

Proyecto Fertilizantes Alternativos

América Agroinnova – ALZ Agro

Campaña 2024-2025

Informe de resultados

Introducción

Se llevó a cabo un ensayo en el Campo experimental de América Agroinnova – América, Buenos Aires. Los objetivos fueron evaluar el impacto de diferentes estrategias de fertilización incluyendo o no fertilizantes foliares alternativos sobre la captura de radiación, el estado nitrogenado a floración y el rendimiento de un cultivo de maíz tardío. Una hipótesis principal que se quiso poner a prueba fue que una combinación de 4 l/ha de SmartFoil + 3 kg/ha de Sulfato de Amonio pueden reemplazar a 70 kg/ha de urea en términos de variables asociadas con el crecimiento y el rendimiento del cultivo. Además, se quiso probar el efecto de Smartfoil a 2l/ha como fertilizante foliar directo y de Evolutio a 0,25 kg/ha como bioactivador estimulante foliar. Un objetivo adicional fue educar a estudiantes de grado y posgrado residentes en Agroinnova en la manera de llevar a cabo un experimento a campo en una colaboración entre investigadores de universidades, productores agropecuarios y representantes de empresas desarrolladoras de insumos para el agro.

Materiales y Métodos

- Descripción general:

El ensayo se sembró en el Campo Experimental de América Agroinnova, América, Buenos Aires (35°25'45"S, 62°59'64"O), sobre un suelo arenoso (Hapludol típico). El sitio particular adonde se asentó el ensayo fue una media loma baja, con capacidad de uso Iles, cuyo horizonte superficial (0-20 cm) contaba con 60% de arena, un pH de 6,5, 2,5% de materia orgánica y 20 ppm de fósforo extractable (P-Bray) y con un nivel de cobertura medio-alto (antecesor soja). La disponibilidad de nitrógeno en forma de nitratos a partir del muestreo de suelo a la siembra fue de 140 kg/ha, valor muy elevado posiblemente producto de las muy altas temperaturas de noviembre e inicios de diciembre y las precipitaciones ocurridas pre-siembra.

Se realizó un barbecho corto el 14/11 con Glifosato 2 l/ha + 2,4-D sal colina 1,5 l/ha, y 4 días después se realizó una aplicación con Glufosinato 2 l/ha + aceite vegetal 1% v/v. Como herbicidas pre-emergentes se utilizaron S-Metolclo 1 l/ha y Atrazina 1 kg/ha. La siembra se realizó el 10/12 con una sembradora experimental de 4 surcos distanciados a 0,7 m. Todos los tratamientos se sembraron con el híbrido Acrux PWUE y a una densidad de 70000 sem/ha. Todo el ensayo se fertilizó con 60 kg/ha de MAP a la siembra. En post-emergencia temprana se detectó la emergencia de plántulas de Yuyo colorado y para su control se realizó una aplicación de Glifosato 2 l/ha + Laudis 0,25 l/ha + aceite 1% v/v. El resto del ciclo del cultivo continuó sin presencia de malezas, plagas ni enfermedades.

- Tratamientos y diseño experimental:

Se propusieron diferentes tratamientos para poner a prueba las hipótesis propuestas de manera directa. Así, los tratamientos consistieron en la combinación de distintos niveles de fertilización nitrogenada con urea incrementando de a 70 kg/ha (0, 70, 140 kg/ha de urea) con productos foliares de ALZ (Tabla 1). En todos los tratamientos, la urea fue aplicada el 30/12 (aprox. en el estadio de V3). Los tratamientos foliares se aplicaron el 10/1 (aprox. en el estadio V7). El diseño experimental fue en bloques completos con los tratamientos aleatorizados dentro de cada bloque, con el bloque como repetición. En total se sembraron 4 bloques, siguiendo el leve gradiente topográfico observado en el lote.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos realizados.

Tratamiento	Urea (Kg/ha) (aplicación en V3)	Productos foliares (aplicación en V7)
T1	0	No
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio
T3	70	No
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio
T5	70	2 l/ha Smartfoil
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio
T7	140	No
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio
T9	140	2l/ha Smartfoil
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio

- Mediciones y estimaciones:

Se registró la fenología de forma semanal.

Para evaluar el impacto inmediato de la aplicación de los tratamientos de productos de aplicación foliar (i.e. tratamientos foliares) sobre la intercepción de radiación, se realizaron mediciones de índice verde normalizado (NDVI) sobre cada parcela utilizando un GreenSeeker, en dos momentos: (i) inmediatamente previo a la aplicación de los tratamientos foliares, y (ii) una semana después de la aplicación de los tratamientos foliares.

