

DESARROLLO DE FUENTES FOSFORADAS EN MAÍZ: FERTILIZANTES MICROGRANULADOS Y COMPONENTES BIOLÓGICOS

INTA EEA PERGAMINO
CAMPAÑA 2019/20

Ings. Agrs. Gustavo N. Ferraris¹, Fernando Sánchez y Alejandro Sartori²

1.INTA EEA Pergamino.Av Frondizi km 4,5 (B2700WAA) Pergamino 2.Rizobacter Argentina SA.

ferraris.gustavo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La intensificación de la agricultura y la falta de rotaciones con pasturas han producido una notable disminución de los niveles de fertilidad de los suelos de la región pampeana. Los niveles de MO y nutrientes, en algunas zonas representan solo el 50% del nivel original (Lavado, 2006). Esto junto con la escasa fertilización podría generar deficiencias de varios elementos, y limitar la expresión de rendimiento de los cultivos.

El fósforo (P) es un elemento central, que cumple innumerables funciones en los vegetales. Su deficiencia está asociada a un balance negativo recurrente a través de muchos años de agricultura. Cuando la disponibilidad en el suelo se reduce, la absorción del cultivo se encuentra limitada. La fertilización es la herramienta que permite saldar esta deficiencia, evitando una penalidad en los rendimientos. Sin embargo, el P reacciona fuertemente con los coloides del suelo, y la recuperación de los fertilizantes en general es baja, rondando del 10 al 30 %. La producción de fertilizantes es una industria tradicional que incorporó escasas innovaciones durante muchos años, prescindiendo responder estas inquietudes. En el último tiempo, la producción de nuevas fuentes así como tratamientos sobre aquellas de amplia difusión ha adquirido una dinámica particular. Así, es posible encontrar modificaciones en las formas químicas –algo común en las fuentes nitrogenadas- como en sus características físicas.

Los fertilizantes fosforados microgranulados se cuentan en esta tendencia. La variación más importante consiste en el incremento en el número de gránulos por plántula, aumentando considerablemente el número de puntos de captación y la superficie específica expuesta del fertilizante. La integración de varios nutrientes en el gránulo asegura una nutrición balanceada, puesta a disposición de manera uniforme e igualitaria para cada una de las plantas. Se suma a esto el aporte balanceado de diferentes elementos esenciales para el crecimiento, y la característica de mezcla química que asegura la provisión de todos los nutrientes en el mismo gránulo. Como la información disponible en fuentes tradicionales es muy difícil de extrapolar a estos nuevos fertilizantes, es necesario desarrollar información específica, como el ajuste de dosis, formas de aplicación y la complementariedad con las tradicionales. La adición de compuestos biológicos y hormonales podría apuntalar el efecto arrancador de estas fuentes, generando dentro de la rizósfera, un ambiente más propicio para el crecimiento.

Los objetivos de este experimento fueron 1. Comparar la eficiencia de un fertilizante microgranulado, en dos dosis, en comparación con estrategias de uso habitual en el cultivo de maíz, y 2. Evaluar el efecto complementario del agregado de bacterias promotoras del crecimiento vegetal. Hipotetizamos que 1. Es posible optimizar los rendimientos con mayor eficiencia agronómica mediante el uso de fuentes microgranuladas, ajustando adecuadamente la dosis óptima, y 2. El uso de bacterias promotoras de crecimiento se traduce en rendimiento adicional, independientemente de la dosis de fertilizante aplicada

Palabras clave: *maíz, fósforo, disponibilidad, suficiencia nutricional, fuentes microgranuladas, biología de suelos.*

MATERIALES Y MÉTODOS



Fotografía 1: Vista aérea de los experimentos de la campaña 2019/20.

Se implantaron dos experimentos de campo, en la EEA INTA Pergamino y en la localidad de Wheelwright, sur de Santa Fe.

El primero se llevó sobre un suelo Serie Pergamino, Clase I-2, Argiudol típico, familia fina, illítica, térmica (USDA- Soil Taxonomy V. 2006). El primero se sembró el día 11 de octubre, espaciado a 0,7 m entre hileras, logrando una densidad final de 83.000 pl ha⁻¹. El cultivar elegido fue Syngenta NK 979 Vip3. Por su parte, en Wheelwright se sembró el día 19 de Octubre de 2020, sobre un suelo Serie Hughes, Clase I, Argiudol típico, con la misma caracterización que en la Serie de suelo anterior. Fue espaciado a 0,525 m entre hileras, a una densidad de 83.000 pl ha⁻¹, siendo el cultivar Dk7220 VT3P.

Se aseguraron buenas condiciones productivas, manteniendo al cultivo libre de malezas, plagas y enfermedades. Todos los tratamientos recibieron urea a la siembra, ajustando la disponibilidad a 180 kgN ha⁻¹ (suelo 0-60 cm más fertilizante). En los experimentos, se utilizó un diseño en bloques completos al azar con 4 repeticiones, cuyos tratamientos se detallan en la Tabla 1. Por su parte, en la Tabla 2 se presentan los datos de suelo del experimento.

