

Efecto de la fertilización multinutriente en maíz bajo riego

6-3-2026



AUTOR: SENSINI, GIULIANO

DOCENTE TUTOR: MG. KIESSLING ROBERTO J.

DOCENTES CONSEJEROS: DRA. CHIMENO, PATRICIA

DR. PRESOTTO, ALEJANDRO



Contenido

Agradecimientos	2
Introducción:	3
Origen y actualidad	3
Contexto Regional: El Sudoeste Bonaerense y el VBRC	4
El riego y su eficiencia en el Valle Bonaerense del Río Colorado (VBRC)	5
Caracterización Climática de la Región (Valle Bonaerense del Río Colorado)	8
Características del cultivo y fases fenológicas	8
Requerimiento nutricionales del cultivo de Maíz	10
Hipotesis	21
Objetivos	21
Materiales y métodos	22
Sitio de estudio:	22
Primer factor a ensayar: Fósforo (P)	24
Segundo y tercer factor: Nitrógeno (N) y Zinc (Zn)	24
Manejo del Cultivo	26
Variables Determinadas	27
Análisis Estadístico	29
Resultados y discusión	29
Rendimiento en Grano	31
Peso de mil granos (P1000)	35
Peso hectolítrico de los granos (PH)	36
Humedad del grano (H°)	37
Eficiencia Agronómica del Nitrógeno	37
Conclusiones	41
Referencias	42



Agradecimientos

En primer lugar agradecerle a mis padres, Cristian y Valeria por brindarme la oportunidad de poder estudiar, el acompañamiento y la confianza desde el día uno. Así como también inculcarme los valores de responsabilidad, compromiso y dedicación desde chico.

A mi hermana, Fiorella, que desde siempre me acompañó en todo momento y siempre pude contar con ella.

A toda mi familia, mis abuelos, tíos, primos, con algunos compartí parte de mi estadía en Bahía e hicieron que esta etapa como estudiante sea muy llevadera.

A mi novia, Manuela, que en especial en esta última etapa, me acompañó, haciendo todos y cada uno de los momentos mejores, ayudandome a ponerle voluntad y encarar con la mejor energía cada situación, empujandome a sacar todo adelante.

A mis amigos, los que me acompañan desde muy chico y que siempre puedo contar con ellos, y los que me dio esta etapa por la Universidad, sin los cuales definitivamente no hubiera sido posible ponerle tanto empeño durante largos fin de semanas, feriados, domingos, madrugadas y noches.

A la Universidad Nacional del Sur, en particular a los docentes de Departamento de Agronomía, que me compartieron sus conocimientos y me brindaron una excelente formación académica.

A mi Tutor, Roberto por dedicarme tu tiempo, compartir charlas y conocimientos sin dudarlos. A Patricia y Alejandro, por su tiempo y empeño en responder cada duda y por sus ganas de enseñar.

A todos los que fueron parte de este camino en cualquier momento y de cualquier manera, gracias.

Introducción:

Origen y actualidad

El maíz (*Zea mays* L.) es una especie de la familia Poaceae con sus orígenes en América Central, el origen del maíz está profundamente ligado a la domesticación en esta región y a la construcción de una cosmovisión cultural que lo convirtió en el eje de la vida y la identidad de sus pueblos, otras teorías señalan que el teosinte es el antecesor silvestre y/o un allegado al maíz que ha participado del origen del maíz cultivado. Ampliamente distribuido a nivel mundial por su composición media (figura 1) tanto para alimentación animal como humana en forma de harinas, jarabes, glucosa, colorantes, almidón, gluten meal, aceites, etc. También en los últimos años en el ámbito de los biocombustibles, se implementó su utilización para la producción de etanol llegando hasta 1,6 tn en promedio en los últimos 5 años en Argentina (D'Angelo & Calzada, 2025).

Composición media del grano de maíz		
Componentes	Promedio	Rango típico (%)
Almidón	71,3	64-78
Proteínas	9,91	8-14
Lípidos	4,45	3,1-5,7
Fibra	2,66	1,8-3,5
Ceniza	1,42	1,1-3,9

Figura 1. Composición media del grano de maíz fuente ministerio de agricultura, ganadería y pesca de Argentina.

El maíz es la gramínea de mayor producción mundial, alcanzando en la campaña 23/24 más de 1200 millones de t de grano (USDA, 2026). . En este periodo Argentina se encuentra en el 5to del ranking de producción a nivel mundial con un 4% de la misma (50 millones de toneladas) por debajo de la Unión Europea, Brasil, China y Estados Unidos (figura 2) (USDA, 2026).

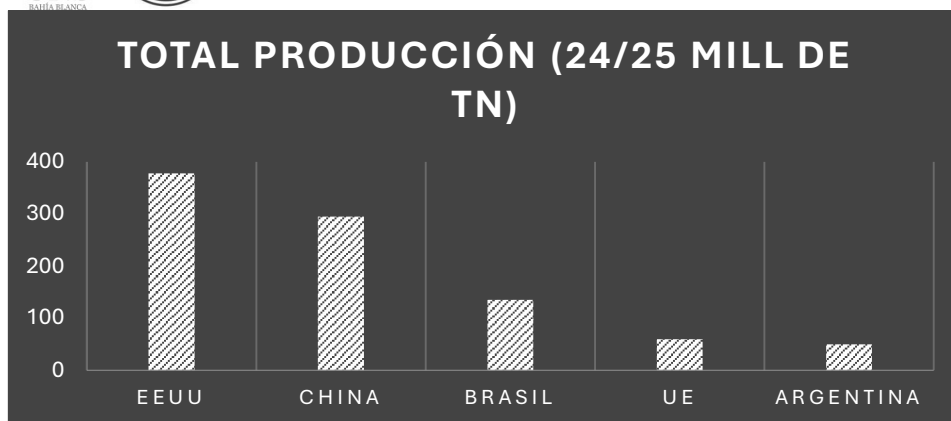


Figura 2 en base a datos de USDA.

La adaptabilidad de dicho cultivo permite que se siembre en más de 168 países de todos los continentes. En Argentina este cultivo se encuentra en el segundo lugar de importancia de exportaciones. Las regiones productoras más importantes a nivel nacional son el norte de la provincia de Buenos Aires, centro y sur de las provincias de Córdoba y Santa Fe y centro de Entre Ríos, aunque parte de la producción del cereal ha sido desplazada hacia otras regiones.

Contexto Regional: El Sudoeste Bonaerense y el VBRC

La región del Sudoeste de la provincia de Buenos Aires presenta características edafoclimáticas que la diferencian de la Zona Núcleo pampeana. Es una región semiárida, donde la variabilidad de las precipitaciones suele limitar la expresión del rendimiento en cultivos de secano. En este escenario, el Puerto de Bahía Blanca juega un rol logístico estratégico, ofreciendo una salida directa a la exportación que mejora la competitividad del cultivo por menores costos de flete (Bolsa de cereales y productos de Bahía Blanca, 2021).

