



FERTILIZACIÓN CON FUENTES LÍQUIDAS FOSFORADAS EN SOJA, Y SU INTERACCIÓN CON *BRADHYRIZOBIUM JAPONICUM* EN LÍNEA DE SIEMBRA

FERTILIZATION WITH LIQUID PHOSPHORUS SOURCES IN SOYBEAN, AND INTERACTION WITH *BRADHYRIZOBIUM JAPONICUM* IN SEEDING LINE

INTA EEA PERGAMINO
CAMPAÑA 2022/23

Ing. Agr. (MSc) Gustavo N. Ferraris¹ & Ing. Agr. Andrés Bozzini²

1. INTA EEA Pergamino. 2. SG Fertilizantes líquidos Arg SA. Av Frondizi km 4,5 (B2700WAA) Pergamino
ferraris.gustavo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un elemento esencial, con múltiples funciones en el metabolismo de los vegetales. Genera crecimiento aéreo y radicular, participa en la transmisión génica al ser parte del ADN y ARN. Energiza los vegetales, siendo clave en procesos con alta demanda como la fijación biológica de nitrógeno (FBN). Es además, el nutriente de la resistencia. Mejora la tolerancia a frío, sequía y enfermedades necrotróficas. De ciclo sedimentario, su enriquecimiento o devenir obedece al resultado del balance entre extracción y reposición. Uno de los problemas emergentes para su manejo, es la baja eficiencia con la que lo recuperan los cultivos. Con este motivo, se ha evaluado la modificación de la forma física, química, o el uso de sustancias microorganismos o aditivos solubilizadores

El P no actúa sólo sino que interactúa de diversas maneras con otras tecnologías. La práctica de la inoculación de semillas con productos de alta calidad y técnicas de inoculación apropiadas, en suelos con historia sojera y poblaciones naturalizadas de 102 a 105 rizobios g-1 suelo permite incrementos moderados de rendimientos del 5 al 10%, el "ahorro" del Nitrógeno (N) mineral del suelo, mejorar la calidad del grano a través de una mayor concentración de proteínas y contribuir a una economía anual en el uso de fertilizantes nitrogenados (Hungria et al., 2006).

Una tecnología eficiente para la nutrición fosforada es la aparición de nuevas fuentes y formulaciones, entre ellas las mezclas líquidas. Estas presentan una composición estable y predecible, con aporte diversificado de nutrientes, en función del cultivo y los objetivos de la fertilización. Su capacidad de difusión en el suelo y alta superficie específica incrementa las posibilidades de absorción, facilitando el intercambio en la interfase suelo – raíz.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia de una fuente líquida fosforada para la fertilización de soja, a dos dosis comerciales, y su combinación con *Bradyrhizobium japonicum* (Bj) chorreado en línea de siembra. Hipotetizamos que 1. La soja responde al agregado de fertilizantes fosforados, siendo la aplicación en línea una vía eficiente para su aplicación, y 2. Existe interacción positiva entre la fertilización e inoculación con *BJ*, cuando se aplican en forma conjunta. cultivo.

Palabras clave: soja, fertilizantes “starter”, fuentes líquidas, “pop up”, inoculación en surco, interacción fósforo x nitrógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la campaña 2022/23, se realizó un experimento de campo destinado a evaluar el comportamiento de un fertilizante líquido fosforado en el cultivo de soja de primera, aplicado sólo o en conjunto con *BJ*. El experimento fue sembrado en la localidad de Pergamino, sobre un suelo Serie Pergamino Argiudol típico, Clase de uso I, IP=85,5. La siembra se realizó el día 20 de noviembre, con la variedad DM 46I20 STS y un espaciamiento de 0,40 m entre hileras. Durante el ciclo se aplicaron herbicidas, insecticidas y fungicidas para prevenir el ataque de malezas, insectos y enfermedades. En particular, se registraron 3 aplicaciones destinadas al control de arañuela y trips, las plagas prevalentes de la campaña. Las parcelas se mantuvieron totalmente libres de estas adversidades.



Fotografía 1 : *Vista del experimento con fertilizantes líquidos fosforados en el cultivo de soja, durante la etapa vegetativa en la EEA INTA Pergamino. Campaña 2022/23.*



Fotografía 2 : *Diseño de los experimentos de nutrición en soja en la EEA INTA Pergamino. Campaña 2022/23.*

El diseño de los ensayos correspondió a bloques aleatorizados con cuatro repeticiones. Los detalles de los tratamientos evaluados se describen en la Tabla 1. Por su parte, el análisis de suelo se presenta en la Tabla 2.

