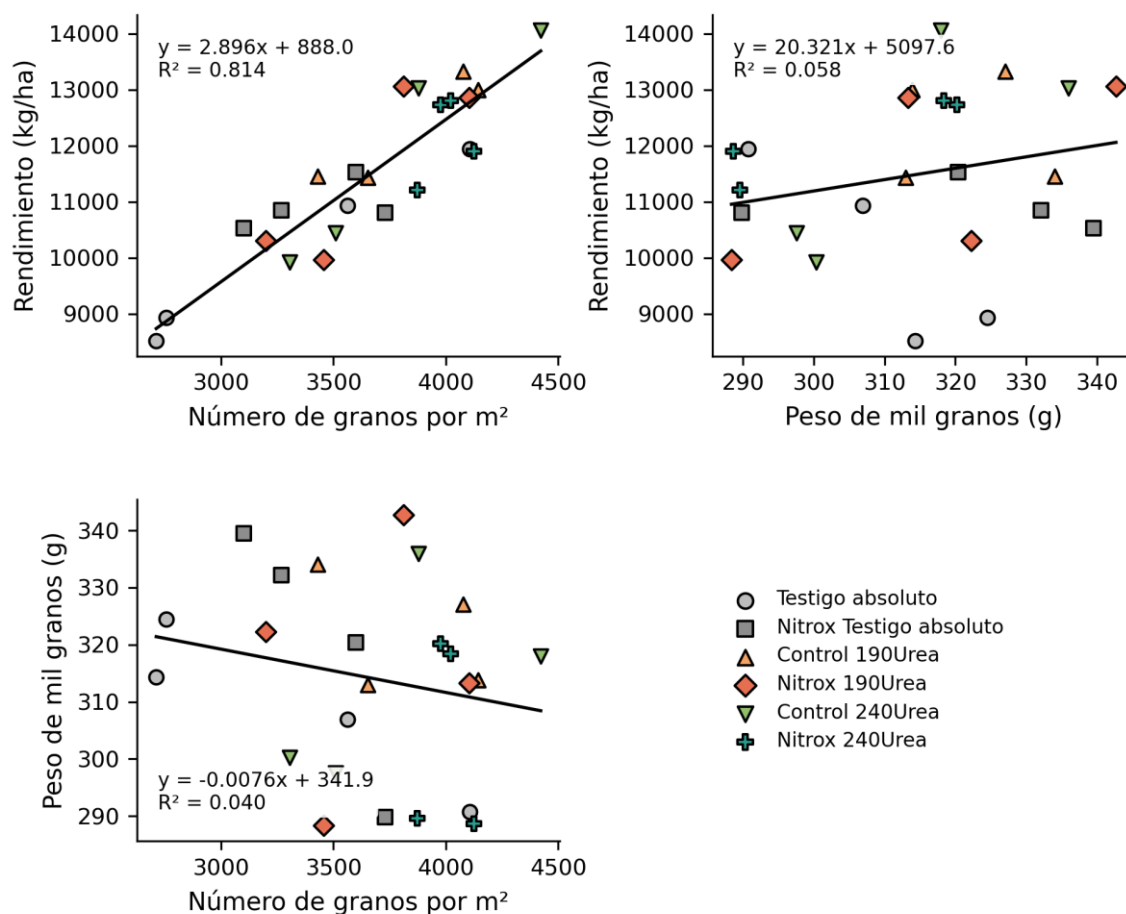


Figura 5. Relaciones entre el rendimiento y sus componentes numéricos en maíz. Los puntos corresponden a parcelas individuales y se distinguen por tratamiento. Las líneas indican el ajuste de regresión lineal; en cada panel se presenta la ecuación del modelo y el coeficiente de determinación. Las ecuaciones y leyendas fueron ubicadas dentro de zonas libres del gráfico para evitar superposiciones con puntos o líneas.

Conclusiones

En las condiciones del ensayo, los tratamientos no generaron diferencias estadísticamente significativas en la densidad lograda, el AUC de fPAR, el rendimiento, el número de granos por metro cuadrado, el peso de mil granos, la altura media de plantas en R1 ni el desvío estándar de la altura en R1. Sí se observaron diferencias significativas en el valor promedio de N-tester en R2, que respondió de manera clara al gradiente de fertilización nitrogenada.

El efecto de Nitrox no fue uniforme entre niveles de fertilización nitrogenada para rendimiento. En ausencia de fertilización nitrogenada, Nitrox presentó 846 kg/ha más que el testigo absoluto; con 190 kg/ha de urea presentó -755 kg/ha respecto del control correspondiente; y con 240 kg/ha de urea presentó 297 kg/ha respecto del control correspondiente. Estas diferencias deben interpretarse como contrastes descriptivos, dado que el efecto general de tratamiento sobre rendimiento no fue significativo.

Desde el punto de vista fisiológico, el N-tester permitió detectar diferencias entre tratamientos asociadas principalmente con la disponibilidad de nitrógeno, mientras que la altura de plantas y la captura de radiación no mostraron una respuesta estadísticamente definida. El efecto de Nitrox sobre el estatus nitrogenado fue leve, pero significativamente positivo para el tratamiento de 190 kg Urea/ha. La ausencia de diferencias claras en número de granos y peso de mil granos explica que las tendencias observadas en rendimiento no hayan alcanzado significancia estadística.

En base a los resultados obtenidos, se sugiere repetir la evaluación en otras campañas y ambientes, priorizando situaciones con mayor probabilidad de limitación nitrogenada o con contrastes ambientales más marcados. También resulta recomendable mantener la medición conjunta de fPAR, altura, estatus nitrogenado, rendimiento y componentes numéricos, ya que esa combinación permite interpretar con mayor precisión si eventuales respuestas productivas se originan en cambios de crecimiento, estado nitrogenado o generación de granos.