Para caracterizar el estatus nitrogenado del cultivo en el momento más determinante para la generación de granos del cultivo, se realizaron mediciones de colorimetría verde (relacionada a la capacidad fotosintética del canopeo) utilizando un SPAD. La medición de SPAD se realizó en R1 (floración femenina), sobre tres posiciones a lo largo de la hoja de la espiga de 10 plantas de cada parcela (i.e. 30 mediciones por parcela).

Luego de la madurez fisiológica, se cosecharon todas las plantas de 3 metros lineales de los 2 surcos centrales de la parcela (4.2 m²). Cada muestra se trilló en trilladora estacionaria, se

pesó y se cuantificó la humedad para estimar el rendimiento. De cada muestra se tomó una alícuota de 200 granos y se pesó para estimar el peso medio del grano. El número de granos por metro cuadrado (NG/m²) se estimó dividiendo el rendimiento por el peso medio del grano.

- Análisis de datos:

Para evaluar las diferencias entre los tratamientos en la captura de radiación, el estado nitrogenado y el rendimiento se realizaron análisis de la varianza sobre las siguientes variables: NDVI (de las dos mediciones), diferencia de NDVI entre las dos mediciones, valor del SPAD en hoja de la espiga en R1, número de granos por metro cuadrado, peso de mil granos y rendimiento. Se utilizaron modelos mixtos, considerando como factor fijo el tratamiento y como factor aleatorio al bloque. Las medias se compararon mediante el método de LSD Fisher (alfa = 0,05).

Para evaluar el efecto directo de cada producto o combinación de productos de aplicación foliar sobre los aspectos relevantes varias semanas posteriores a la aplicación de los productos, como el estatus nitrogenado del cultivo a floración (SPAD en R1) o el rendimiento y sus componentes, se realizaron pruebas de hipótesis con prueba T de dos colas. En primer lugar, se observó el efecto aditivo de los productos de aplicación foliar respecto de su testigo de mismo nivel de aplicación de urea, pero sin aplicación de productos foliares. En segundo lugar, para evaluar el efecto “reemplazo” de los productos foliares, se compararon los valores de las variables para el tratamiento sin aplicación foliar con determinado nivel de fertilización con urea respecto de aquellos para el tratamiento con aplicación foliar, pero con un nivel de fertilización con urea 70 kg/ha menor (por ejemplo, T2 versus T3 o T4 versus T7).

Finalmente, se relacionó (i) el rendimiento con el número de granos por metro cuadrado, para evaluar la importancia de este componente para determinar variaciones del rendimiento entre tratamientos, y (ii) el peso de mil granos con el número de granos por metro cuadrado para evaluar posibles compensaciones que pudieran indicar limitaciones por fuente (escasez de área foliar verde) durante el llenado que pudieran ser suplidas por los diferentes tratamientos.

Resultados

i) Fenología y condiciones ambientales generales

El ensayo emergió el 17/12. Debido a las abundantes precipitaciones de noviembre (154 mm) e inicio de diciembre (76 mm del 1 al 10), las etapas vegetativas tempranas ocurrieron con buena disponibilidad hídrica. Luego de estas precipitaciones, el cultivo atravesó un mes y diez días sin precipitaciones y numerosos días con temperaturas máximas mayores a los 35 °C, transitando el cultivo las etapas vegetativas tardías de elongación de los tallos en condición de estrés. Cabe destacar que los tratamientos de fertilización y aplicación foliar se realizaron en momentos en los que el suelo presentaba buenas condiciones de humedad, pero sin ocurrencia de lluvias en los días posteriores. A finales de enero se restablecieron las precipitaciones (61 mm) y durante febrero y marzo estas fueron superiores a la media mensual (276 mm y 156 mm respectivamente). En consecuencia, las condiciones ambientales durante el periodo crítico para la determinación del rendimiento y durante el llenado de granos fueron de alta disponibilidad hídrica y días nublados (registro de R1 = 18/2). El cultivo alcanzó la madurez el 9 de abril.

ii) Eficiencia de intercepción de la radiación

Durante el estadio V7 (momento de aplicación de tratamientos foliares, 13/1), no se presentaban diferencias significativas en los valores de NDVI entre ningún tratamiento (Tabla 1, superior). Mediciones de NDVI realizadas una semana después dieron mayores valores, pero sin diferencias entre tratamientos (Tabla, inferior). Se debe considerar que el cultivo estaba atravesando condiciones de estrés, por lo tanto, la absorción y uso del nitrógeno, así como los demás recursos, se vio limitada, limitando el crecimiento. Adicionalmente, es importante observar que la diferencia de NDVI entre los dos momentos de medición tampoco presentó tendencias claras de efectos de ningún tratamiento. Por ejemplo, el tratamiento de mayor incremento de NDVI entre mediciones fue el testigo absoluto T1, sugiriendo que las limitaciones al crecimiento en esa etapa no estuvieron causadas por la oferta nitrogenada.