Tabla 1: *Tratamientos de Soja de primera, composición química y aporte de nutrientes. Pergamino. Campaña 2022/23.*

Trat	Denominación	Dosis	forma de aplicación
T1	Testigo		
T2	Testigo inoculado	2 ml kg ⁻¹	Línea - Siembra
T3	Dualfos 20	20 l ha ⁻¹	Línea - Siembra
T4	Dualfos 30	30 l ha ⁻¹	Línea - Siembra
T5	Dualfos 20 + Inoculante BJ	20 l ha ⁻¹ + 400 ml ha ⁻¹	Línea - Siembra
T6	Dualfos 30 + Inoculante BJ	30 l ha ⁻¹ + 400 ml ha ⁻¹	Línea - Siembra

Tabla 2: Análisis de suelo al momento de la siembra, promedio de cuatro repeticiones. Pergamino, campaña 2022/23.

Prof	pH	MO	N total	Fósforo disponible	Calcio	Magnesio	Potasio	S-Sulf	Zn	B
	agua 1:2,5	%		mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	ppm	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Pergamino	5,6	3,16	0,158	6,5	1314	182	563	8.2	0,40	0,71
0-20 cm	lig ácido	medio	medio	muy bajo	alto	alto	muy alto	medio	muy bajo	bajo

Se cuantificó biomasa acumulada en R2. En el estado R4 se evaluó la nodulación mediante la valoración cuantitativa de la cantidad, tamaño, localización y funcionalidad de los nódulos. En el mismo estado se determinó el NDVI utilizando el sensor Green seeker, la cobertura mediante procesamiento con software específico de imágenes digitales. Asimismo, se estimó el contenido de N con el medidor de clorofila Minolta Spad 502, y se calificó el vigor en función del estado general de la parcela, su uniformidad y sanidad. La recolección se realizó con una cosechadora experimental. Sobre una muestra de cosecha se determinaron los componentes del rendimiento, N° de nudos, vainas, NG y PG. Los resultados fueron analizados por partición de la varianza, comparaciones de medias y análisis de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LA CAMPAÑA

En la Figura 1 se presentan las precipitaciones determinadas en el sitio experimental, en comparación con los valores históricos y los de las tres últimas campañas. Las lluvias del verano fueron históricamente bajas durante todo el ciclo de cultivo. En particular, los meses de febrero y marzo fueron particularmente desfavorables, sin lluvias (Figura 1) y con temperaturas extremas (Figura 3). Iniciando con bajas reservas, los cultivos bordearon el punto de marchitez permanente (PMP) durante todo el ciclo.