Tabla 1: *Tratamientos de fertilización aplicados en el experimento. Campaña 2018/19.*

	Alternativa de aplicación	Dosis	Estado de aplicación
T1	Control	0 kg ha ⁻¹	siembra
T2	MAP	100 kg ha ⁻¹	siembra
T3	Microstar PZ	30 kg ha ⁻¹	siembra
T4	Microstar PZ	40 kg ha ⁻¹	siembra
T5	Microstar PZ + bacterias	30 kg ha ⁻¹	siembra
T6	Microstar PZ + bacterias	40 kg ha ⁻¹	siembra
T7	MAP Microstar PZ	50 kg ha ⁻¹ 30 kg ha ⁻¹	Presiembra 7 d.a.s. siembra

Tabla 2: *Análisis de suelo efectuado al momento de la siembra*

Prof	Materia Orgánica	N total	Fósforo extractable	N-Nitratos suelo 0-60 (septiembre)	N-Nitratos suelo 0-60 (diciembre)	S-Sulfatos suelo	pH
	%	%	mg kg ⁻¹	ppm	kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹	agua 1:2,5
Pergam	2,52	0,126	10,3	57,7	70,8	8,6	5,8
0-20 cm	bajo	bajo	bajo	medio	medio	bajo	lig. ácido
Ww	2,89	0,144	11,4	18,7	74,8	8,5	5,5
0-20 cm	bajo	bajo	bajo	medio	medio	bajo	ácido
Prof	Potasio	Calcio	Magnesio	Zinc	Boro	Agua en suelo	Agua en suelo
				mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	150 cm - siembra	150 cm - siembra
Pergam	336	1499	167	0,70	0,50	120 mm	155 mm
0-20 cm	alto	alto	medio	bajo	medio	mod. seco	normal
Ww	383	1006	146	2,2	0,57	120 mm	155 mm
0-20 cm	alto	medio	medio	alto	medio	mod. seco	normal

Se cuantificó la materia seca acumulada en V6. En V6 y V10 se estimó el contenido de N mediante una lectura adimensional no destructiva con el medidor de clorofila Minolta Spad 502. En V9 se determinó el NDVI por medio del sensor Green seeker. En la floración se midió la materia seca acumulada, el número de hojas fotosintéticamente activas, el vigor, cobertura y altura de plantas.

A cosecha se determinaron 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 en forma manual, con trilla estacionaria de las muestras. Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza y comparaciones de medias.

RESULTADOS

A) Condiciones ambientales de la campaña.

En la Figura 1 se presentan las precipitaciones del sitio durante el ciclo de cultivo, y en la Figura 2 las temperaturas, horas de luz y el coeficiente fototermal (Q), con datos de la EEA Pergamino. Se consideró la etapa entre el 10 de diciembre y el 15 de febrero, la cual abarca el período crítico de floración y llenado de granos en todos los materiales. Por su parte, en la Figura 3 se comparan las temperaturas máximas de este ciclo con los anteriores.

La campaña fue muy difícil en un comienzo, producto de una salida de invierno y comienzo de primavera secos y con bajas temperaturas. Sin embargo, las precipitaciones regresaron en diciembre, siendo la segunda década el momento en que ocurrió la primera lluvia significativa de la campaña de

maíz (Figura 1). En particular, en la EEA INTA Pergamino ocurrió una lluvia de proporciones a finales de diciembre que, sostenidas durante enero, aseguraron un pasar favorable durante el período crítico.

Las temperaturas medias fueron bajas durante la etapa vegetativa y el período crítico, y muy elevadas en el llenado de granos (Figura 3). El cociente fototermal (Q) (11 dic-10 ene) fue de **1,60**, similar a la campaña 2018/19 (**1,59**), y en el medio de los ciclos fríos (2017/18: **1,65**; 2015/16: **1,72**; 2014/15: **1,70**) pero sin embargo superior al de ciclos cálidos (2013/14: **1,35**; 2016/17: **1,58**) (Figura 2).