Tabla 1. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; alfa = 0,05) para los valores de NDVI registrados el 13/1 (superior) y el 20/1 (inferior). Se indica el p-valor del análisis de la varianza. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Tratamiento	Urea (Kg/ha)	Productos foliares	NDVI al 13/1	Signif. (alfa=0,05)
T7	140	No	0.35	A
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio	0.33	A
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	0.32	A
T3	70	No	0.32	A
T9	140	2l/ha Smartfoil	0.31	A
T5	70	2 l/ha Smartfoil	0.31	A
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio	0.30	A
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	0.29	A
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	0.29	A
T1	0	No	0.28	A
			<i>p-valor</i>	0.8085

Tratamiento	Urea (Kg/ha)	Productos foliares	NDVI al 20/1	Signif. (alfa=0,05)
T1	0	No	0.58	A
T9	140	2l/ha Smartfoil	0.58	A
T5	70	2 l/ha Smartfoil	0.57	A
T7	140	No	0.56	A
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	0.55	A
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	0.54	A
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio	0.54	A
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	0.54	A
T3	70	No	0.51	A
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio	0.50	A
			<i>p-valor</i>	0.4539

iii) Estatus nitrogenado del cultivo a floración

Las mediciones del SPAD en la hoja espiga (realizada el 18/2) arrojaron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 2). En general, los tratamientos sin aporte de urea tendieron a menores valores (T1 y T2, promedio de 57.0 de valor SPAD) que aquellos que sí tuvieron fertilización con urea (70 kg/ha urea para T3, T4, T5 y T6, promedio de 57.3 de valor SPAD; 140 kg/ha de urea para T7, T8, T9 y T10, promedio de 57.8 de valor SPAD).

Asimismo, existió una tendencia de que los valores SPAD aumentaran para los tratamientos que tuvieron aplicaciones de productos foliares respecto de sus controles sin aplicación de producto foliar, pero con la misma dosis de urea aplicada. Esta tendencia no fue tan clara para los tratamientos que incluyeron Smartfoil 4 l/ha + Sulfato de Amonio 3 kg/ha; por ejemplo, T2 presentó un valor 0,7 puntos mayor que T1 ($p=0,18$), T4 un valor 0,02 puntos mayor que T3 ($p=0,98$) y T8 presentó un valor 0,5 puntos menor que T7 ($p=0,50$). Para los tratamientos que incluyeron solamente Smartfoil 2 l/ha las diferencias positivas fueron más consistentes versus su testigo apareado en dosis de urea; T5 presentó un valor SPAD 1,6 puntos mayor que T3 ($p=0,006$) y T9 un valor 0,6 puntos mayor que T7 ($p=0,38$). Los tratamientos que incluyeron Evolutio 0,25 kg/ha también tendieron a presentar valores levemente mayores que los testigos correspondientes; T6 tuvo 0,6 puntos de valor SPAD más que T3 ($p=0,24$) y T10 presentó valores 1,6 puntos más altos que T7 ($p=0,02$).

El reemplazo de 70 kg/ha de urea por Smartfoil 3 l/ha + Sulfato de Amonio 4 kg/ha (promedio de T2 versus T3 y de T4 versus T7) determinó exactamente el mismo valor de SPAD promedio (57.1; $p=0,48$).

Cabe destacar que, durante las mediciones, el cultivo se encontraba en el periodo crítico y las condiciones ambientales eran favorables. También, que los valores de SPAD presentados por todos los tratamientos resultaron elevados si se los compara con los reportes generales de la bibliografía, lo que indica que en general los cultivos en todos los tratamientos presentaban un muy buen status nitrogenado y un estado de suficiencia para este nutriente.