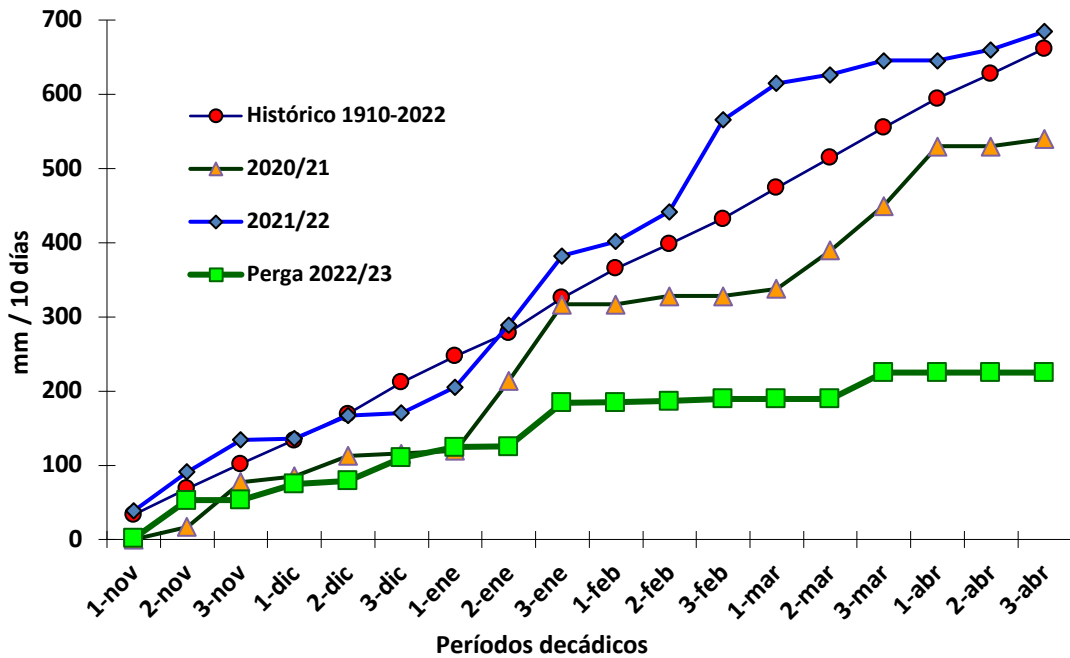


Figura 1: Precipitaciones decádicas del ciclo 2022-23, en comparación con las dos campañas previas y la media histórica. Soja, Wheelwright. Agua útil inicial (150 cm) 110 mm. Precipitaciones totales durante el ciclo 172 mm.

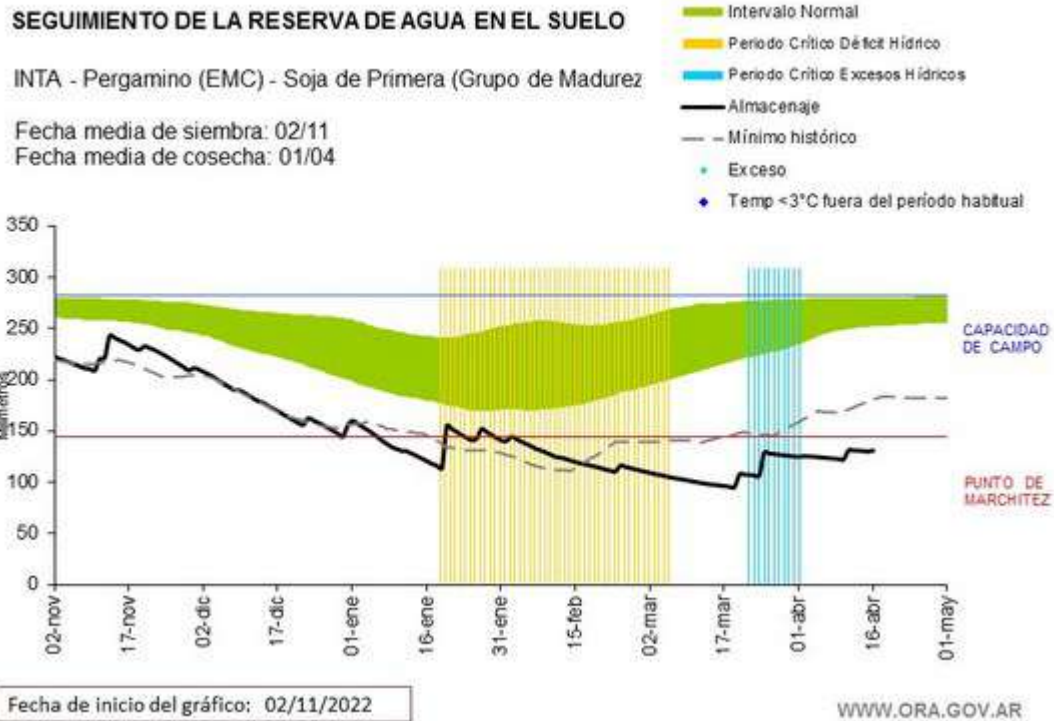


Figura 2: Evolución de la disponibilidad hídrica en el suelo en un cultivo de soja para el norte de Buenos Aires durante la campaña 2022/23. En nivel de almacenaje fue moderado al inicio, pero llegando a valores cercanos al punto de marchite permanente (PMP) a mediados de enero. Elaborado por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) a partir de datos de Pergamino.