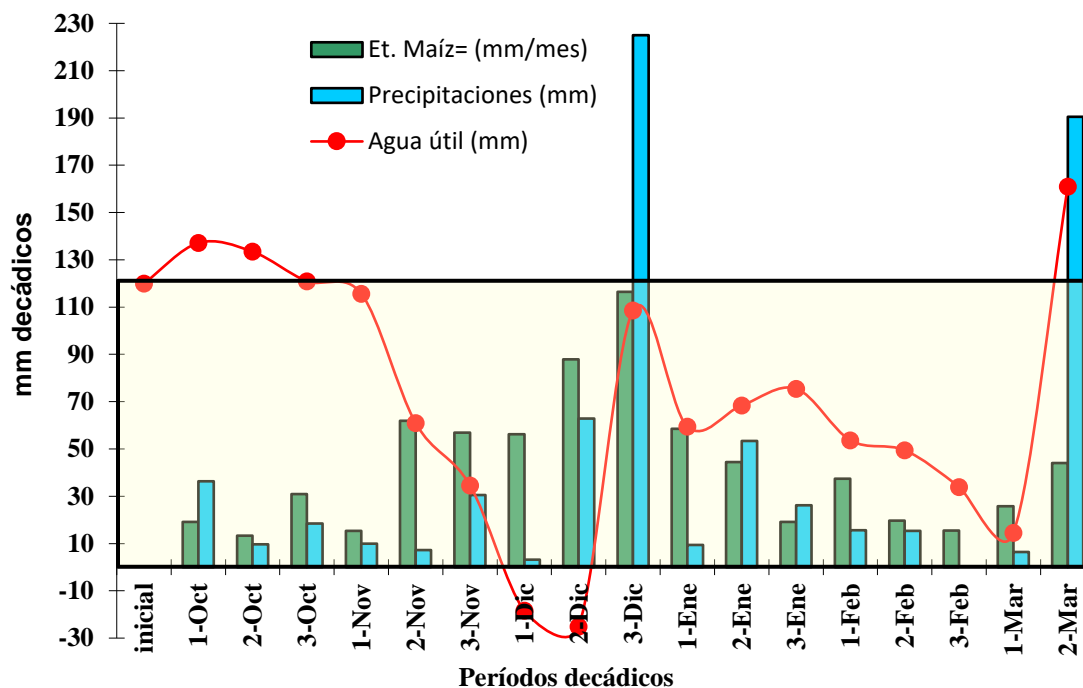


Figura 1.a: Precipitaciones, evapotranspiración y nivel de almacenaje (valores positivos) o déficit (negativo) acumulados (mm) en el sitio experimental. Pergamino, Bs As, campaña 2019/20. Agua disponible inicial en el suelo (150 cm) 120 mm. Precipitaciones totales en el ciclo 720 mm, especialmente agrupadas en dos precipitaciones muy importantes. Déficit de evapotranspiración 43 mm. El cuadro marca el nivel hídrico debajo del cual el uso consuntivo podría estar debajo del óptimo.

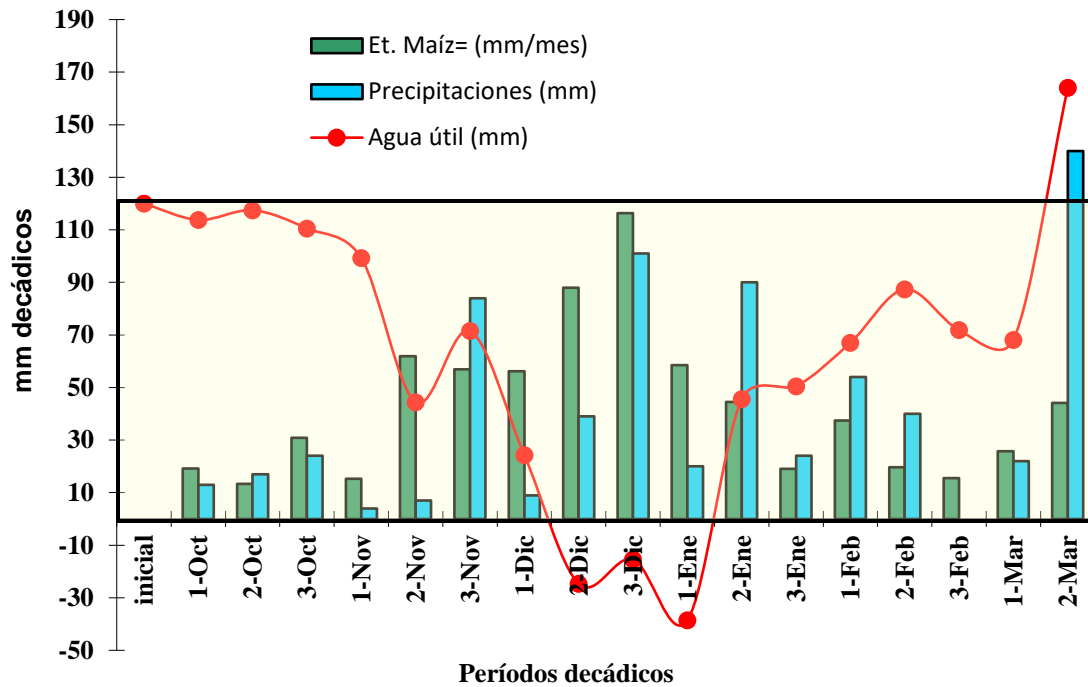


Figura 1.b: Precipitaciones, evapotranspiración y nivel de almacenaje (valores positivos) o déficit (negativo) acumulados (mm) en el sitio experimental. Wheelwright, Santa Fe, campaña 2019/20. Agua disponible inicial en el suelo (150 cm) 120 mm. Precipitaciones totales en el ciclo 688 mm, especialmente agrupadas en dos precipitaciones muy importantes. Déficit de evapotranspiración 79 mm. El cuadro marca el nivel hídrico debajo del cual el uso consuntivo podría estar debajo del óptimo.