El Valle Bonaerense del Río Colorado (VBRC) representa un agroecosistema distintivo. Gracias a la disponibilidad de agua para riego gestionada por la Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado (CORFO), esta zona se desacopla de la dependencia exclusiva de las lluvias. Poco más de medio millón de hectáreas están circunscriptas entre los canales matrices hacia ambas márgenes del río. Anualmente, en forma alternativa o reincidente, con la

infraestructura de canales de riego y drenajes (sin revestimiento), a cielo abierto, se irrigan en forma casi excluyente por métodos de riego gravitacionales (CORFO, 2025).

El VBRC cuenta con campos de secano y de riego, los suelos son predominantemente arenosos, por lo que la retención del agua es baja. Aplicando agua en forma complementaria, cuando se trata de cultivos de alto consumo, permite el crecimiento de una gran variedad de especies, tanto cereales como oleaginosas, así como también cultivos hortícolas y gran cantidad de pasturas. También hay depresiones donde se producen importantes concentraciones de sal (Appezatto, 2014)

El riego y su eficiencia en el Valle Bonaerense del Río Colorado (VBRC)

Las eficiencias de riego por gravedad en la zona, divididas en captación, operación, conducción y aplicación indican que las pérdidas por ineficiencia de la red primaria son del orden del 15%, igual que en la secundaria y terciaria, finalmente con niveles de pérdida en la aplicación del 50%. Dado que las eficiencias parciales se multiplican entre sí, la eficiencia global del sistema alcanza valores cercanos al 36%. En promedio entre cultivos hortícolas, cereales, producciones de semilla y pasturas en la zona se aplican 1400 mm/ha/año hidrológico (Lema, 2016).

El VBRC constituye la mayor área de riego integral de la provincia de Buenos Aires y una de las más relevantes del país. La administración del recurso hídrico está a cargo de CORFO, es el ente que gestiona la red primaria de riego (figura 3) mientras que la secundaria y terciaria está en manos de los productores organizados en consorcios de riego (Consorcio Hidráulico del Valle Bonaerense del Río Colorado). Estas organizaciones administran una concesión de riego para aproximadamente 137.600 ha empadronadas, aunque la superficie efectivamente regada oscila anualmente entre las 70.000 y 90.000 ha, dependiendo de la disponibilidad hídrica en la cuenca y las decisiones de siembra de los productores, a pesar de que la superficie que circunscriben los canales matrices es de 530.000 hectáreas (Lema, 2016).

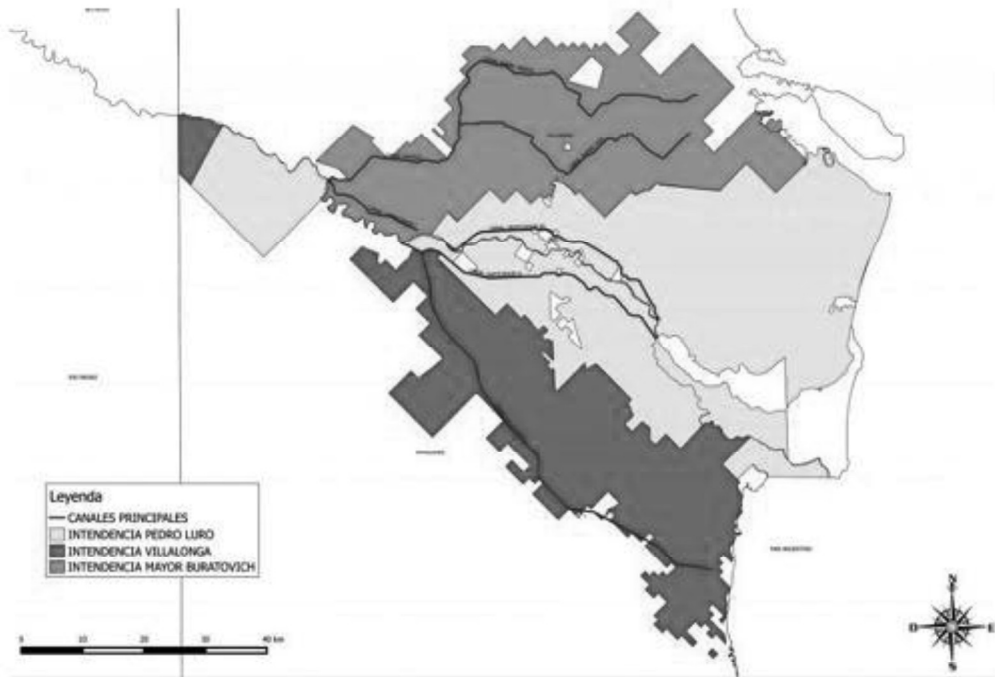


Figura 3. Canales principales e intendencias del VBRC (Salonio, 2008).

El sistema de distribución es predominantemente gravitacional. El agua proveniente del Río Colorado, es regulada aguas arriba por el embalse "Casa de Piedra" quien por decisión de CORFO eroga el caudal necesario para la zona (figura 4).

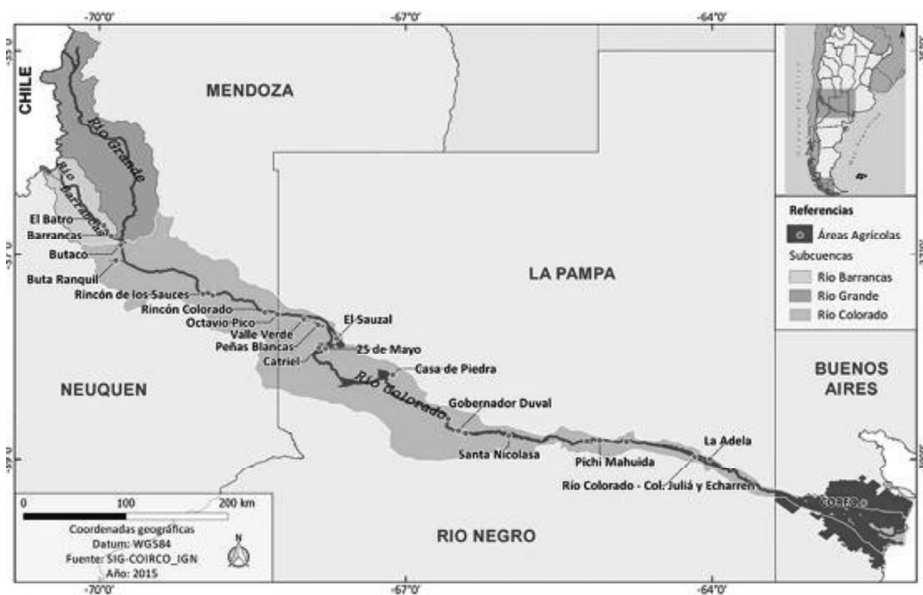


Figura 4. Ubicación del dique Casa de Piedra, la zona de CORFO y otros puntos de interés (COIRCO, 2019).

