

FACULTAD DE AGRONOMÍA - UBA
ESCUELA PARA GRADUADOS "ALBERTO SORIANO"

**TRABAJO FINAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
FERTILIDAD DE SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE UNIVERSIDAD DE BUENOS
AIRES**

BIOESTIMULACIÓN EN MAÍZ COMO ESTRATEGIA PARA MEJORAR EL USO DE FERTILIZANTES

Alumno: Ing. Agr. NICOLAS ROUILLET. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA 2014

Director: Ing. Agr. M. Sc. GUSTAVO NÉSTOR FERRARIS.

Fecha de defensa: 25 de Marzo de 2024

AGRADECIMIENTOS

A mi director, Ing Agr M. Sc Gustavo Ferraris por su guía, predisposición y confianza en la realización de este trabajo.

A los docentes, jurados y a la directora de la especialización por su enseñanza.

A la Ing Agr María Zamero por su colaboración en el análisis de los datos y principalmente por su compañerismo.

A Guillermina por acompañarme en todos los momentos de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|------------------------------|----|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 3 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 3 |
| RESUMEN..... | 4 |
| INTRODUCCIÓN | 5 |
| OBJETIVO | 10 |
| HIPÓTESIS | 10 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 11 |
| RESULTADOS y DISCUSIÓN | 13 |
| CONCLUSIÓN | 19 |
| REFERENCIAS | 20 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tratamientos de fertilización fosforada y bioestimulación a la siembra en maíz. Campaña 2021/22..... | 11 |
| Tabla 2. Análisis de suelo del lote, al momento de la siembra | 12 |
| Tabla 3. Parámetros morfológicos..... | 15 |
| Tabla 4: Plantas sin espiga (%), rendimiento y sus componentes numéricos..... | 16 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.Evolución de los bioestimulantes en el mercado de especialidades argentino. Fertilizar 2022 | 6 |
| Figura 2. Composición del mercado de bioestimulantes en la república argentina. Fertilizar 2022. | 7 |
| Figura 3. Precipitaciones decénicas del ciclo 2021-22, y su comparación con las dos campañas previas y la media histórica. | 13 |
| Figura 4. Evolución de la disponibilidad hídrica en el suelo en un cultivo de maíz durante la campaña 2021/22.. | 14 |
| Figura 5. Temperaturas decádicas del ciclo 2021/22, comparadas al valor histórico 1967-2021. | 14 |
| Figura 6. Rendimiento según tratamientos de fertilización con Fósforo con y bioestimulación a la siembra.. | 17 |
| Figura 7. Eficiencia agronómica de uso de fósforo..... | 18 |

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron diferentes combinaciones de fertilización fosforada en maíz con y sin el aporte de un bioestimulante a base de sustancias húmicas (HS) con el objetivo de evaluar la posible mejora de crecimiento inicial del cultivo, sus componentes y su rendimiento final bajo condiciones de secano en el norte de la provincia de Buenos Aires, durante la campaña 2021/22. Estas prácticas novedosas, permitirían intensificar la producción de maíz y, entre otros procesos, sortear pequeñas situaciones de stress abiótico debido a mecanismos que se desarrollan tanto en la planta como en el suelo, para mejorar las condiciones de crecimiento. Se determinaron variables intermedias a lo largo del ciclo, con el objetivo de explicar más detalladamente la respuesta de los distintos tratamientos de nutrición y bioestimulación. Se observaron tendencias positivas o diferencias agronómicas a lo largo del ciclo del cultivo parámetros como biomasa acumulada y fósforo absorbido en V6. Mientras que, en variables como SPAD, vigor, NDVI y intercepción de la radiación y altura final, se encontraron diferencias significativas. Los rendimientos alcanzaron una media de 10036 kg ha⁻¹, con mínimos de 8615 kg ha⁻¹ para el tratamiento testigo y máximos 11409 kg ha⁻¹ en el de máxima, encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos y respuestas agronómicas a la aplicación de HS sobre la semilla de maíz cercanas a los 300 kg ha⁻¹. A su vez, se observaron mejorías aunque no estadísticamente significativas en el uso del Fósforo aplicado por la utilización de HS aunque esta conclusión requiere un estudio más detallado.

Palabras clave: *Bioestimulación, complemento de la fertilización de base, maíz.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos más importantes que tiene la humanidad al año 2050 es el de aumentar la producción de los cultivos para satisfacer la creciente demanda de alimentos, forrajes, fibra, y biomateriales, minimizando el impacto ambiental. Su demanda mundial viene aumentando a una tasa superior al aumento del rendimiento potencial y, dado que la expansión de la frontera agrícola es a mediano plazo insostenible, ya que 13 millones de hectáreas se incorporan anualmente ocupando en muchos casos ecosistemas frágiles, parece ser que el incremento del rendimiento es crucial para satisfacer en el futuro los requerimientos mundiales y locales de grano (Cassman, 2020).

No caben dudas sobre la importancia de la agricultura en Argentina, ni tampoco sobre la importancia del maíz en los planteos productivos. Durante la campaña 2021/22 se sembraron 7,7 Millones de has, un 8,5% más que la campaña anterior, con una producción cercana a las 52 Millones de Tn (-5.5% interanual) debido principalmente al impacto de la sequía sobre el rendimiento. Con un rendimiento medio de 6990 kg ha⁻¹ a nivel país (Bolsa de Cereales de Buenos Aires, 2022).

El maíz es un cultivo exigente, con respuesta al agregado de diferentes elementos. Las prácticas de manejo, entre ellas la nutrición impactan sobre la dinámica y el tamaño de la estructura del cultivo, y con ello sobre la captura de recursos, que modulan el crecimiento a través de la producción de biomasa y la determinación del rendimiento alcanzable por el cultivo (Maddonni, 2012).

El desafío para la fertilización es cubrir los requerimientos de nutrientes que el suelo no puede aportar para maximizar los rendimientos. Este manejo de la nutrición de los cultivos reiterado en el sistema afecta no sólo los niveles de fertilidad de los suelos sino que acentúa los rendimientos entre los diferentes planteos. Son abundantes los estudios de suelos que muestran la reducción en niveles extractables de diversos nutrientes en comparación con su estado original (Sainz Rozas et al., 2011).

La capacidad del suelo de proveer nitrógeno (N) a través de la mineralización junto al potencial de rendimiento son los factores que determinan la magnitud de la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz (Salvagiotti et al., 2014).