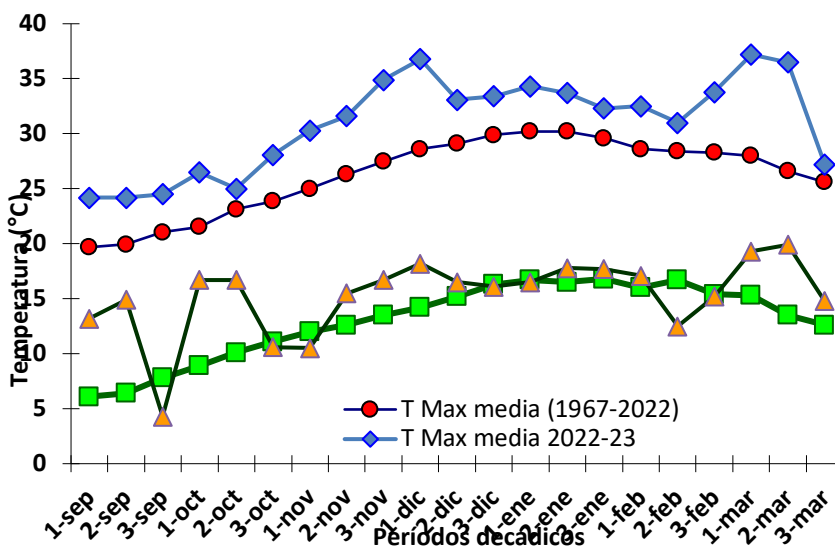


Figura 3: Temperaturas decádicas del ciclo 2022/23, comparadas al valor histórico 1967-2021. La temperatura máxima media fue superior a la histórica en 4,8 °C, y la mínima media superior en 2,3 °C. Estas condiciones muy desfavorables se mantuvieron durante el período crítico alrededor de floración. Datos del observatorio meteorológico de la EEA INTA Pergamino.

RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

En la Tabla 3 se presenta la evaluación de nodulación, mientras que en la Tabla 4 el rendimiento, sus componentes y otras variables determinadas durante el ciclo de cultivo. Finalmente, en la Figura 4 se ilustran los rendimientos, con sus desvíos y significancia estadística.

Tabla 3: Evaluación cuantitativa y cualitativa de nodulación. *Tratamientos de fertilización con fuentes líquidas e inoculación en soja. INTA Pergamino, campaña 2022/23.*

T	Tratamientos	Número Nódulos (1)	Tamaño nódulos (2)	Localización (3)	Funcionalidad (4)
	Pergamino soja				
T1	Testigo	2	3	3	2
T2	Testigo inoculado	3	2	2	2
T3	Dualfos 20	3	2	2	2
T4	Dualfos 30	2	3	3	2
T5	Dualfos 20 + Inoculante BJ	3	3	4	2
T6	Dualfos 30 + Inoculante BJ	2	3	4	3
R2 vs rend		0,01	0,06	0,32	0,22

Escala de colores: 1: rojo, 2: naranja, 3: amarillo, 4: verde claro, 5: verde oscuro.

1: rojo	2: naranja	3: amarillo	4: verde claro	5: verde oscuro
---------	------------	-------------	----------------	-----------------

Número de nódulos: 1: nulo, 2: escaso, 3: medio, 4: alto, 5: muy alto.

Tamaño: 1: muy pequeños, 2: pequeños, 3: tamaño medio, 4: tamaño grande, 5: tamaño muy grande.

Localización: 1: totalmente en raíces secundarias, 2: mayormente en raíces secundarias, 3: distribución equitativa raíz principal: raíz secundaria, 4: mayormente en raíz primaria, 5: nódulos totalmente localizados en raíz principal.

Funcionalidad: 1: tonalidad completamente verde o marrón, 2: tonalidad mayormente verde o marrón, 3: tonalidad diversa, 4: tonalidad mayormente rojiza, 5: tonalidad rojiza en la totalidad de los nódulos.

Tabla 4: Materia seca en R2, altura de planta (cm), contenido de N estimado por Spad, NDVI por Green seeker, cobertura e intercepción, calificación del vigor, número de nudos y vainas, rendimiento de grano, componentes y respuesta sobre el testigo. *Tratamientos de fertilización con fuentes líquidas e inoculación en soja. INTA Pergamino, campaña 2022/23.*