La zona cuenta con campos mixtos de secano y de riego; sus suelos son predominantemente arenosos lo cual permite el adecuado crecimiento de una amplia variedad de cultivos que incluyen cereales y oleaginosas, como: trigo, maíz, girasol, sorgo, etc. (Figura 5). En la actualidad se destaca el maíz, que se utiliza mayormente para cosecha de grano y ensilado de planta entera, dados los altos rendimientos obtenidos debido a la incidencia del riego. También se destaca la producción de cultivos hortícolas (Figura 6), siendo de gran importancia el cultivo de cebolla en esta región, así como de pasturas de alfalfa y trébol (Cordisco et al., 2019)

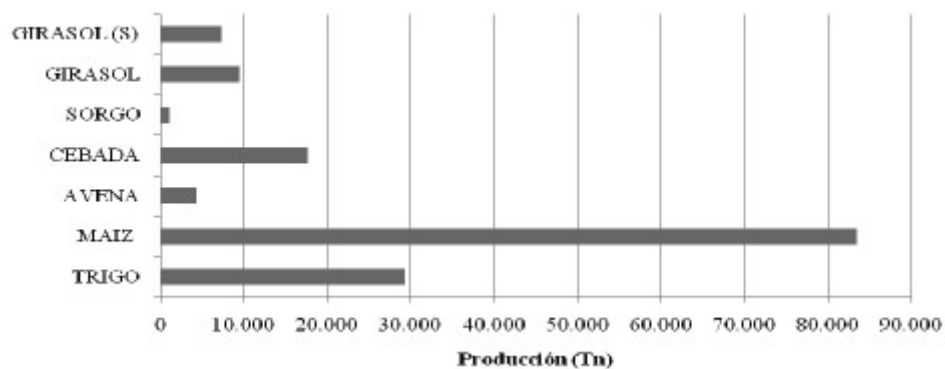


Figura 5. Producciones extensivas en el VBRC (Cordisco et al., 2019). Ref: S: semilla.

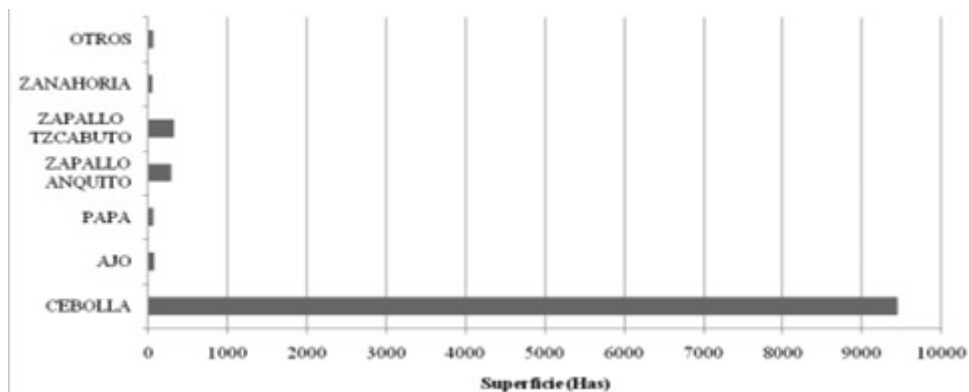


Figura 6. Producciones intensivas en el VBRC (Cordisco et al., 2019).

A pesar del avance de tecnologías presurizadas (pivote central o goteo), se estima que el 98% de la superficie de maíz en el VBRC se riega mediante métodos gravitacionales (surco o melga) (Lema, 2016).

Caracterización Climática de la Región (Valle Bonaerense del Río Colorado)

La región en estudio es semiárida, comprendida entre las isohietas de 350 mm y 500 mm anuales decreciendo en dirección E-NE a S-SO. La estación experimental Hilario Ascasubi del INTA ha caracterizado el clima de esta región de acuerdo a los siguientes parámetros. En cuanto al régimen térmico, la localidad presenta una marcada estacionalidad y amplitud térmica, típica de la continentalidad. La temperatura media anual histórica es de 15,1°C. En cuanto a temperaturas extremas, los meses de enero y febrero registran las temperaturas máximas medias rondando los 30°C, favoreciendo la tasa de crecimiento del cultivo, aunque con riesgo de estrés térmico, principalmente si no se asegura la disponibilidad hídrica. Las temperaturas mínimas medias invernales descienden por debajo de los 3°C en los meses de junio y julio, determinando un período libre de heladas que se extiende, en promedio, desde el 28 de septiembre hasta el 7 de mayo en abrigo a 1,5 m y desde el 6 de noviembre hasta el 20 de marzo si tomamos en cuenta las heladas a 0,05m del suelo (Zura y Vanzolini, 2025). Con respecto a las precipitaciones, el régimen pluviométrico tiene una precipitación promedio anual de 441,9 mm y una evapotranspiración potencial (ETP) media de 1728,8 mm anuales (Zura & Vanzolini, 2025). Si comparamos estos dos parámetros, el déficit hídrico estructural alcanza valores de 1200 a 1300 mm anuales. Esto confirma la obligatoriedad del riego complementario para la producción de cultivos estivales de alto rendimiento como el maíz.

Características del cultivo y fases fenológicas

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta C4 con una alta tasa de actividad fotosintética, teniendo el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día. Fue el primer cereal sometido a rápidas e importantes transformaciones tecnológicas en su forma de cultivo, tal como ha sucedido con la aparición de los híbridos (Paliwal, 2001). El éxito en los avances tecnológicos del cultivo de maíz estimuló una revolución agrícola generalizada en muchas partes del mundo (Paliwal, 2001).

Según la escala elaborada por Ritchie y Hanway (1982) hay diferentes fases fenológicas donde podemos separar las vegetativas y las reproductivas (figura 7).

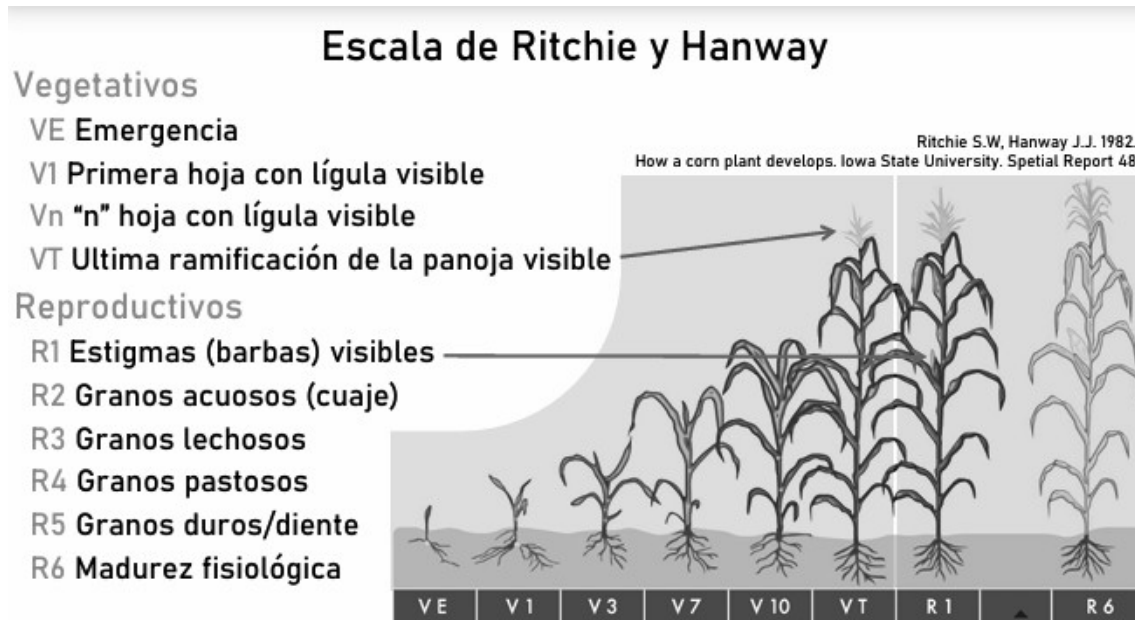


Figura 7: Escala de fenológica del cultivo de maíz (basada en Ritchie y Hanway , 1982). Catedra de Producción Vegetal Extensiva.