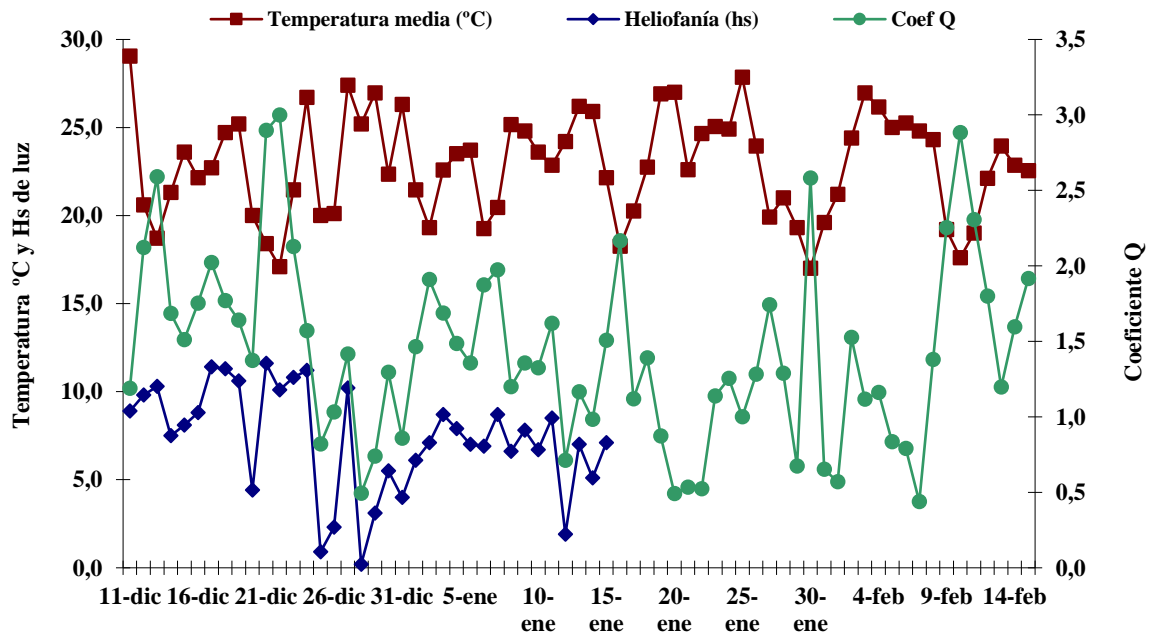


Figura 2: Insolación (en hs y décimas de hora) y temperatura media (°C) diaria para el período 10 de diciembre - 14 de febrero, en el transcurso del cual se ubicó la etapa crítica de la floración, e inicios de llenado de los granos. Datos tomados de la estación meteorológica de la EEA INTA Pergamino, (Bs As), campaña 2019/20.