En cambio, el incremento de rendimiento por el agregado de fósforo (P) depende mayormente de su disponibilidad en los suelos (Ferraris et al., 2017). Este es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Junto con el N y el potasio (K) conforman el grupo de macronutrientes principales, por las cantidades requeridas por los cultivos. Sus deficiencias normalmente se relacionan con un crecimiento inicial reducido y lento. En general plantas deficitarias en este elemento ven resentida su expansión foliar, no afectando así su concentración de clorofila, lo que explica que el color de las hojas de plantas especialmente jóvenes sea verde oscuro. Como el P es un nutriente móvil en la planta,

los síntomas de deficiencia aparecen en primer lugar, en las hojas más viejas. Su deficiencia disminuye la traslocación de asimilados y aumenta el contenido de azúcares en hojas y tallos, los que generan tonalidades morados o púrpuras (García y Echeverría, 2015).

El P llega a las raíces principalmente por difusión. Como este proceso es generalmente lento, la intercepción de este nutriente por las raíces es también un componente importante en la absorción. Cuando un fertilizante fosfatado es aplicado al suelo, una fracción del P es absorbido por el cultivo, mientras que el resto reacciona con la fase sólida. La fracción absorbido por los cultivos es variable, dependiendo esto del cultivo, el tipo de suelos, el contenido de arcillas y el nivel inicial de P en estos, rondando entre un 15 y 35 % del P aplicado a los cultivos (Ciampiti, 2009).

En la última década, el concepto de bioestimulante ha ganado interés no solo dentro de la comunidad científica sino también en el sector productivo primario. De acuerdo con datos de Fertilizar AC, quien desde el año 2015 releva el mercado de fertilizantes especiales y dentro de ellos a los bioestimulantes, han tenido un abrupto crecimiento en volumen desde 2020 llegando a superar las 11000 Tn de productos despachados, siendo el crecimiento del año 2022 cercano al 35 por ciento, respecto del anterior (Blackbox especialidades fertilizar AC 2022)(Figura 1)



Figura 1. Evolución de los bioestimulantes en el mercado de especialidades argentino (Fertilizar 2022).

Al comparar el volumen de bioestimulantes frente al del total de especialidad, la oferta es abundante, y se espera que la cantidad y complejidad de estos productos aumente aún con el tiempo a causa de varios

factores. El concepto de economía circular motiva el desarrollo de bioestimulantes. Esto significa que cada vez más residuos (agrícolas, urbanos o industriales), se van a reciclar y utilizar en la agricultura y horticultura. Este volumen resulta acotado, dadas las limitadas dosis de producto aplicadas por unidad de superficie (Figura 1).

Históricamente, debido a su facilidad de aplicación, dosis, y aceptable respuesta agronómica, los aminoácidos han sido el segmento predominante en el mercado de las especialidades. Seguido de los ácidos húmicos y fúlvicos (Fertilizar AC 2022) (Figura 2).

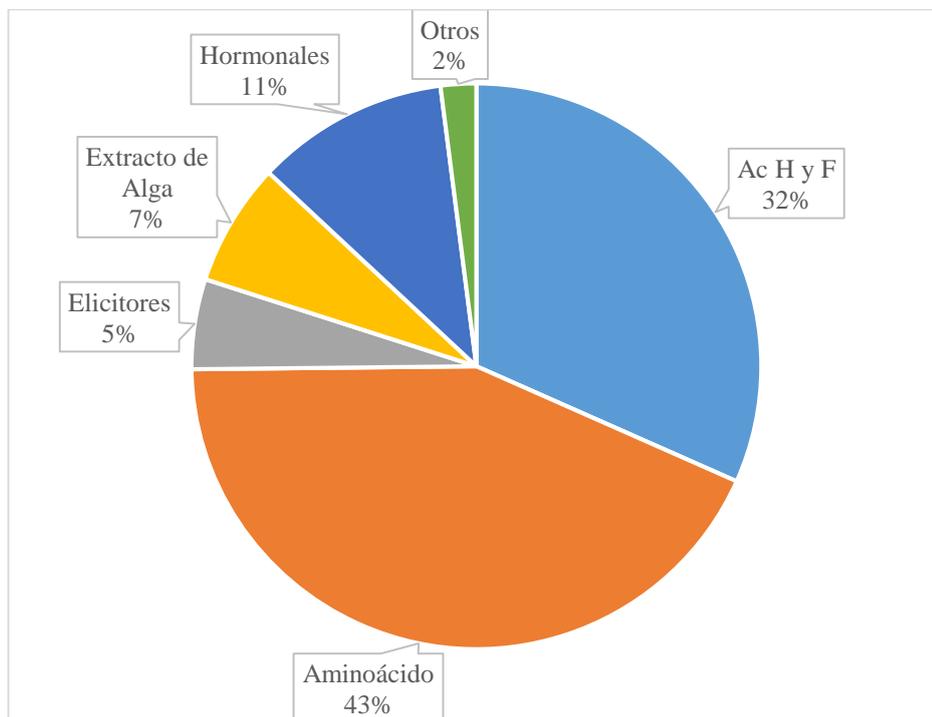


Figura 2. Composición del mercado de bioestimulantes en la república argentina (Fertilizar, 2022).

Un bioestimulante vegetal es cualquier sustancia o microorganismo que se aplica a las plantas o cultivos con el objetivo de mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o los rasgos de calidad, independientemente de su contenido de nutrientes. Por extensión, los bioestimulantes también incluyen productos comerciales que contienen mezclas de tales sustancias y/o microorganismos (Du Jardín., 2015).