El rendimiento del cultivo de maíz es el resultado de la interacción entre el genotipo y el ambiente, modulada por el manejo agronómico. Fisiológicamente, el rendimiento en grano puede expresarse como el producto entre la biomasa total producida y la proporción de esta que se destina a los órganos reproductivos, conocida como Índice de Cosecha (IC) (Andrade, Neiff, & Andrade, 2023). En el período de cuatro semanas centrado en la floración femenina el cultivo de maíz es particularmente sensible a cualquier estrés de crecimiento en cuanto al número final de granos logrados (Hall y col., 1981; Fischer y Palmer, 1984; Kiniry y Ritchie, 1985). Durante dicho período ocurre el crecimiento activo de la espiga, la aparición de los estigmas (barbas) y el comienzo del llenado del grano (Otegui y Bonhomme, 1998). Durante la primera mitad del período crítico previa a la aparición de los estigmas queda determinado el número de espigas por planta capaces de granar, mientras que en la segunda mitad se determina el número de granos fijados por espiga granada. Cualquier limitante hídrica o nutricional que reduzca la tasa de crecimiento del cultivo durante el PC afectará el número de los granos, provocando el aborto de los

misimos, especialmente en la porción apical de la espiga (Cantarero, Luque., & Rubiolo, 2000). En el VBRC, el riego disminuye el riesgo de que la tasa de crecimiento caiga por falta de agua, dejando a la nutrición como una variable primordial de ajuste para maximizar el número de granos.

Como mencionamos anteriormente, la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante el PC explica la variación en el número de granos. En el VBRC la heliofanía efectiva (horas de luz solar directa sin interferencia de nubes) es superior a la registrada en zonas de alta producción como el centro-norte de Buenos Aires (Fernández, 2020). En ensayos locales en INTA Hilario Ascasubi bajo sistemas de riego por goteo (mayor eficiencia) se obtuvieron rendimientos potenciales de $18.000 \text{ kg ha}^{-1}$, demostrando el potencial de la zona optimizando el uso de los recursos (Varela, 2017).

Requerimiento nutricionales del cultivo de Maíz

El nitrógeno (N) es el nutriente que con mayor frecuencia limita la producción de maíz en la región pampeana Argentina (RP), producto de los altos requerimientos y por la disminución en los contenidos de materia orgánica (MO) de los suelos (Sainz Rozas, Echeverría, & Angelini, 2011).

La acumulación de nitrógeno en el cultivo de maíz no ocurre de manera lineal a lo largo del tiempo, sino que sigue un patrón sigmoideo estrechamente acoplado a la producción de materia seca (figura 8). Comprender esta dinámica es fundamental para sincronizar la oferta de fertilizante con la demanda del cultivo (Bender, Haegerle, Ruffo, & Below, 2013).

Durante los primeros estadios (VE a V6), la absorción es relativamente lenta, acumulándose menos del 10% del total requerido. Sin embargo, a partir del estadio de V6 y hasta la Floración (R1), el cultivo entra en su etapa de máxima tasa de crecimiento. Durante este período, la demanda de nitrógeno es exponencial. Al llegar al estadio de floración (R1), el maíz ya ha absorbido entre el 60% y el 70% del nitrógeno total que acumulará en todo su ciclo. Esto implica que la planta debe disponer de una alta oferta de N en la solución del suelo antes

de emitir la panoja para construir la estructura vegetativa que sostendrá el rendimiento (Bender, et al., 2013).

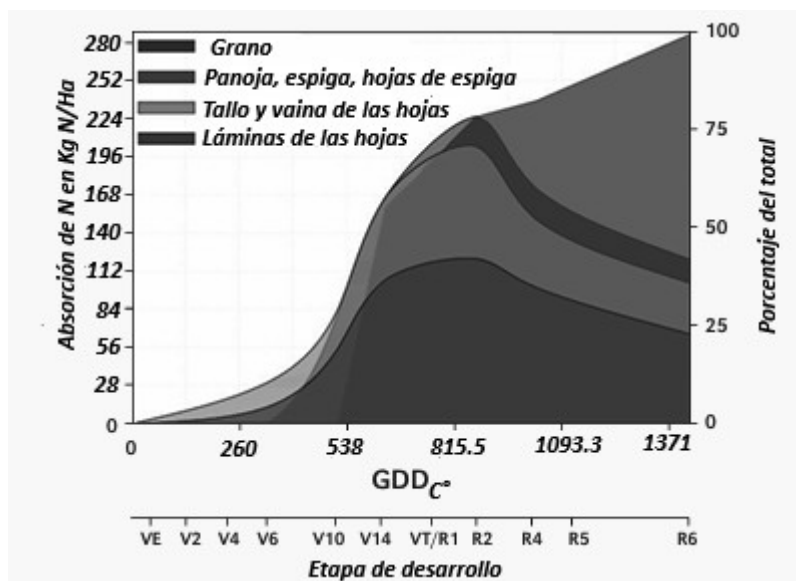


Figura 8: Absorción de N del maíz y partición en los distintos órganos de la planta. Adaptado desde (Bender, Haegele, Ruffo, & Below, 2013).

Según información extraída de la cátedra de Fertilización en cultivos de granos y forrajes, el uso del N en la planta es importante para la síntesis de clorofila, por lo tanto, teniendo en cuenta que la molécula de clorofila está involucrada en el proceso de fotosíntesis, la carencia de N determina que la planta utilice de manera menos eficiente la luz solar como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis y funciones esenciales como la absorción de nutrientes. También es un componente de las vitaminas y los sistemas de energía de la planta y un componente esencial de los aminoácidos, los cuales forman proteínas, por lo tanto, el N es directamente responsable del incremento del contenido de proteínas.

La misma fuente destaca que las plantas de maíz absorben el N principalmente en forma de nitrato (NO_3^-) o como amonio (NH_4^+). Dada la alta movilidad del nitrato en la solución del suelo, el mecanismo principal de absorción es el flujo masal.