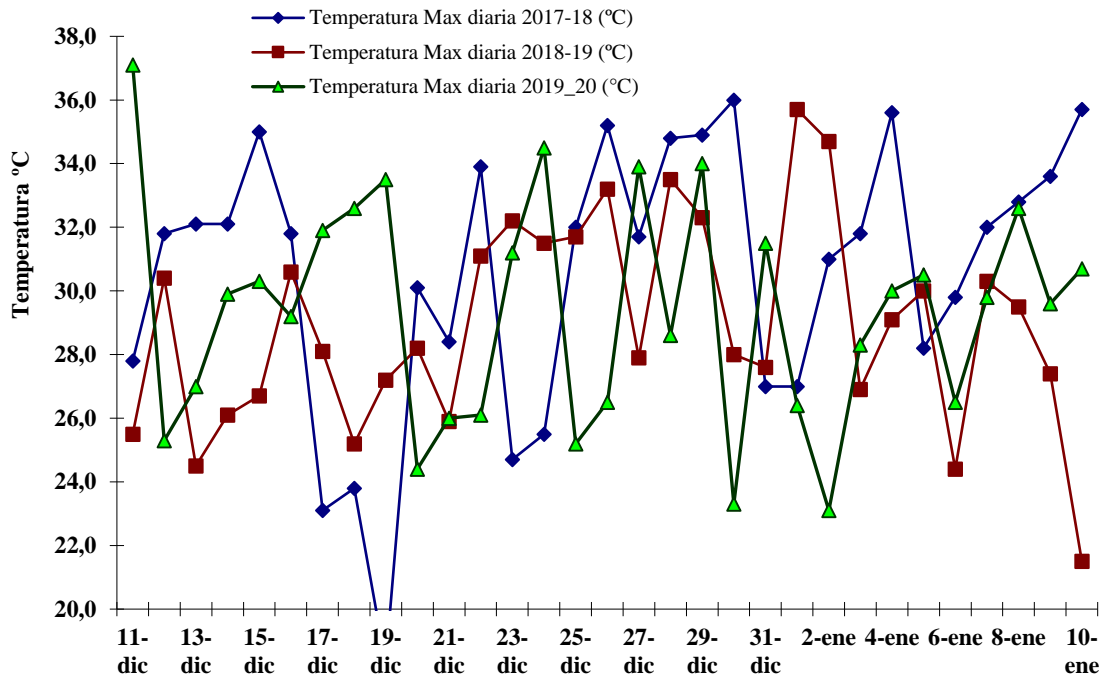


Figura 3: Temperaturas máximas diarias durante las campañas 2017/18, 2018/19 y 2019/20. Datos tomados de la estación meteorológica de la EEA INTA Pergamino, (Bs As).

B) Resultados de los experimentos.

b.1. Localidad de Pergamino.

En la Tabla 3 se presentan datos de observaciones tomadas durante el ciclo de cultivo, mientras que en la Figura 4 se ilustran los rendimientos de grano agrupados por tratamiento.

Tabla 3: Parámetros morfológicos y componentes de rendimiento: Materia seca en V5, Altura de plantas y de Inserción de espigas, intercepción de radiación en floración, Intensidad de verde determinado mediante Spad y NDVI por Green seeker, vigor, rendimiento y sus componentes numéricos: espigas m⁻² (NE), granos espiga⁻¹ (GE), número granos m⁻² (NG) y peso (PGx1000) de los granos. **Tratamientos de fertilización fosforada en Maíz.** INTA Pergamino, campaña 2019/20.

Tr	Descripción	MSeca V5 (g m ⁻²)	Altura planta (cm)	Altura inserción (cm)	Intercepción R1 (%)	Spad V6	Spad V10	
T1	Control	1235	194	84	80,3	49,3	40,1	
T2	MAP 100	2085	210	95	93,1	48,2	44,3	
T3	MPZ 30	2025	207	94	90,3	47,1	45,6	
T4	MPZ 40	2120	214	100	92,5	48,8	46,4	
T5	MPZ 30 + Bacterias	2365	210	99	94,1	48,4	46,5	
T6	MPZ 40 + Bacterias	2050	218	104	93,5	48,5	47,2	
T7	MAP 50 + MPZ 30	1850	205	102	93,8	47,9	43,9	
R² vs rendimiento		0,49	0,85	0,77	0,63	0,00	0,65	
Tr	Descripción	Vigor V9 (1-5)	Green seeker V9	NE	GE	NG	PGx1000	Rendim (kg ha ⁻¹)
T1	Control	3,0	0,54	8,6	405,1	3483,7	251	8744,0
T2	MAP 100	3,7	0,70	8,1	487,9	3968,0	255	10118,4
T3	MPZ 30	3,6	0,70	7,6	494,6	3758,6	248	9321,4
T4	MPZ 40	3,7	0,73	8,2	540,4	4430,9	245	10841,0
T5	MPZ 30 + Bacterias	3,8	0,74	7,9	509,1	4022,0	252	10135,4
T6	MPZ 40 + Bacterias	3,7	0,74	8,0	525,1	4201,1	259	10881,0
T7	MAP 50 + MPZ 30	3,8	0,73	8,5	471,4	4007,1	250	10017,9
R² vs rendimiento		0,56	0,66	0,04	0,77	0,94	0,04	
Sign. Est (P=)								<0,0005
CV (%)								5,7%