T	Tratamientos	Mseca R2 (kg ha ⁻¹)	Altura de plantas	Spad	Green Seeker R4	Intercepción R4 (%)	Vigor
T1	Testigo	1451	85	43,7	0,73	67,1	3,5
T2	Testigo inoculado	1530	86	56,1	0,75	66,3	4,0
T3	Dualfos 20	1621	89	42,7	0,77	76,1	4,3
T4	Dualfos 30	1645	90	45,0	0,78	73,2	4,3
T5	Dualfos 20 + Inoculante BJ	1620	88	48,2	0,77	62,3	4,4
T6	Dualfos 30 + Inoculante BJ	1899	90	47,6	0,79	75,9	4,4
	R ² vs rend	0,57	0,52	0,09	0,74	0,01	0,80

T	Tratamientos	Nudos planta ⁻¹	Vainas planta ⁻¹	Rendimto (kg ha ⁻¹)	NG	PG	Dif vs T1 (kg ha ⁻¹)
T1	Testigo	12	24	1643,2	1676,7	98,0	0,0
T2	Testigo inoculado	13	28	1859,9	1897,8	98,0	216,7
T3	Dualfos 20	10	37	1809,2	1756,5	103,0	166,0
T4	Dualfos 30	11	23	1940,2	1940,2	100,0	297,0
T5	Dualfos 20 + Inoculante BJ	11	27	2009,4	2115,2	95,0	366,2
T6	Dualfos 30 + Inoculante BJ	10	22	2016,6	2057,8	98,0	373,4
	R ² vs rend	0,29	0,07		0,92	0,11	
	P=			0,06			
	CV (%)			9,2			

R4 (vaina de máximo tamaño) de acuerdo a la escala de Fehr y Caviness, 1974.

Índice de Vigor: Según escala 1: mínimo – 5: máximo. Evalúa Sanidad, tamaño de planta y uniformidad de las parcelas.

Intercepción: evaluado como % de la radiación máxima incidente.



Fotografía 3: *Imagen mostrando la muy buena nodulación efectiva en la raíz principal fundamentalmente y en las raíces secundarias en las planta que fueron fertilizadas con Dualfos e inoculadas en forma chorreada en la línea de siembra.*