Tabla 2. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; $\alpha = 0,05$) para el valor SPAD en la hoja de la espiga medidos el 18/2 (R1 del cultivo). Se indica el p-valor del análisis de la varianza. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Tratamiento	Urea (Kg/ha)	Productos foliares	Valor SPAD	Signif. ($\alpha=0,05$)
T9	140	2l/ha Smartfoil	59.0	A
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	58.3	AB
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	58.0	ABC
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio	57.4	BC
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio	57.4	BC
T5	70	2 l/ha Smartfoil	57.3	BC
T7	140	No	56.9	BC
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	56.7	C
T1	0	No	56.7	C
T3	70	No	56.8	C
			p-valor	0.0450

iv) Rendimiento y sus componentes numéricos

No se observaron diferencias significativas para los componentes del rendimiento (número de granos por metro cuadrado y peso de mil granos; Tablas 3 y 4), ni tampoco para el rendimiento

entre tratamientos (Tabla 5). El rendimiento promedio de todo el ensayo fue de 9196 kg/ha, con promedios de 2969 granos por metro cuadrado y un peso de 311 gramos cada mil granos. El rendimiento estuvo muy explicado por el número de granos por metro cuadrado ($R^2 = 0,95$; $p = 0,0001$; Figura 1A). Sin embargo, el elevado valor del peso de mil granos y la leve, pero significativa correlación negativa observada entre el número y el peso del grano ($R^2 = 0,253$; $p=0,0003$; Figura 1B), evidenciaron que el cultivo tuvo una gran limitación por fuente durante el llenado. Esto quiere decir que las restricciones hídricas durante el período de expansión foliar determinaron una limitada capacidad de generar asimilados durante el llenado para aquellos tratamientos que presentaron mayor fijación de granos y viceversa para aquellos con menor fijación de granos.

La falta de respuesta del rendimiento o cualquiera de sus componentes a la dosis de urea aplicada y cualquier tratamiento de aplicación foliar (sin diferencias en ningún caso) da un indicio de que la oferta de nitrógeno nativa (en el suelo a la siembra más mineralización) se encontró en suficiencia y la limitación al rendimiento se debió a otro recurso y/o condición de estrés tal como la falta de agua durante las etapas de elongación de los tallos. Así, la tendencia a una mejora en la condición nitrogenada a floración producto de la aplicación de productos foliares mencionada anteriormente no fue suficiente para generar una mayor fijación de granos o sostener mayor actividad del aparato fotosintético durante el llenado que generasen impactos positivos sobre el rendimiento.

Tabla 3. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; alfa = 0,05) para los valores del número de granos por metro cuadrado. Se indica el p-valor del análisis de la varianza. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Tratamiento	Urea (Kg/ha)	Productos foliares	NG m ⁻²	Signif. (alfa=0,05)
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	3153	A
T1	0	No	3076	A
T7	140	No	3048	A
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio	3021	A
T9	140	2l/ha Smartfoil	2990	A
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	2949	A
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	2913	A
T5	70	2 l/ha Smartfoil	2872	A
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio	2835	A
T3	70	No	2833	A
			p-valor	0.9750

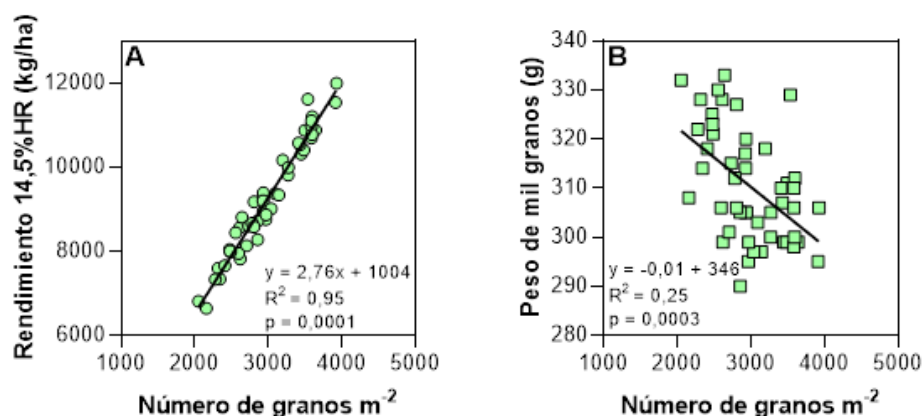
Tabla 4. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; alfa = 0,05) para los valores del peso de mil de los granos. Se indica el p-valor del análisis de la varianza. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Tratamiento	Urea (Kg/ha)	Productos foliares	Peso de mil granos	Signif. (alfa=0,05)
T5	70	2 l/ha Smartfoil	320	A
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio	316	A
T9	140	2l/ha Smartfoil	314	A
T7	140	No	313	A
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio	312	A
T3	70	No	311	A
T1	0	No	309	A
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	305	A
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	305	A
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	303	A
			p-valor	0.5530

Tabla 5. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; alfa = 0,05) para los valores promedios de los rendimientos de cada tratamiento. Se indica el p-valor del análisis de la varianza. Letras diferentes indican diferencias significativas.