Índice de Vigor: 1 mínimo 5-máximo

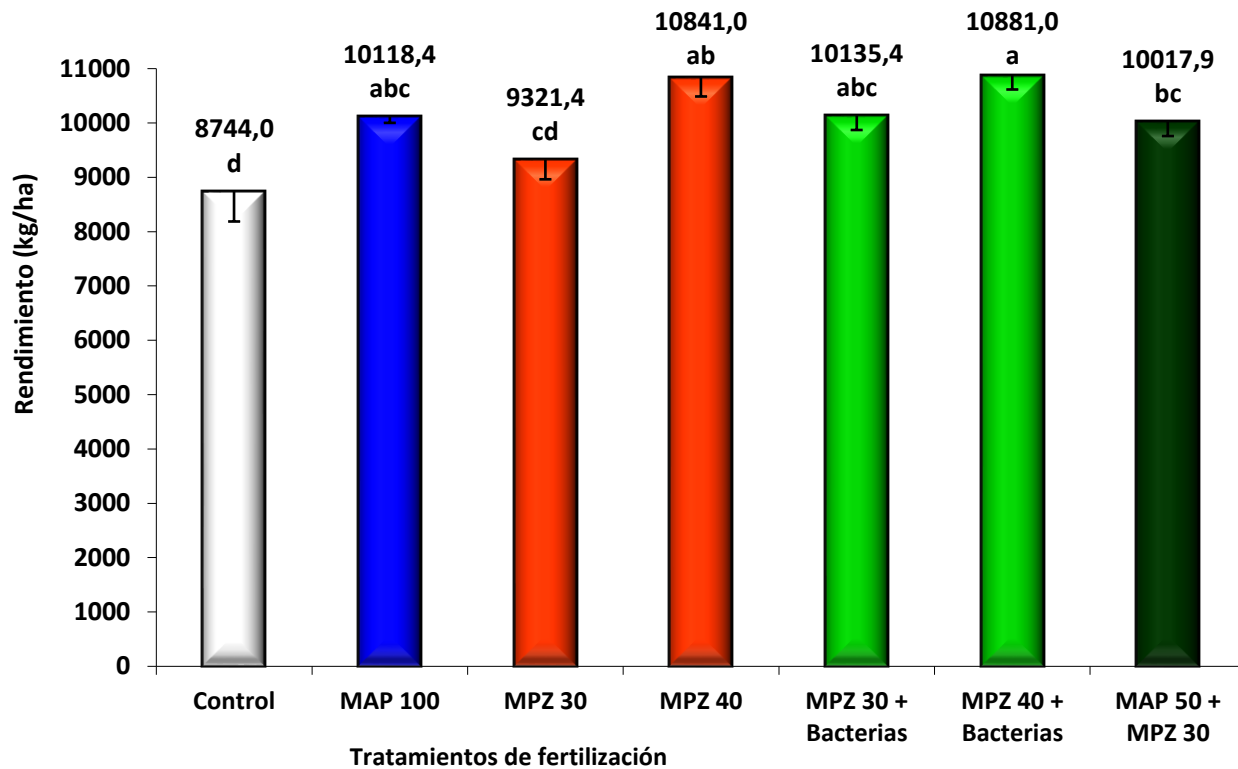


Figura 4: Rendimiento de maíz según estrategias de fertilización fosforada, con fuentes microgranuladas y bacterias. Pergamino, *maíz de siembra tradicional*, ciclo 2019/20. Letras diferentes sobre las columnas representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($LSD \alpha=0,05$; $dms=856 \text{ kg ha}^{-1}$). Las barras de error indican la desviación standard de la media.

b.2. Localidad de Wheelwright.

En la Tabla 4 se presentan datos de observaciones tomadas durante el ciclo de cultivo, mientras que en la Figura 5 se ilustran los rendimientos de grano agrupados por tratamiento.

Tabla 4: Parámetros morfológicos y componentes de rendimiento: Materia seca en V5, Altura de plantas y de Inserción de espigas, intercepción de radiación en floración, Intensidad de verde determinado mediante Spad y NDVI por Green seeker, vigor, rendimiento y sus componentes numéricos: espigas m^{-2} (NE), granos espiga $^{-1}$ (GE), número granos m^{-2} (NG) y peso (PGx1000) de los granos. **Tratamientos de fertilización fosforada en Maíz. Wheelwright, campaña 2019/20.**

Tr	Descripción	MSeca V5 (g m^{-2})	Altura planta (cm)	Altura inserción (cm)	Intercepción R1 (%)	Spad V6	Spad V10	
T1	Control	1945	200	87	83,3	49,5	44,0	
T2	MAP 100	2360	218	94	95,5	50,0	42,9	
T3	MPZ 30	2310	222	93	95,8	49,6	45,6	
T4	MPZ 40	2401	223	95	94,1	48,5	44,9	
T5	MPZ 30 + Bacterias	2400	223	92	94,3	48,9	45,8	
T6	MPZ 40 + Bacterias	2450	222	89	98,1	49,4	46,0	
T7	MAP 50 + MPZ 30	2300	221	95	95,6	48,4	45,9	
R² vs rendimiento		0,97	0,94	0,36	0,90	0,10	0,23	
Tr	Descripción	Vigor V9 (1-5)	Green seeker V9	NE	GE	NG	PGx1000	Rendim (kg ha^{-1})
T1	Control	3,0	0,49	8,3	325,9	2704,6	348	9412,0
T2	MAP 100	4,0	0,53	8,1	463,8	3757,1	347	13037,1
T3	MPZ 30	3,8	0,55	8,2	446,3	3659,3	351	12844,0
T4	MPZ 40	4,2	0,55	8,2	475,3	3897,4	350	13641,0
T5	MPZ 30 + Bacterias	4,2	0,57	8,3	472,5	3921,5	348	13646,8
T6	MPZ 40 + Bacterias	4,3	0,57	8,3	491,1	4076,0	346	14103,0
T7	MAP 50 + MPZ 30	4,3	0,55	8,1	468,3	3793,4	351	13314,8
R² vs rendimiento		0,95	0,87	0,06	0,99	0,99	0,00	
Sign. Est (P=)								
CV (%)								