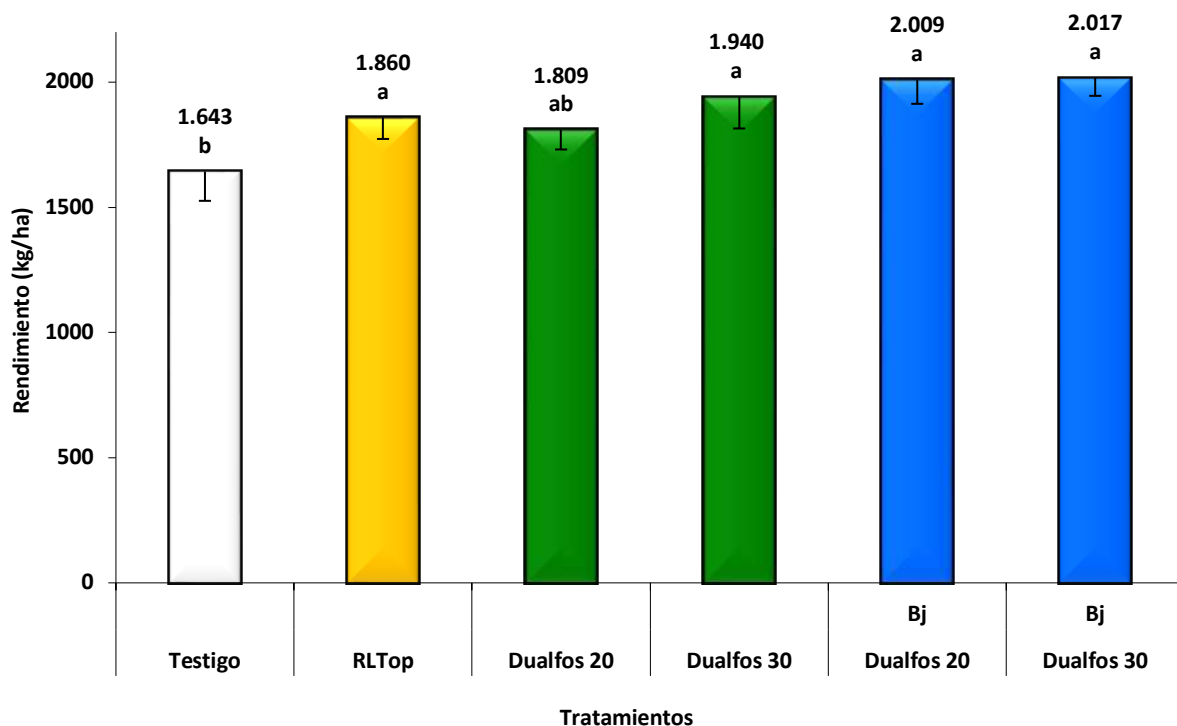


Figura 4: Rendimiento de grano según tratamientos de fertilización con fuentes líquidas e inoculación conjunta en línea de siembra de soja. Letras distintas sobre las columnas representan diferencias significativas entre tratamientos ($LSD a=0,10$, $dms=214 \text{ kg ha}^{-1}$). Las barras de error señalan la desviación standard de la media. Pergamino, campaña 2022/23.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El rendimiento del sitio alcanzó un promedio de $1879,7 \text{ kg ha}^{-1}$, lo cual representa un valor muy bajo para Pergamino y la región. Las causas se deben buscar únicamente en las precipitaciones y temperatura de la campaña, que alcanzaran valores extremos.

La nodulación fue de baja a mediana calidad (Tabla 3), reflejando las condiciones de sequía y escaso crecimiento del cultivo durante la campaña. Los mejores tratamientos correspondieron a la integración de fertilización e inoculante, demostrando compatibilidad entre ambas prácticas. El rendimiento guardó correlación especialmente con la localización de los nódulos ($r^2=0,32$), premiando la ubicación sobre el tallo principal (Tabla 3).

Se determinaron diferencias estadísticamente significativas en los rendimientos ($P=0,06$, $cv=9,2 \%$) (Tabla 4). Los tratamientos fertilizados o inoculados superaron al testigo, pero la plenitud se alcanzó con ambas prácticas en conjunto (Figura 4). El efecto de dosis en Dualfos fue relevante sólo sin inoculante. La respuesta máxima obtenida alcanzó a $373,4 \text{ kg ha}^{-1}$, en la comparación T6 vs T1 (tabla 4).

Los esquemas de fertilización lograron estimular algunos parámetros de crecimiento, describiendo con ajuste el efecto de tratamiento. Las de mayor relación estadística fueron materia seca en R2 ($r^2=0,57$), altura de las plantas ($r^2=0,52$), NDVI ($r^2=0,74$), la calificación subjetiva del vigor ($r^2=0,80$) y NG ($r^2=0,92$) (Tabla 4).

Los resultados del presente estudio permiten aceptar las hipótesis propuestas. Se determinó un efecto relevante y significativo de la fertilización. Los mejores resultados se obtuvieron mediante el uso conjunto con *Bradyrhizobium japonicum*, demostrando compatibilidad y hasta sinergismo entre tecnologías. Se concluye que, aun bajo sequía extrema, si la disponibilidad de un elemento en el suelo es baja, el cultivo de soja sostiene la respuesta a su agregado, especialmente con nutrientes de baja movilidad en el suelo.