No obstante, si bien existen varias propuestas para clasificar los bioestimulantes, los grupos más aceptados en la actualidad son: aminoácidos, extractos de algas, hormonas vegetales, elicitores y ácidos húmicos y fúlvicos

Aminoácidos (AA) y mezclas peptídicas: son una amplia familia de compuestos biológicos que contienen un grupo funcional de amino y un grupo funcional de ácido carboxílico. Si bien veinte aminoácidos están directamente involucrados en la estructura de las proteínas, existen miles de otros aminoácidos que no desempeñan dicho papel, conocidos como aminoácidos no proteicos (Vranova et al., 2011). En las plantas, estos aminoácidos no proteicos, como por ejemplo la glicina-betaína y la prolina, aportan beneficios contra el estrés abiótico, por su efecto osmoprotector. Por ejemplo, está documentado que la glicina-betaína puede contribuir a mantener la fotosíntesis de la hoja frente a situaciones de estrés salino. En el suelo, estimulan la actividad microbiana, mineralizando mayor cantidad de nitratos, y favoreciendo su absorción. Por otro lado, el efecto quelante de estas sustancias mejoraría la disponibilidad de nutrientes al ser aplicados en conjunto. Lo mismo sucedería con su absorción por las raíces (Du Jardín., 2015). Comercialmente estos productos provienen de la hidrólisis de subproductos de la industria, restos de animales como por ejemplo la piel, sangre, entre otros, llamados normalmente hidrosilatos que pueden ser aplicados de forma foliar, al suelo, en el surco o en tratamiento de semilla (Vranova et al., 2011).

Los extractos de algas son sustancias utilizadas no sólo como productos agrícolas sino también para uso humano directo como farmacéuticos o comestibles. En la agricultura se utilizan desde la antigüedad como fertilizantes, pero su efecto bioestimulante se ha reportado recientemente. Las algas pardas son las de mayor uso en el sector agrícola. Las más conocidas son *Ascophyllum nodosum*, *Fucus sp.*, *Ecklonia máxima*, *Laminaria sp.*, *Macrocystis pyrifera*, entre otras. Otras sustancias como la carragenina, provienen de las algas rojas. Contienen diversas fitohormonas en composición como auxinas, citoquininas o ácido abscísico. También contienen sustancias como las betaínas, que les provee beneficios antiestrés. Sus polisacáridos contribuyen a mejorar la retención de agua y la aireación del suelo. Por otro lado, retienen cationes. Posee efecto positivo en la germinación y el establecimiento de cultivos asociado a su efecto hormonal (Du Jardín., 2015).

Las hormonas vegetales son compuestos orgánicos, no nutrientes, derivados de síntesis endógena que, en pequeñas cantidades (10^{-4} a 10^{-6} M), promueven, inhiben o modifican procesos morfológicos y fisiológicos en las plantas. Los reguladores más conocidos pertenecen a los grupos de Auxinas, Giberelinas, Citoquininas, Etileno, Ácido Abscísico, etc. Los biorreguladores, sin embargo, son sustancias exógenas sintéticas o naturales que, cuando se aplican a las plantas, tienen acciones similares a las hormonas vegetales (Fancelli 2023). Las funciones más destacadas son como enraizantes, en la germinación de semillas, para la maduración y calidad de frutas, la tolerancia diversos tipos de estrés y aumento del rendimiento (Du Jardín., 2015). Si bien se discute la acción de las hormonas aisladas, no se pueden descuidar las interrelaciones entre estas sustancias, ya que en algunas situaciones es imprescindible combinar muchas

señales para lograr sus efectos, como ocurre con la sinergia entre Auxina- Citoquinina y Giberelina-Auxina. Además, una hormona puede influir en la biosíntesis de otra, de modo que los efectos producidos por una de ellas pueden, de hecho, ser modulados por otras (Fancelli, 2023).

Las plantas sirven como fuente de nutrientes para una amplia variedad de microorganismos heterótrofos que pueden causar enfermedades en sus huéspedes. Barreras físicas, como una capa cuticular cerosa y paredes celulares rígidas, así como productos químicos antimicrobianos preformados, pueden proporcionar cierta protección contra fitopatógenos que intentan atacarlas. Además, las plantas han desarrollado un sistema inmunológico inducible que se basa en el reconocimiento específico de moléculas derivadas de patógenos (Bektas 2015). Los elicitores son sustancias químicas, microorganismos o condiciones físicas de distinto origen, que pueden desencadenar respuestas fisiológicas y morfológicas en las plantas. Imitan la acción de las moléculas de señalización vegetal y producen especies reactivas de oxígeno (ROS) que estimulan a la planta para que genere hormonas de defensa y mecanismos antioxidantes, enzimáticos o no enzimáticos, para mitigar los efectos de las ROS. Tienen gran potencial para reducir la utilización de sustancias químicas (fungicidas-insecticidas-etc.), para la producción más ecológica-orgánica-sustentable (Du Jardín, 2015).

Finalmente, las sustancias SH son constituyentes de la materia orgánica de los suelos, provenientes de la descomposición de plantas, animales y/o microbios. Son compuestos heterogéneos, normalmente clasificados según el peso molecular y solubilidad en huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Estos compuestos comúnmente provienen de la materia orgánica humificada natural (suelos volcánicos), compost y vermicompost, o de depósitos naturales (i.e leonardita).

Se reconoce la capacidad de estas moléculas como contribuyentes esenciales de la fertilidad tanto física, química, como biológica de los suelos. Existe evidencia de que la aplicación exógena de SH puede ayudar a mejorar la fertilidad del suelo. Algunos de los beneficios documentados de la enmienda del suelo con SH incluyen una mejor agregación y estructura del suelo, un aumento en la regulación del pH y la capacidad de intercambio catiónico, una mayor retención de agua, menor fijación de nutrientes inmóviles como P, Hierro (Fe) y Zinc (Zn) (Chen et al., 2004). Los SH, poseen efectos positivos en el crecimiento de las plantas, incluyendo un aumento en la biomasa, un aumento en el número de frutos y flores, y una mejora en la calidad de los frutos (Halpern et al., 2015). Se ha propuesto también la contribución de las sustancias húmicas en la morigeración del stress biótico mediante la estimulación de la actividad de la microflora rizosférica (Du Jardín., 2015).

La combinación de la nutrición mineral con tratamientos con efecto bioestimulante permitiría mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes e incrementar la adaptabilidad del cultivo, el cual aumenta su

estabilidad ante condiciones ambientales desfavorables, tan frecuentes en cultivos de verano en seco.

Estudios previos en otras regiones del mundo (Geelen et al., 2022) señalan que la respuesta de los HS en la agricultura es cercana al 16 %, siendo el rango más frecuente de 12,7 a 19,4 %. Otro factor importante para considerar es la metodología de aplicación, siendo las alternativas foliares, sobre semilla y al suelo. Para este set de datos analizados, y considerando todos los bioestimulantes, los tratamientos foliares (que representaban más del 85% de los estudios) y la aplicación de semillas lograron un incremento promedio similar, de alrededor del 17,0 %, Por su parte, las aplicaciones al suelo arrojaron una respuesta promedio de un 28,8%. Estos resultados deberían ser tomados con cautela, ya que las regiones agroecológicas difieren mucho de la Región pampeana argentina, por lo que resulta relevante realizar este tipo de estudios en las condiciones climáticas y suelos de nuestro país.