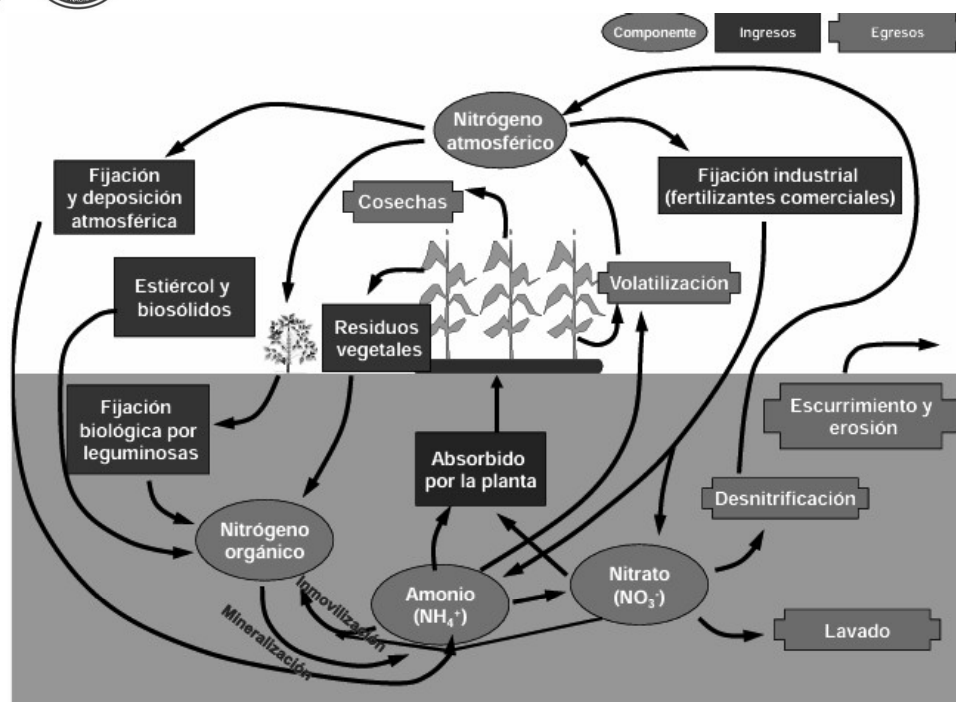
Si este nutriente fuera limitante en la planta, esta presentaría una serie de características particulares como hojas cloróticas (amarillamiento) debido a la presencia de cantidades reducidas de clorofila. El amarillamiento se inicia en

hojas más viejas y luego se traslada a las hojas más jóvenes, a medida que la deficiencia se torna más severa. Además podemos encontrarnos con semillas y partes vegetativas de la planta con bajo contenido de proteínas, menos hojas y maduración prematura (Cátedra de Fertilización en cultivos de granos y forrajes, 2025).

El ciclo del nitrógeno (figura 9) evidencia los diferentes componentes, ingresos y egresos del sistema, sin embargo, la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en la zona depende mayormente del manejo de las vías de pérdida del ciclo del N debido a la composición textural de los suelos y al sistema de riego principalmente.

Principales vías de pérdida de N en ambientes bajo riego del VBRC:

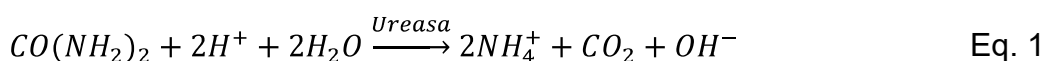
- **Lixiviación:** Es el principal riesgo en suelos de texturas francas-arenosas a arenosas-francas bajo riego por gravedad. El movimiento descendente del agua, si no se controla adecuadamente la lámina aplicada, arrastra los nitratos por debajo de la zona de exploración radical, además produce la contaminación de las napas.
- **Desnitrificación:** En el riego por gravedad (por surco o manto), pueden generarse condiciones temporales de anoxia (saturación) en el perfil. En ausencia de oxígeno, bacterias anaeróbicas reducen el nitrato a óxidos nitrosos o nitrógeno elemental, perdiéndose a la atmósfera. Esto es algo importante si la nivelación del lote no es adecuada.
- **Cosechas:** Los rendimientos elevados asociados a la disponibilidad de agua hacen que la extracción de nutrientes en las cosechas sea un importante egreso de N.
- **Volatilización:** Debido a las condiciones ambientales de la zona tal como bajas precipitaciones y alta heliofanía, la incorporación de nitrógeno cuando no es posible regar es un desafío. Principalmente, como se va a mencionar más adelante, fertilizando con urea como fuente principal de N.



Ciclo del nitrógeno (IPNI, International Plant Nutrition Institute, 2007)

Urea como fuente nitrogenada:

La urea es un fertilizante con una composición del 46% de N, siendo la más utilizada a nivel mundial principalmente por su alta concentración, su disponibilidad en el mercado y su bajo costo de producción (Otto et.al., 2018)¹. Su principal desventaja es que cuando es aplicada en la superficie del suelo se pierde vía volatilización una parte como amoníaco (NH_3), esto depende de la temperatura del aire y el suelo (Tasca et.al., 2011)¹, la humedad del suelo (Zheng et.al., 2018)¹ y los residuos en la superficie del suelo (Dick, 1984)¹. Como se muestra en la ecuación 1 la urea se hidroliza con la enzima ureasa y como en este proceso consume H^+ incrementa el pH cerca de los gránulos de fertilizante, cambiando el balance entre el ion amonio (NH_4^+) y la molécula de amoníaco, esta última rápidamente perdida en la atmósfera debido a su composición gaseosa (eq. 2) (Rochette et.al., 2009)¹.



¹ Desde (Cassim, y otros, 2024)

Con esta información podemos ver también que desde la aplicación de la urea hasta que esta esté disponible para las plantas en forma de amonio principalmente puede pasar un tiempo que es dependiente de muchas condiciones, por lo tanto, debemos realizar la aplicación con anticipación a la necesidad máxima del maíz e incluir en los cálculos pérdidas por volatilización y lavado principalmente, como así también desnitrificación.

Dinámica del Fósforo (P) en el Suelo: Fijación, Disponibilidad y Requerimientos

La disponibilidad de fósforo (P), además de depender de las entradas y salidas de su ciclo, también está muy comandada por diversos equilibrios físico-químicos. Una pequeña parte de todo el fósforo que tiene el suelo se encuentra disponible para ser tomado por las plantas. Se sabe que la capacidad del suelo para proveer P es muy variable en el tiempo y el espacio como se puede apreciar en la figura 10, depende mucho de la zona y el sitio en particular de muestreo, debido a que solo parte del total se encuentra disponible para las plantas. En la zona pampeana los contenidos de P total en el suelo son altos y variables pero solo una fracción de eso está disponible como fósforo extraíble (PE) para las plantas (Martínez & Suñer, 2024).