Índice de Vigor: 1 mínimo 5-máximo

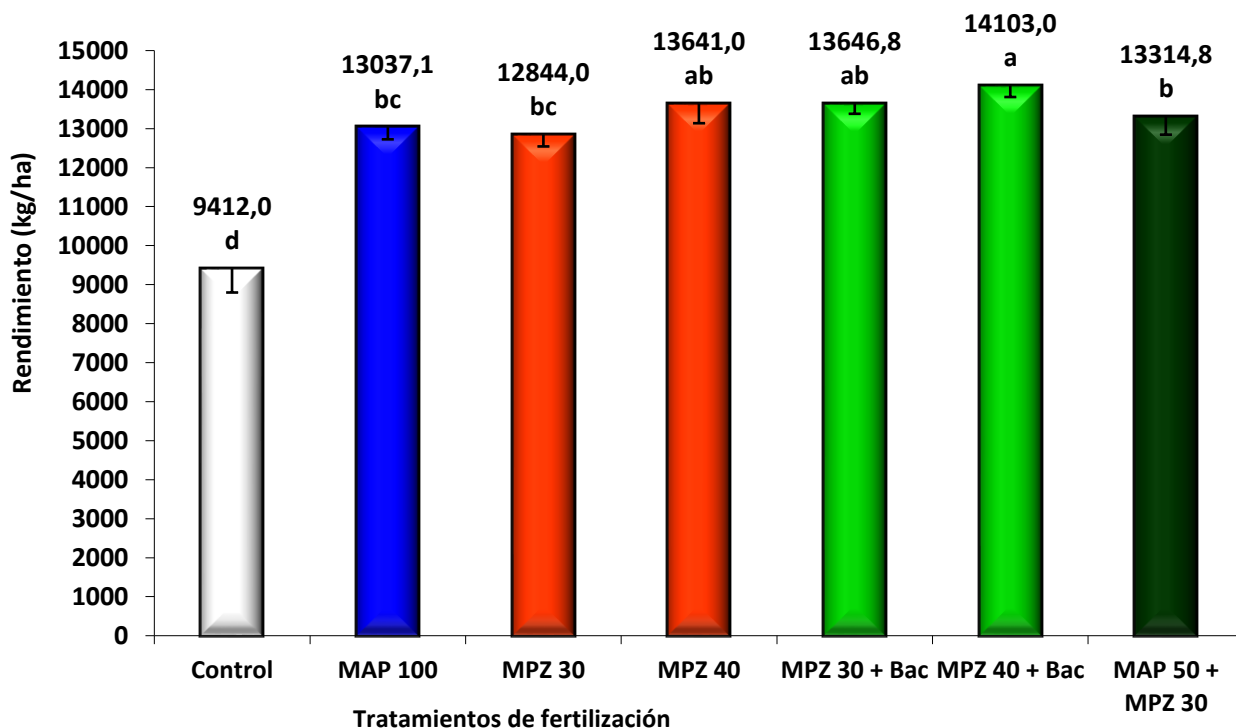


Figura 5: Rendimiento de maíz según estrategias de fertilización fosforada, con fuentes microgranuladas y bacterias. Wheelwright, maíz de siembra tradicional, ciclo 2019/20. Letras diferentes sobre las columnas representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($LSD \alpha=0,05$; $dms=712 \text{ kg ha}^{-1}$). Las barras de error indican la desviación standard de la media.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La campaña 2019/20 transcurrió ajustada en el aspecto hídrico, especialmente en la primera parte de su ciclo. Esto limitó la acumulación de biomasa, cobertura y vigor de las plantas (Tablas 3 y 4). Los rendimientos alcanzaron una media de 10008 kg ha^{-1} en Pergamino y 12857 kg ha^{-1} en Wheelwright, evidenciando un contraste ambiental: en el segundo caso se trató de un sitio plano, con suelos profundos y napa cercana a la zona de exploración radicular.

En **Pergamino**, el sitio muestra una fuerte limitación de nutrientes, determinando respuestas estadísticas a su aplicación ($P < 0,0005$, $cv=5,7 \%$). En las combinaciones con o sin bacterias se determinó efecto de dosis. La adición de bacterias fue más relevante en la dosis baja de Microstar PZ (Figura 5). El control fertilizado (T2, MAP) o combinado (T7) alcanzaron una productividad intermedia. El voleo anticipado (T7) aportó rendimiento frente a igual dosis sin fertilización previa (T3).