OBJETIVO

El objetivo del presente Trabajo Final fue evaluar el efecto de distintas dosis de fertilización fosforada con y sin la aplicación de un bioestimulante a base de HS, aplicado a la semilla, sobre el crecimiento inicial, la absorción y recuperación del nutriente aplicado, y su impacto en el rendimiento y sus componentes.

HIPÓTESIS

- 1) La bioestimulación sobre semilla puede complementar la fertilización inicial, incrementando los rendimientos.
- 2) La bioestimulación puede mejorar el crecimiento y absorción inicial de P del cultivo
- 3) Es posible identificar una combinación de tratamientos de fertilización fosforada y bioestimulación sobre semilla de superior comportamiento agronómico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental e implantación del cultivo

Durante el ciclo 2021/22, se condujo un experimento de campo en la EEA INTA Pergamino, para evaluar el efecto de dosis diferentes de P aplicados a la siembra, y la utilización de un bioestimulante a base de ácidos húmicos, fúlvicos (HS) sobre un suelo Serie Pergamino, Clase I-2, Argiudol típico, familia fina, illítica, térmica (USDA- Soil Taxonomy V., 2006) . El ensayo fue sembrado el día 24 de septiembre de 2021, en el campo experimental de la EEA INTA Pergamino. El espaciamiento fue de 0,7 m entre hileras, logrando una densidad de 65.000 pl ha⁻¹. El híbrido elegido fue Limagrain LG 6620 VT3P. La implantación fue bajo prácticas de labranza cero con control químico de malezas, plagas y enfermedades. Las temperaturas máximas medias y mínimas medias como así también las precipitaciones fueron registradas, a través del observatorio meteorológico de la experimental EEA Pergamino.

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con 4 repeticiones, con un tratamiento testigo y 5 combinaciones de P y bioestimulante aplicado a la semilla (Tabla 1). Con el objetivo de comprender la situación nutricional inicial y poder realizar un correcto diagnóstico, previo a la siembra se realizó un análisis de suelo cuyos datos se muestran en la Tabla 2. El P fue aplicado como súper fosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0) en la línea de siembra (dosis?). La aplicación de N, igual para todos los tratamientos, fue de 217 kg ha⁻¹ de Urea (46-0-0) incorporada a la siembra más 100 kg ha⁻¹ en V6 (Ritchie & Hanway, 1982). Además, se aplicaron 100 kg ha⁻¹ de sulfato de calcio (SC, 0-0-0-S18 – Ca22) en cobertura total en presiembra.

Tabla 1. Tratamientos de fertilización fosforada y bioestimulación a la siembra en maíz. Campaña 2021/22.

| Tratamientos | Dosis de Fósforo Aplicado (kg ha ⁻¹) |
|--------------|--|
| P0 | 0 |
| P0B | 0 |
| P10 | 10 |
| P10B | 10 |
| P30 | 30 |
| P30B | 30 |

Determinaciones en suelo y planta

En la Tabla 2 se muestran los datos resultantes del análisis del suelo realizados al momento de la siembra.

Tabla 2. Análisis de suelo del lote, al momento de la siembra.

| Prof | Materia Orgánica | N total | Fósforo extractable | pH | N-Nitratos 0-60 cm | S-Sulfatos profu? | Agua en suelo mm |
|-----------------------|------------------|---------------|---------------------|-------------|--------------------|---------------------|------------------|
| | % | % | mg kg ⁻¹ | agua 1:2,5 | kg ha-1 | mg kg ⁻¹ | 150 cm - siembra |
| 0-20 cm | 2,79 | 0,140 | 9,4 | 5,7 | 41,6 | 11,5 | 130 |
| Interpretación | Bajo | Bajo | Muy bajo | Ácido | Bajo | Alto | Bajo |
| | Potasio | Calcio | Magnesio | Zinc | Boro | Mn | Hierro |
| | mg kg-1 | mg kg-1 | mg kg-1 | mg kg-1 | mg kg-1 | mg kg-1 | mg kg-1 |
| 0-20 cm | 398 | 1428 | 175 | 0,54 | 0,48 | 43,4 | 61,3 |
| Interpretación | Alto | Alto | Mod-Alto | Muy bajo | Bajo | Alto | Alto |

En el estado de V6 (Ritchie & Hanway, 1982) se determinó la biomasa aérea a través de la recolección de plantas en una superficie de 1m² por parcela, las cuales fueron secadas en estufa de circulación forzada a 60°C hasta peso constante. Esas mismas muestras se enviaron al laboratorio de Tecnologías aplicadas de la Universidad Nacional del Litoral donde se determinó la concentración de P en tejidos.

Hacia V8 (Ritchie & Hanway, 1982), se calificó el vigor de planta de cada tratamiento según un score por determinación visual de 1-5. En V9 se determinó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Tucker, 1979), un indicador de la biomasa fotosintéticamente activa. El NDVI se calcula como $NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red)$, donde NIR es la luz del infrarrojo cercano y Rojo es luz roja visible. Este proceso se realiza por medio del sensor Green Seeker.

En el período de Vt (Ritchie & Hanway, 1982), se cuantificó la intercepción de radiación mediante un radiómetro lineal (Licor LI-191R). En R1 (Ritchie & Hanway, 1982) se cuantificó el contenido de N mediante una lectura adimensional no destructiva con el medidor de clorofila Minolta Spad 502.

A cosecha se determinaron el número de plantas sin espigas y los componentes del rendimiento, número de espigas m⁻² (NE), granos espiga⁻¹ (GE), número granos m⁻² (NG) y peso (PGx1000) de los granos. La cosecha se realizó el día en forma manual, con trilla estacionaria de las muestras. Finalmente se calculó la respuesta agronómica del cultivo a la aplicación de P (EUP) como la diferencia entre los tratamientos fertilizados y del testigo en la variable de rendimiento:

$$\frac{\text{Rendimiento tratamientos Fertilizado} - \text{Rendimiento Testigo}}{P \text{ aplicado}}$$

Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados se realizaron análisis de la varianza, y comparaciones de medias mediante ANOVA y la prueba de medias (LSD) con el programa INFOSTAT (Di Rienzo et al 2001).