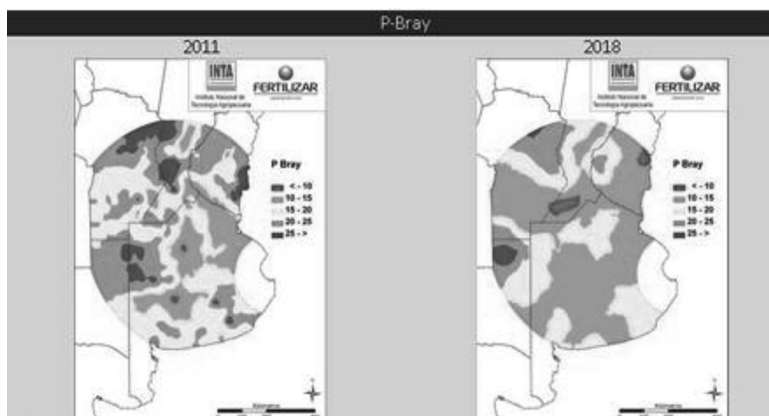


Figura 10. Distribución de los niveles de P-Bray del horizonte superficial (0-20cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018. Extraído de (Sainz Rozas., 2019)

El pH del suelo es determinante en la disponibilidad del fósforo y el valor del mismo nos indicará en qué proporción y a que ion estará unido el fósforo. De esta manera se evidencia la disponibilidad del nutriente para las plantas, por

ejemplo, si se encuentra unido a los iones (Fe, Al y Ca) se utiliza el término “precipitado” y por ende disminuye su disponibilidad. El rango de pH donde el fósforo tiene mayor disponibilidad es entre 6 y 7 (Darwich, 2005)² (figura 11)

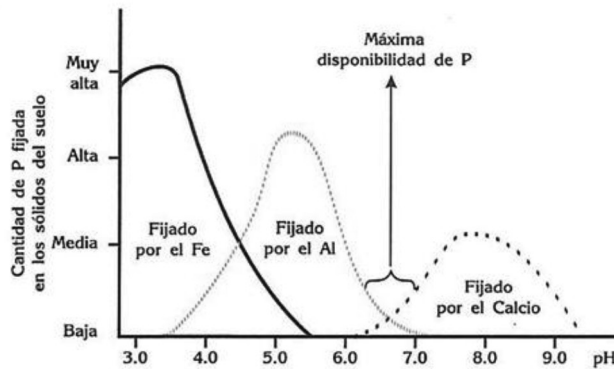


Figura 11: Relación entre pH del suelo, la fijación y disponibilidad de los iones fosfatos para las plantas (Darwich, 2005).

Como se puede observar en la figura 12, la disponibilidad de fósforo en la zona estaría afectada por el pH rondando valores alrededor de 6,5 y 7,5. Aunque más adelante se analizará el caso particular de este estudio.

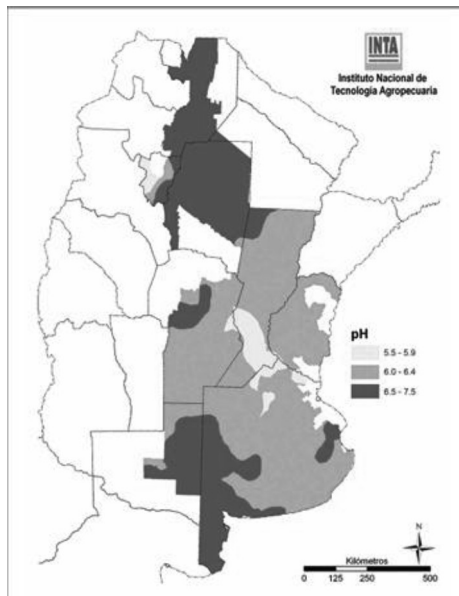


Figura 12. Rango valores de mediana de pH del horizonte superficial (0-20cm) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana, relevamiento 2004-2006 (Sainz Rozas et al., 2011).

² Desde (Fernandez, 2021).

Para evaluar la disponibilidad de P, el método de extracción estándar en Argentina es el Bray-Kurtz 1 (P-Bray). Si bien existen discusiones sobre la idoneidad de este extractante ácido en suelos calcáreos (donde podría sobreestimar el P disponible al solubilizar fosfatos de calcio que la planta no puede tomar), sigue siendo el indicador calibrado de referencia regional. La calibración para el método Olsen, que es el adecuado para suelos de pH superior a 7,5, no está disponible (Cátedra de Fertilización en cultivo de granos y forrajes, 2025).

Según las redes de ensayos de fertilización en la región pampeana y bibliografía internacional, el nivel crítico o umbral de respuesta para maíz se sitúa en el rango de 10 a 16 ppm (mg/kg) de P-Bray (figura 13). Por debajo de este umbral: La probabilidad de respuesta económica a la fertilización es alta (Cátedra de Fertilización en cultivo de granos y forrajes, 2025).

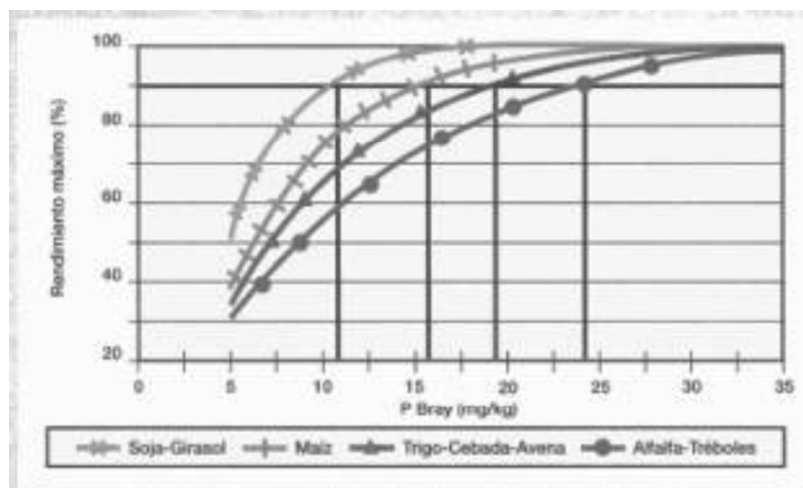


Figura 13. Calibración del método P-Bray para 8 cultivos según bibliografía internacional desde cátedra de Fertilización en cultivos de granos y forrajes, 2025.

La deficiencia de este nutriente se evidencia principalmente en las hojas como un color púrpura (figura 14) en las más viejas, el P es móvil en la planta y en suelos con baja disponibilidad se mueve fácilmente dentro de la misma. También puede evidenciarse con un crecimiento lento del maíz y plantas pequeñas (Cátedra de Fertilización en cultivo de granos y forrajes, 2025).