LITERATURA CONSULTADA

- * Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., & Hernandez, V. E. 2016. Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3701-3707.
- * Chien, S. H., Prochnow, L. I., & Cantarella, H. 2009. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, 102, 267-322.
- * Codling, E. E. 2019. Effects of phosphorus amended low phosphorus soil on soybean (*Glycine max* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and phosphorus uptake. *Journal of Plant Nutrition*, 1-9.
- * Crista, F., Boldea, M., Radulov, I., Crista, L., Lato, A., Dragomir, C., ... & Lato, I. 2014. Changing the quality of maize grain after applying micro-granular fertilizers. *Research Journal of Agricultural Science*, 46(1), 166-171.
- * Edwards, C. L., & Ruiz Diaz, D. 2016. Evaluation of Phosphorus Source and Chelate Application as Starter Fertilizer in Corn. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 2(6), 4.
- * Fan, Y., Wang, Z., Liao, D., Raza, M. A., Wang, B., Zhang, J., ... & Yang, F. (2020). Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in maize-soybean intercropping under different row configurations. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.
- * Ferraris, GN., M. Toribio, R. Falconi. 2022. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. Informe final de resultados. 14 pp.
- * Fink, J., Borga, G., Frosi, G., Junior, C. P., Pitta, C. S. R., & Sánchez-Rodríguez, A. R. (2020). Enhancing Wheat and Soybean Yields in a Subtropical Oxisol Through Effective P Fertilization Strategies. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 1605-1613.
- * Fulford, A. M., Culman, S. W., Mullen, R. W., Dygert, C. E., LaBarge, G. A., Lentz, E. M., & Watters, H. D. 2016. Corn and Soybean Response to Phosphorus and Potassium Fertilization in Ohio. *Better Crops with Plant Food*, 100(2), 7-9.
- * Gluhić, D. 2012. The use of starter fertilizers in fertilization of field crops. *Glasnik Zaštite Bilja*, 35(3), 35-35.
- * Guera, K. C. S., Fonseca, A. F. D., & Harkatin, S. (2020). Phosphorus use in soybean in integrated production system under anticipation of phosphate fertilization. *Revista Ciência Agronômica*, 51(3).
- * Haraga, L. C., Szilagy, L., & Ion, V. (2022). Results Regarding The Effect Of Microgranulated Fertilizers In Hybrid Seed Maize Production. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 65(2).
- * Hnатовich, Garry Lawrence, et al. 2018. Methods and compositions for increasing the amounts of phosphorus available for plant uptake from soils. U.S. Patent Application No 16/004,575, 11 Oct. 2018.
- * Hungria, M., Franchini, J. C., Campo, R. J., Crispino, C. C., Moraes, J. Z., Sibaldelli, R. N., ... & Arihara, J. (2006). Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 927-939.
- * Khan, B. A., Hussain, A., Elahi, A., Adnan, M., Amin, M. M., Toor, M. D., ... & Ahmad, R. (2020). Effect of phosphorus on growth, yield and quality of soybean (*Glycine max* L.); A review. *IJAR*, 6(7), 540-545.
- * Li, H.; Wang, L.; Zhang, Z.; Yang, A.; Liu, D. Effect of Phosphorus Supply Levels on Nodule Nitrogen Fixation and Nitrogen Accumulation in Soybean (*Glycine max* L.). *Agronomy* 2022, 12, 2802. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112802>
- * Luikham, E., Kumar, K., & Mariam Anal, P. S. 2018. Influence of phosphorus on yield and quality of promising varieties of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] under rainfed condition. *Agricultural Science Digest*, 38(1).
- * Miele, S., Bargiacchi, E., Capuzzi, L., & Russo, E. 2005. Micro-granular composition with a combined fertilizing and phyto-protective action. U.S. Patent Application No. 10/496,474.
- * Mirriam, A., Mugwe, J., Raza, M. A., Seleiman, M. F., Maitra, S., & Gitari, H. H. (2022). Aggrandizing soybean yield, phosphorus use efficiency and economic returns under phosphatic fertilizer application and inoculation with *Bradyrhizobium*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(4), 5086-5098.
- * Moreira, A., Moraes, L. A. C., Moretti, L. G., & Aquino, G. S. 2018. Phosphorus, Potassium and Sulfur Interactions in Soybean Plants on a Typic Hapludox. *Communications in soil science and plant analysis*, 49(4), 405-415.

- * Nget, R., Aguilar, E. A., Cruz, P. C. S., Reaño, C. E., Sanchez, P. B., Reyes, M. R., & Prasad, P. V. (2022). Responses of soybean genotypes to different nitrogen and phosphorus sources: Impacts on yield components, seed yield, and seed protein. *Plants*, 11(3), 298.
- * Randall, G. W., & Hoefl, R. G. 1988. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. *Journal of Production Agriculture*, 1(1), 70-79.
- * Thielicke, M., Ahlborn, J., Životić, L., Saljnikov, E., & Eulenstein, F. (2022). Microgranular fertilizer and biostimulants as alternatives to diammonium phosphate fertilizer in maize production on marshland soils in northwest Germany. *Zemljište i biljka*, 71(1), 53-66.
- * Tian, J., Lu, X., Chen, Q., Kuang, X., Liang, C., Deng, L., ... & Tian, J. (2020). Phosphorus fertilization affects soybean rhizosphere phosphorus dynamics and the bacterial community in karst soils. *Plant and Soil*, 1-16.
- * Vázquez, M. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones agronómicas del Cono Sur. Edición especial sobre el simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosforada", XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn- Chubut, Argentina.* 16: 3-7.