RESULTADOS y DISCUSIÓN

A) Condiciones ambientales de la campaña.

En la Figura 3 se presentan las precipitaciones del sitio experimental durante el ciclo de cultivo. En la Figura 4 se presenta un balance hídrico con datos de la localidad de Pergamino aportados por la oficina de riesgo agropecuario (ORA) a partir de datos de la estación meteorológica de la EEA INTA Pergamino. Por último, en la Figura 5 se describen las temperaturas máximas y mínimas con relación a la media histórica divididas en periodos de 10 días. El almacenaje inicial fue moderado (128 mm a 150 cm de profundidad), a causa de un final de invierno y comienzo de primavera medianamente secos. La escasez de lluvias se mantuvo durante el ciclo del cultivo (Figura 3), agotando la humedad del perfil de los suelos (Figura 4). Las precipitaciones alcanzaron valores por debajo de la media (Figura 3), con registros especialmente bajos hacia finales de diciembre y principios de enero. Luego hacia mediados del mes de febrero y principios de marzo, la recomposición de las precipitaciones permitió superar los niveles medios históricos.

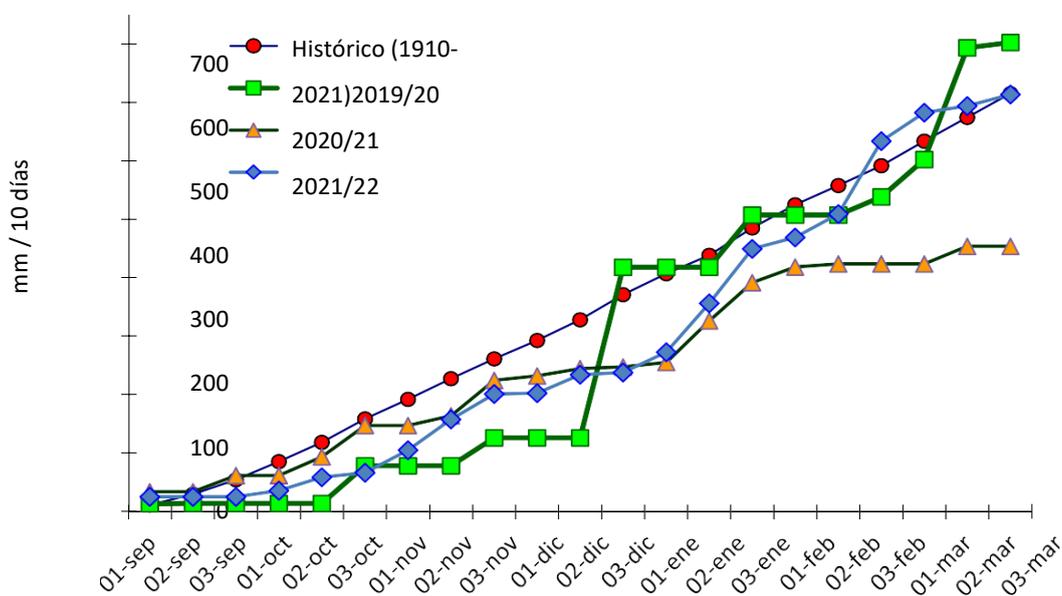


Figura 3. Precipitaciones decénicas del ciclo 2021-22, y su comparación con las dos campañas previas y la media histórica. Maíz, localidad de Pergamino. Agua útil inicial (150 cm) 128 mm. Precipitaciones totales durante el ciclo 749 mm.

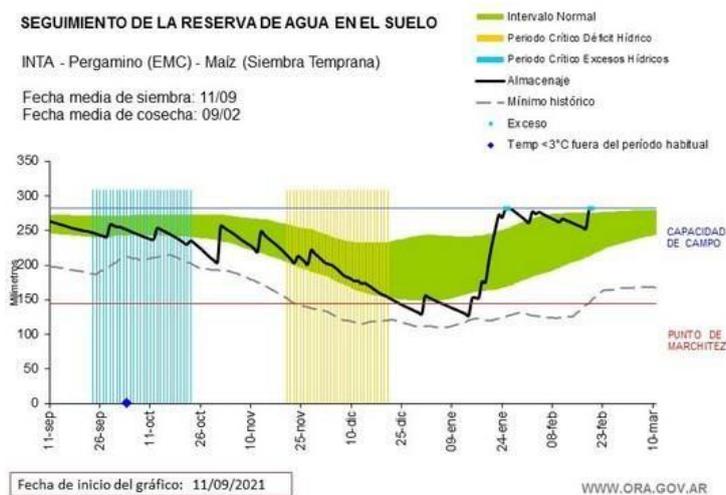


Figura 4. Evolución de la disponibilidad hídrica en el suelo en un cultivo de maíz durante la campaña 2021/22. En nivel de almacenaje fue muy restringido especialmente entre finales de diciembre hasta mediados de enero, llegando muy cerca del mínimo histórico y por debajo del punto de marchitez permanente (PMP). Elaborado por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) a partir de datos de la estación meteorológica de INTA Pergamino.

Coincidiendo con la falta de precipitaciones, se registraron temperaturas extremadamente elevadas en el periodo crítico, pocos días después de la floración en la tercera década de diciembre, y los primeros días del mes de enero de 2022. Luego hacia el mes de febrero y marzo esta situación logró revertirse (Figura 5).