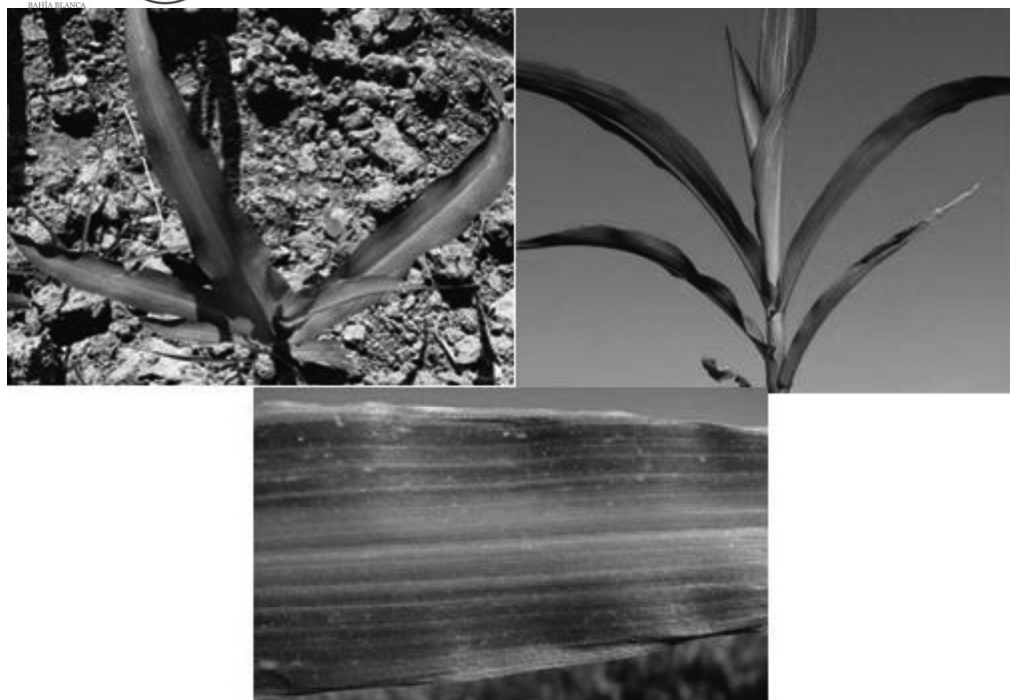


Figura 14. Deficiencia de fósforo en hojas, coloración morada en hojas y necrosis a lo largo de los márgenes (Sharma & Kumar, 2017).

El Zinc (Zn) como micronutriente limitante en maíces de alto potencial

Si bien el Zinc es un micronutriente y las cantidades necesarias en comparación al N o al P son menores, con las nuevas variedades de maíz, la acumulación de residuos en la superficie del suelo con el desarrollo de la siembra directa y la aplicación de una cantidad importante de nutrientes hace que se altere el balance de los ciclos biológicos, químicos y geológicos que se manifiesta como nuevos equilibrios edáficos. Debido a esto, el Zn está considerado en muchas áreas del mundo como el tercer nutriente limitante para el maíz (Ratto & Miguez, 2007). Como se puede observar en la información de la figura 15, el nivel de zinc en el suelo viene disminuyendo a medida que pasan los años debido a la prolongada historia agrícola, lo que indicaría una probabilidad de repuesta mayor a la aplicación del nutriente (Sainz Rozas, 2019).

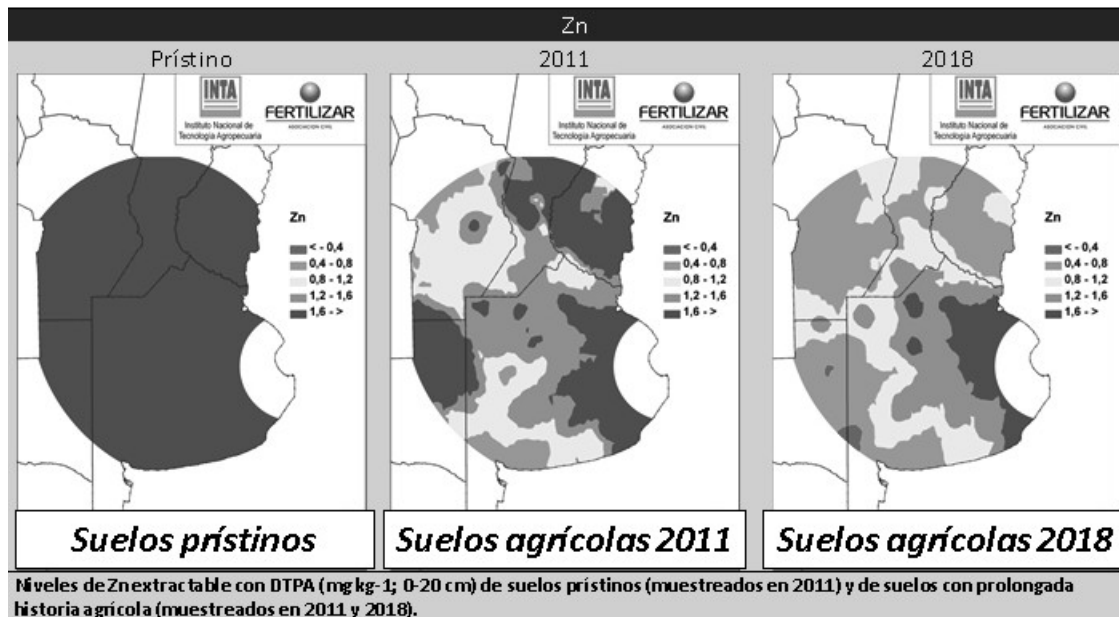


Figura 15. Niveles de Zn extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20cm) de suelos prístinos y suelos con prolongada historia agrícola (Sainz Rozas, 2019).

El Zn participa en la planta en muchos procesos metabólicos, interviene en la síntesis de auxinas y tiene gran afinidad para formar complejos con N, oxígeno (O) y azufre (S) en funciones catalíticas y estructurales de reacciones enzimáticas (Ratto & Miguez, 2007).

La deficiencia de Zn en maíz se ve más habitualmente en las primeras etapas vegetativas, se manifiesta como fajas de color amarillento entre nervaduras de la lámina foliar (figura 16). Los síntomas generalmente aparecen en la segunda o tercer semana del ciclo y se caracterizan por su corta duración. Pueden durar hasta por dos semanas, para luego desaparecer por completo, salvo en situaciones particulares de siembra directa o lotes de suelos arenosos que se pueden llegar a ver los síntomas hasta floración (Ratto & Miguez, 2007).



Figura 16. Foto del amarillamiento intervenal en las hojas más desarrolladas de un cultivo de maíz de tres semanas cultivado bajo siembra directa (Ratto & Miguez, 2007).

Algunos estudios señalan que en situaciones de media-alta demanda (maíces de alto rendimiento), la aplicación de Zinc en estadios vegetativos tempranos (V2-V4) logra corregir deficiencias, mejorando la producción de biomasa y, consecuentemente, el rendimiento en grano (figura 17), (Espósito et al., 2010).