Tratamiento	Urea (Kg/ha)	Productos foliares	Rendimiento (kg/ha)	Signif. (alfa=0,05)
T8	140	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	9613	A
T7	140	No	9530	A
T1	0	No	9485	A
T6	70	0,25 Kg/ha Evolutio	9432	A
T9	140	2l/ha Smartfoil	9306	A
T5	70	2 l/ha Smartfoil	9156	A
T4	70	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	8965	A
T10	140	0,25 Kg/ha Evolutio	8874	A
T2	0	4 l/ha Smartfoil + 3l/ha Sulfato de Amonio	8806	A
T3	70	No	8796	A
			p-valor	0.9561

Figura 1. Relación entre el rendimiento y el número de granos por metro cuadrado (A) y entre el peso del grano y el número de granos por metro cuadrado (B). En cada caso se muestra la ecuación producto del modelo lineal ajustado a los datos, el coeficiente de determinación (R²) y el p-valor de la pendiente.



Conclusiones

El ensayo a campo tuvo como objetivo evaluar el impacto de la aplicación de fertilizantes foliares alternativos, fitoestimulantes (biológicos y no biológicos) desarrollados por ALZ sobre la eficiencia de intercepción de la radiación, el estado nitrogenado a floración y el rendimiento y sus componentes del cultivo de maíz. Se relevaron variables ecofisiológicas (i.e la eficiencia de intercepción de radiación antes y después de la aplicación de los productos foliares o el valor SPAD de las hojas a floración) junto con componentes y subcomponentes del rendimiento, para comprender el efecto del manejo nutricional sobre el rendimiento final.

La campaña presentó condiciones meteorológicas cercanas al promedio zonal, con una primavera con abundantes precipitaciones, una sequía pronunciada entre principios de diciembre y fines de enero, y un final del verano nuevamente lluvioso. Debido a las condiciones climáticas favorables durante el período crítico del cultivo, los rendimientos obtenidos se encontraron en torno al esperado para un cultivo de maíz tardío en la región. Sin embargo, ninguna de las variables evaluadas, con la excepción del valor SPAD de las hojas, representativos del estatus nitrogenado del cultivo a floración, presentó diferencias significativas entre tratamientos.

Las mediciones de NDVI se realizaron durante estadios vegetativos intermedios, momento en el cual el cultivo estaba atravesando una sequía estacional con elevadas temperaturas máximas. Estas condiciones pudieron afectar la absorción y uso del nitrógeno aplicado mediante los fertilizantes foliares, no generando grandes diferencias de NDVI entre tratamientos. También, se debe considerar la menor tasa de crecimiento del cultivo durante el período de expansión foliar pre-floración debido al estrés. Las diferencias significativas y tendencias a mayores valores de SPAD en la hoja de la espiga producto de los tratamientos foliares indica que estos presentaron mayores concentraciones de clorofila (un mejor estado nitrogenado) respecto de sus testigos sin aplicación de fertilizantes foliares. No obstante, cabe destacar que los valores generales de todos los tratamientos del ensayo son elevados. Esto es razonable, dado que ante restricciones en la disponibilidad hídrica durante el período de expansión foliar, esta última se ve muy reducida, mientras que la concentración de clorofila en hoja se sostiene considerablemente. Es valioso haber notado la mejora en la condición nitrogenada producto de la aplicación de los productos foliares, evidenciado un efecto directo (aunque modesto) de estos productos sobre un indicador importante de la capacidad de crecimiento del cultivo. Esta mejora en el estado nutricional podría tener mayor relevancia bajo

condiciones de crecimiento más restrictivas, como menores niveles de nitrógeno disponible en el suelo.

La ausencia de respuesta en el rendimiento ante el incremento del nitrógeno total sugiere que este nutriente se encontraba en condiciones de suficiencia en términos de disponibilidad nativa en el suelo, al menos para la demanda que manifestó el cultivo para crecer producto de la interacción entre el híbrido, las condiciones de radiación y temperatura y la disponibilidad hídrica. Este escenario podría explicarse por una elevada tasa de mineralización, favorecida por las lluvias primaverales, las temperaturas superiores a la media durante incios de verano, la fecha tardía de siembra y un elevado contenido de materia orgánica del suelo. En todo proyecto de respuesta a la fertilización (de macro o micronutrientes, mineral o biológica, de aplicación al suelo o foliar) es esperable encontrar sitios con y sin respuesta. El impacto observado sobre el estatus nitrogenado a la floración de los productos de aplicación foliar sugiere posibles vías de exploración futuras de los rasgos determinantes del rendimiento en el cultivo de maíz, con diferentes condiciones ambientales de crecimiento.