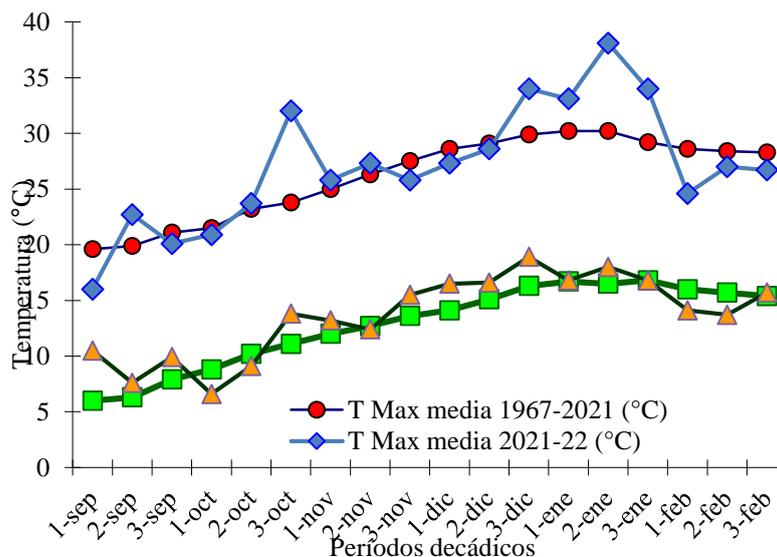


Figura 5. Temperaturas decádicas del ciclo 2021/22, comparadas al valor histórico 1967-2021. La temperatura máxima media fue superior a la histórica en 0,7 °C, y la mínima media en 0,9 °C. Datos de la EEA INTA Pergamino.

B) Resultado de los Experimentos.

A continuación se explican las tablas y figuras correspondientes a la toma de datos de durante el ciclo del cultivo de maíz. En la Tabla 3 se ilustran las observaciones correspondientes a condiciones de crecimiento inicial del cultivo afectado por los distintos tratamientos. Las figuras 6 y 7 representan respectivamente el rendimiento en cada de cada tratamiento agrupado y la eficiencia de uso agronómica de P.

Tabla 3. Parámetros morfológicos: Materia seca acumulada y fósforo absorbido en V5, Altura de plantas, intercepción de radiación, calificación de vigor, intensidad de verde determinado mediante Spad y NDVI por Green seeker. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (LSD $\alpha=0,05$; dms en tabla).

| Tratamiento | MS (kg ha ⁻¹) | P absorbido Kg ha ⁻¹ en V6 | Vigor V8 (1-5) | Spad V8 | NDV(Green Seeker) V9 | Intercepción (Vt) | Altura Final (cm) |
|-------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------|---------|----------------------|-------------------|-------------------|
| P0 | 2441 | 6,80 | 2,5 A | 50,7 A | 0,51 A | 82,9 AB | 209 A |
| P0B | 2922 | 8,31 | 3,0 B | 52,6 B | 0,53 B | 83,2 AB | 216 B |
| P10 | 3018 | 9,70 | 3,2 C | 56,2 C | 0,56 CD | 80,8 A | 220 B |
| P10B | 2878 | 7,78 | 3,2 C | 55,5 C | 0,55 C | 85,2 BC | 227 C |
| P30 | 2931 | 8,14 | 3,4 D | 51,0 AB | 0,56 CD | 89,7 D | 229 CD |
| P30B | 4108 | 12,03 | 3,5 D | 51,8 AB | 0,57 D | 87,9 CD | 232 D |
| P-valor | 0,3059 | 0,21 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0024 | <0,0001 |
| CV % | 31,71 | 32,51 | 3,16 | 2,45 | 1,64 | 3,14 | 1,35 |
| DMS | 1457,90 | 4,31 | 0,15 | 1,95 | 0,01 | 4,0 | 4,53 |

No fueron detectadas diferencias significativas en el crecimiento inicial debido a la aplicación de dosis creciente de fertilizante fosforado con y sin bioestimulantes. Aunque se puede observar una tendencia clara a la aplicación de HS en los tratamientos de 0 y 30 kg de P, donde la acumulación de materia seca en promedio fue de un 20 y 40% respectivamente lo que podría sugerir una mejoría en las condiciones de crecimiento del cultivo. En un metaanálisis centrado en el efecto de HS en un entorno controlado y en el campo Rose et al (2014) informaron, un aumento estimado ligeramente superior al 20% en el peso seco de la parte aérea y las raíces.

Situación similar se observó para *P absorbido*, donde los mismos tratamientos arrojaron diferencias de acumulación cercanas a un 22 y 48% respectivamente. Esto se debe a diferencias en la acumulación de biomasa, ya que la concentración de P en tejidos se mantuvo constante.

Los valores de *Score de vigor* medidos de 1 a 5 observados en estos experimentos arrojan diferencias significativas, entre los tratamientos de fertilización. Solo en el tratamiento testigo, la aplicación de bioestimulantes al tratamiento de semilla generó diferencias estadísticas en este parámetro.

En los valores de *SPAD*, podemos observar diferencias significativas entre algunos de los tratamientos principalmente entre 10 kg de P con y sin aplicación de bioestimulante y, dentro del testigo. Los valores se incrementan a medida que aumenta la oferta de P para luego disminuir, posiblemente una causa de una mejora en las condiciones de crecimiento que generan dilución de N.

El *NDVI* por Green seeker analizados en V9 demostró una diferencia positiva al agregado del bioestimulante en el tratamiento sin P y en el tratamiento de máxima. De la misma forma que ocurre con los parámetros anteriores, se visualiza una tendencia a mejores condiciones de crecimiento con el agregado del bioestimulante.

La *intercepción de la radiación* y la *altura final de planta*, son medida del crecimiento final del cultivo y la capacidad que tiene este para captar la radiación. Arrojaron diferencias significativas y positivas principalmente para los tratamientos de P 30 kg, con y sin bioestimulante frente a los testigos. No obstante, en ningún momento se alcanzó el (índice de área foliar) *IAF* crítico, esto es el índice de área foliar capaz de interceptar el 95% de la radiación solar que incide sobre el cultivo debido muy posiblemente a las condiciones de sequías experimentadas durante el ciclo.