Por su parte, en **Wheelwright** los rendimientos se agruparon en un rango más estrecho, probablemente a causa de su localización sobre un suelo de mayor fertilidad (Tabla 2). La tendencia central mantiene lo registrado en la localidad de Pergamino, determinando efecto de dosis en Microstar PZ. Sin embargo, el aporte de las bacterias en este experimento fue superior (Tabla 4 y Figura 5). En ambos casos los mejores tratamientos con Microstar PZ lograron aventajar al control fertilizado (T2), sugiriendo un efecto de otros elementos como azufre (S) o zinc (Zn).

Entre las variables intermedias estudiadas, se observó un mayor efecto de la fertilización sobre el crecimiento, respecto de la acumulación de nitrógeno (N). Las más relevantes y robustas para explicar los rendimientos fueron acumulación de materia seca inicial, altura de planta, intercepción de radiación, NDVI por Green seeker, GE y NG (Tablas 3 y 4).

Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis 1, que sugiere un efecto positivo del uso de fuentes microgranuladas, a través de una nutrición balanceada y vigoroso crecimiento inicial bajo condiciones restrictivas. En este contexto, fue importante la dosis utilizada. La hipótesis 2 es aceptada parcialmente, puesto que la incorporación de bacterias mostró un efecto positivo, pero de mayor efecto en la dosis de 30 kg ha⁻¹.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Bernal, M. I. A., Paternessi, S. H., & Noellemeyer, E. J. (2018). Respuesta de maíz y soja a fuentes granuladas y líquidas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana. *Semiárida*, 27(1), 11-18.
- Codling, Eton 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*, 42:8, 891-899.
- Da Silva, A, Bruno, I.P.b, Franzini, V.I.c, Marcante, N.C.d, Benitez, L.d, Muraoka, T.d. 2016. Phosphorus uptake efficiency, root morphology and architecture in Brazilian wheat cultivars. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Volume 307, Issue 2, 1 February 2016, Pages 1055-1063.
- Degryse, F., B. Ajiboye, R.D. Armstrong, and M.J. McLaughlin. 2013. Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:2050–2059.
- Doydora, S., D. Hesterberg, and W. Klysubun. 2017. Phosphate Solubilization from Poorly Crystalline Iron and Aluminum Hydroxides by AVAIL Copolymer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81:20-28. doi:10.2136/sssaj2016.08.0247.
- Heydari, M. M., Brook, R. M., & Jones, D. L. (2019). The role of phosphorus sources on root diameter, root length and root dry matter of barley (*Hordeum vulgare L.*). *Journal of plant nutrition*, 42(1), 1-15.
- Hnatowich, Garry Lawrence, et al. "Methods and compositions for increasing the amounts of phosphorus available for plant uptake from soils." U.S. Patent Application No. 16/004,575.
- Hopkins, B.G. 2015. Phosphorus. In: A.V. Barker and D.J. Pilbeam, editors, *Handbook of plant nutrition*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 65–126.
- Kabiri, S., Andelkovic, I. B., da Silva, R. C., Degryse, F., Baird, R., Tavakkoli, E., ... & McLaughlin, M. J. (2020). Engineered Phosphate Fertilizers with Dual-Release Properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(13), 5512-5524.
- McBeath, T. M., McLaughlin, M. J., Armstrong, R. D., Bell, M., Bolland, M. D. A., Conyers, M. K., ... & Mason, S. D. (2007). Predicting the response of wheat (*Triticum aestivum L.*) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils. *Soil Research*, 45(6), 448-458.
- McLaughlin, M. J. (2019). The future of phosphorus use in agriculture. *Better Crops with Plant Food*, 103(1), 57-58.
- McLaughlin, M. J., Degryse, J. L. E., Baird, R. J., Da Silva, R. C., Baylor, B. T., & Peacock, L. A. (2020). U.S. Patent Application No. 16/674,165.
- Nicchio, B., Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., Arrieta, R. G., do Nascimento, I. R., & Santos, G. A. (2019). Fuentes alternativas de fósforo en suelos del "cerrado" cultivados con maíz (*Zea mays*). *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 24(1).
- Pierzynski, J., & Hettiarachchi, G. M. (2020). Reactions of Phosphorus Fertilizers with and without a Fertilizer Enhancer in Three Acidic Soils with High Phosphorus;# 8208; Fixing Capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 82(5); 09, 2018).
- Summerhays, J.S., V.D. Jolley, M.W. Hill, and B.G. Hopkins. 2017. Enhanced phosphorus fertilizers (Carbond P and Avail) supplied to maize in hydroponics. *J. Plant Nutr.* 40:2889–2897.
- Ul-Allah, S., Ijaz, M., Nawaz, A., Sattar, A., Sher, A., Naeem, M., ... & Mahmood, K. (2020). Potassium Application Improves Grain Yield and Alleviates Drought Susceptibility in Diverse Maize Hybrids. *Plants*, 9(1), 75.
- Zou, C., Deng, Y., Teng, W., Tong, Y., & Chen, X. (2018). Phosphorus efficiency mechanisms of two wheat cultivars as affected by a range of phosphorus levels in the field. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1614.