Tabla 4: Plantas sin espiga (%), rendimiento y sus componentes numéricos: espigas m⁻² (NE), granos espiga⁻¹ (GE), número granos m⁻² (NG), peso (PGx1000) de los granos. Finalmente EUP como kg de grano obtenido por unidad de P aplicado. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (LSD $\alpha=0,05$; dms, en tabla).

| Tratamiento | Plantas débiles (%) | Espigas/m ² | Granos/esp | NG | PG | Rend kg/ha | EUP |
|----------------|---------------------|------------------------|------------|-----------|--------|------------|--------|
| P0 | 26,6 A | 5,9 | 528,3 | 3067,5 A | 281,0 | 8615,6 A | |
| P0B | 18,8 AB | 5,9 | 538,9 | 3146,2 A | 280,0 | 8803,1 A | |
| P10 | 15,0 BC | 6,1 | 652,3 | 3507,1 B | 284,8 | 9984,4 B | 136,98 |
| P10B | 10,8 BC | 5,9 | 638,2 | 3654,4 BC | 283,8 | 10359,4 BC | 174,38 |
| P30 | 10,3 BC | 5,9 | 657,3 | 3870,5 CD | 285,3 | 11043,8 CD | 80,94 |
| P30B | 5,0 C | 6,1 | 698,1 | 3983,2 D | 286,8 | 11409,4 D | 93,13 |
| P-valor | 0,0126 | 0,9997 | 0,6134 | <0,0001 | 0,4992 | <0,0001 | 0,1547 |
| CV % | 50,82 | 22,34 | 26,18 | 5,95 | 1,92 | 5,73 | 48,72 |
| DMS | 11,0 | 2,0 | 244,1 | 318,0 | 8,19 | 867,1 | 91,06 |

Analizando la Tabla 4, no se observaron diferencias significativas en cuanto al *número de plantas sin espigas*, NE ni GE. Los coeficientes de variación obtenidos fueron elevados. 50, 22 y 26,8% respectivamente, posiblemente a causa de la dispersión creada por las condiciones ambientales de la campaña.

No obstante, se puede observar una tendencia positiva en cuanto a las plantas débiles por el agregado de P. y por el agregado de bioestimulantes en cada tratamiento, con niveles de mejora cercanos al 5 %. En cambio NE y GE no presentan una tendencia clara.

A pesar de las condiciones transitadas durante la campaña 2021/22 los rendimientos alcanzaron una media de 10036 kg ha⁻¹, abarcando un mínimo de 8615 kg ha⁻¹ para el tratamiento testigo y 11409 kg ha⁻¹ en el de máxima, determinando diferencias significativas (P<0,05) entre los tratamientos. La implementación de la estrategia de fertilización con fósforo arrojó mejoras de 16 y 28 % para los tratamientos de P10 y P30 sobre el control sin fertilizar, respectivamente. Resultados similares se obtuvieron para la región pampeana (Diaz-Zorita, 2016).

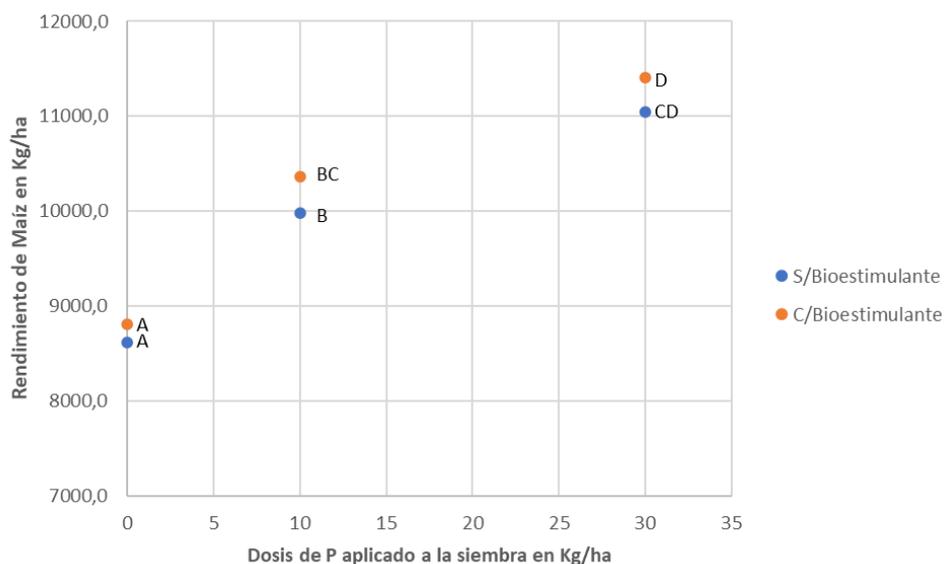


Figura 6. Rendimiento según tratamientos de fertilización con Fósforo con y bioestimulación a la siembra. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (LSD $\alpha=0,05$; dms: 867.1).

Los tratamientos de bioestimulación sobre semilla vs su testigo expresaron respuestas más someras, dentro del rango esperable, con una diferencia de 1875, 375 y 365 kg ha⁻¹ de maíz para las dosis de P0, P10 y P30, respectivamente. En promedio, la respuesta al bioestimulante sobre la semilla fue de 309,1 kg ha⁻¹. Esta diferencia podemos considerarla de relevancia agronómica o económica más allá de no ser estadísticamente significativa. Si bien (Li & Geelen, 2022) señalaron que la respuesta de los HS y a la semilla en la agricultura fue cercana al 16 %, los datos tomados en este estudio responden a regiones agroecológicas distintas a la Argentina, no encontrándose para este set de datos ensayos en maíz

correspondientes a la región.

El componente de rendimiento que explica de forma más relevante el rendimiento alcanzado es el *NG*, mientras que el *PG* permaneció prácticamente invariable. La utilización de Bioestimulantes mejoró en promedio en 110 granos m^{-2} , frente a su contraparte sin tratamiento. Las dosis de P10 y P30 incrementaron en un 14 y 23% el *NG* frente al testigo, respectivamente. El *NG* demostró diferencias estadísticas entre tratamientos ($P < 0,05$), que copiaron el comportamiento del rendimiento final.

Por último, la aplicación de HS permitió mejorar la cantidad de grano producido por unidad de P aplicado (EUP) en un 27 y 15% para los tratamientos de P10 y P30, respectivamente.

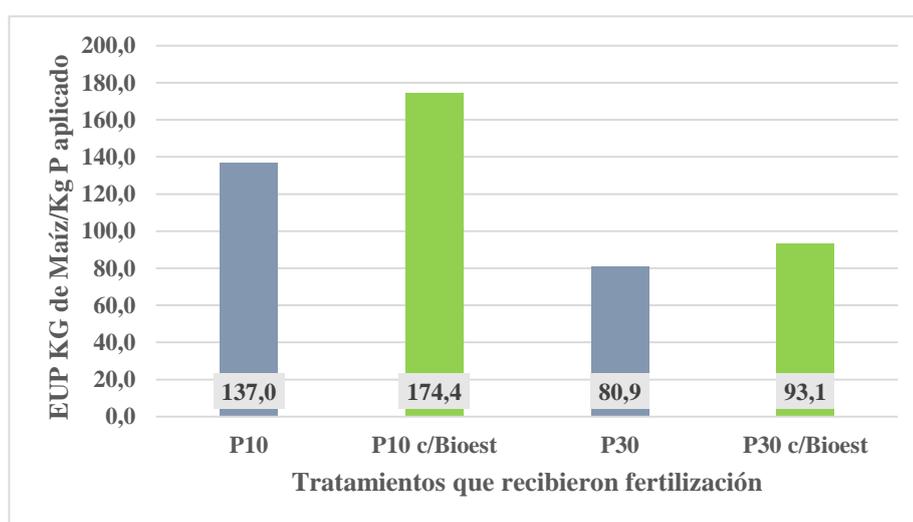


Figura 7. Eficiencia agronómica de uso de fósforo, calculado como el cociente entre la diferencia de rendimiento de los tratamientos vs el tratamiento testigo y el P aplicado a la siembra ($\frac{\text{Rendimiento tratamientos Fertilizado} - \text{Rendimiento Testigo}}{\text{P aplicado}}$), para cada tratamiento de fertilización.

CONCLUSIÓN

A pesar de un ambiente climático desfavorable, se determinaron diferencias significativas entre tratamientos ($P=0,0001$, $cv=5.7\%$).

Los parámetros de crecimiento inicial como la acumulación de biomasa y P en los tejidos, si bien mejoran frente a la aplicación de bioestimulantes, no logran explicar en forma definitiva el comportamiento en rendimiento. De la misma forma, la mejora en NDVI, altura final, indicarían mejoras en el crecimiento, en variables de tardía definición, derivadas del uso de bioestimulantes. Sugiriendo que la bioestimulación genera pequeños cambios positivos en la estructura del cultivo, desencadenando una serie de procesos que termina aumentando al rendimiento final

Los resultados obtenidos permiten aceptar las hipótesis 1: *La bioestimulación sobre semilla puede complementar la fertilización inicial, en la búsqueda de rendimientos.* La hipótesis 2: *La bioestimulación puede mejorar el nivel de absorción de nutrientes como el P hacia momentos iniciales de crecimiento como así también su crecimiento inicial.* No logró comprobarse estadísticamente, solo a nivel de tendencia. Por último, el máximo valor de rendimiento se obtuvo con la aplicación de HS más 30 kg de P lo que nos permite aceptar la hipótesis 3: *Es posible identificar una combinación de tratamientos de superior comportamiento agronómico entre aplicación de bioestimulantes a la semilla y nutrición.*

En síntesis, los bioestimulantes son una herramienta complementaria a la nutrición “tradicional” y a su vez permiten por un lado hacer frente a las situaciones de estrés cada vez más frecuentes ante el cambio climático y por otro mejorar las condiciones de crecimiento del cultivo. Además, proponen una estrategia de bajo impacto ambiental que aumenta la producción y permite mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados.

REFERENCIAS

- Bektas, Y., y Eulgem, T. (2015). Synthetic plant defense elicitors. *Frontiers in plant science*, 5, 804.
- Bolsa de cereales de Buenos Aires. Informe cierre de campaña maíz 2021/22. (2022). Recuperado de <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes>. Verificado 20 de Julio de 2023
- Cassman, K. G., y Grassini, P. (2020). A global perspective on sustainable intensification research. *Nat Sustain* 3: 262–268.
- Chen, Y. O. N. A., Clapp, C. E., y Magen, H. (2004). Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: The role of organo-iron complexes. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(7), 1089-1095.
- Ciampitti, I. A., Rubio, G., Picone, L. I., & García, F. O. (2009). El fósforo en la agricultura: Mejores prácticas de manejo (MPM). En: Simposio Fertilidad 2009 (pp. 35-51). *Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos*, IPNI Cono Sur de América Latina, Acassuso, Buenos Aires, Argentina
- Di Rienzo, J. A. (2009). InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de: <http://www.infostat.com.ar>.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia horticultrae*, 196, 3-14.
- Díaz-Zorita, M. y Grasso, A. (2016). Fertilización intensificada de planteos agrícolas. Ponencia presentada en el XXIV Congreso AAPRESID “Resiliar” (Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa), Rosario, Santa Fe, Argentina
- Echeverría, H. E., y García, F. O. (2015). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 904 p. Buenos Aires, Ediciones INTA.
- Estudio de mercado de especialidades año cerrado. (2022). Fertilizar Asociación Civil, comunicación personal 20 de junio de 2023
- Recuperado de: <https://fertilizar.org.ar/estadisticas/>
- Fancelli, A. (2023). *Aplicaciones y perspectivas del uso de Bioestimulantes y Biorreguladores en agricultura*. Actas Simposio Fertilizar 2023.
- Recuperado de: https://fertilizar.org.ar/publicaciones_y_eventos/aplicaciones-y-perspectivas-para-el-uso-de-bioestimulantes-o-biorreguladores-en-agricultura/. Verificado 20 de mayo de 2023
- Ferraris, G., Zorita, M. D., y Grasso, A. (2017). Intensificación productiva en maíz: comparación de modelos de fertilización para la Región Núcleo Pampeana. *Revista de Tecnología Agropecuaria*, 10(34).
- Halpern, M., Bar-Tal, A., Ofek, M., Minz, D., Muller, T., y Yermiyahu, U. (2015). The use of

biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in agronomy*, 130, 141-174.

Li, J., Van Gerrewey, T., y Geelen, D. (2022). A meta-analysis of biostimulant yield effectiveness in field trials. *Frontiers in Plant Science*, 13, 836702.

Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 325-345.

Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. (1982). How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report N 48. Publicación Miscelánea, 8(3).

Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. *Advances in agronomy*, 124, 37-89.

Sainz Rozas, H., Echeverría, H. E., y Angelini, H. (2011). Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 4, 14-18

Salvagiotti, F., Ferraguti, F., Enrico, J., y Prieto, G. (2014). *Fertilización nitrogenada en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. Informe de actualización técnica*. 27 EEA Marcos Juárez, 31. Recuperado de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-fertilizacion-nitrogenada-maiz-tardi o-segun-cult.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-fertilizacion-nitrogenada-maiz-tardi-o-segun-cult.pdf)

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.

Vranova, V., Rejsek, K., Skene, K. R., y Formanek, P. (2011). Non-protein amino acids: plant, soil and ecosystem interactions. *Plant and Soil*, 342, 31-48.