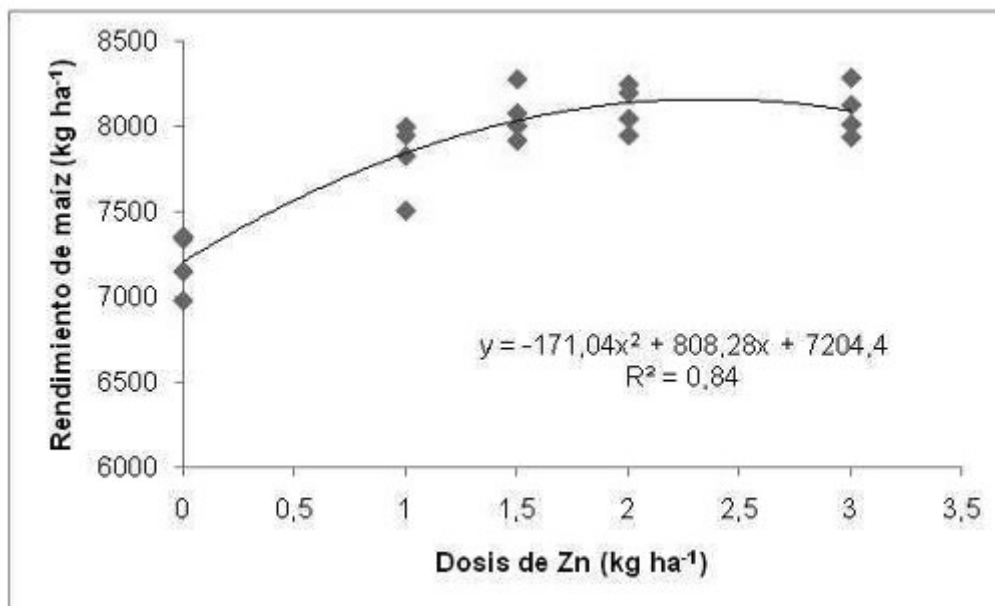
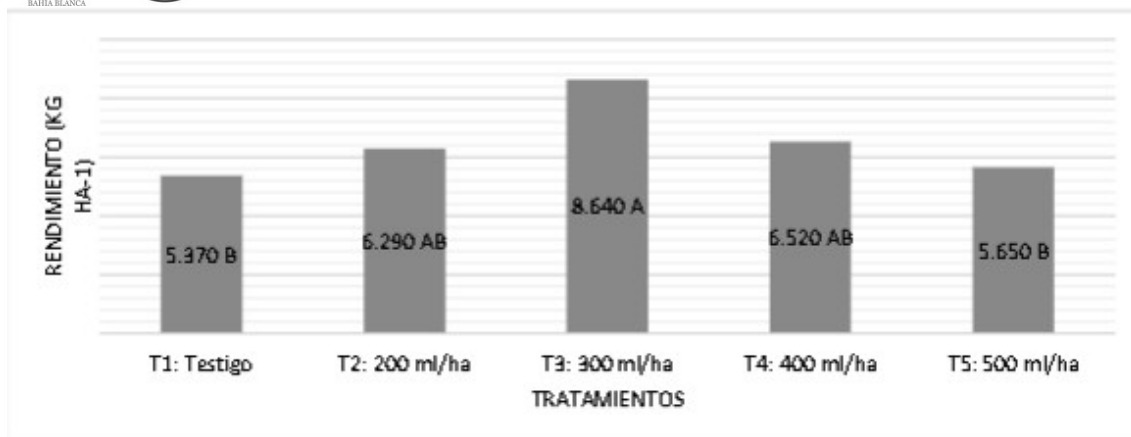


Figura 17. Rendimiento de maíz según dosis de Zn aplicado al suelo en V2 al oeste de Río Cuarto (Córdoba) (Espósito, Balboa, Castillo, & Balboa, 2010).

Aunque también se menciona la posibilidad de un efecto tóxico a altas dosis (figura 18) (Ramírez Dávalos et al., 2023).



* Letras iguales no existe diferencia significativa al 5%.

Figura 18. Rendimiento de maíz en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de fertilizante foliar de zinc (Ramírez Dávalos, y otros, 2023).

Como se mencionó anteriormente con el fósforo, la disponibilidad de Zinc también es afectada con el pH del suelo (figura 19). Cuando el suelo tiene un pH cercano a la neutralidad o alcalino (como la zona de estudio) la abundancia de iones OH^- produce la precipitación de compuestos insolubles de zinc $[\text{Zn}(\text{OH})_2]$, y de esta manera el micronutriente se vuelve no disponible para su absorción por las raíces de las plantas (Osorio, 2012).

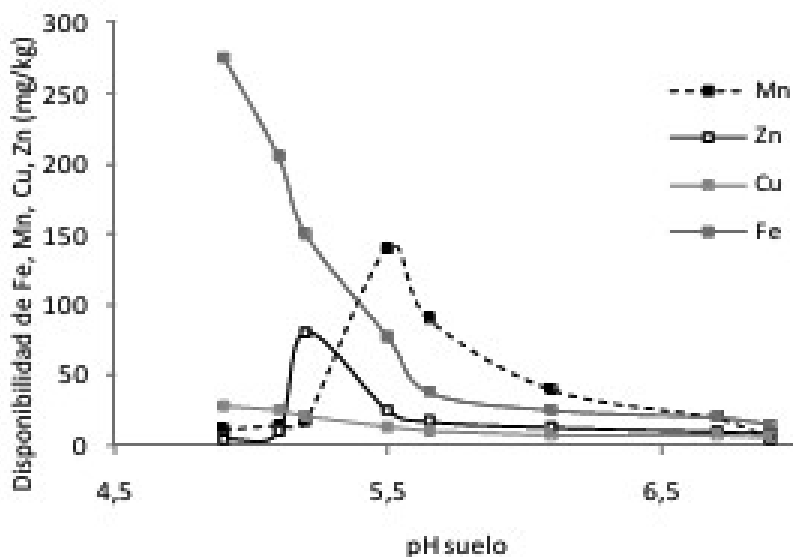


Figura 19. Efecto del pH sobre la disponibilidad de algunos micronutrientes (Osorio, 2012).

Investigaciones locales han calibrado los niveles críticos para el diagnóstico de Zn mediante el extractante DTPA (dietilentriamina-pentaacético). Mediante ensayos en la región pampeana y extrapampeana (provincias de Buenos Aires, Santa Fé, Córdoba, Entre Ríos, San Luis y Chaco) se determinó una probabilidad de respuesta a análisis de suelo Zn-DTPA entre 0,5 y 1,3 mg/kg y esta respuesta no se relacionó con el rendimiento máximo de cada sitio. Esto último sugiere que la mejora de rendimiento podría ser por el incremento del crecimiento del sistema radicular y su capacidad de exploración (Barbieri, y otros, 2015).

Planteado el potencial agroecológico del VBRC para producir maíz, estudiar el manejo nutricional en este ambiente es crítico, ya que, al disminuir la limitante hídrica, la nutrición pasa a ser uno de los factores determinantes más importantes para cerrar la brecha entre el rendimiento alcanzable y el potencial genético del híbrido.

Hipotesis

Los maíces de alto potencial de rendimiento del VBRC deberían responder productivamente al agregado de nutrientes altamente demandados como el nitrógeno, fósforo y zinc.

Objetivos

- 1) Evaluar el impacto productivo y económico de la fertilización nitrogenada, tratando de alcanzar una dosis de saturación.
- 2) Determinar el grado de respuesta a la aplicación de fertilizante fosforado en un suelo de textura gruesa y deficiente en P del VBRC.
- 3) Explorar el impacto de la fertilización foliar con un micronutriente como el zinc, en la producción del maíz.

Materiales y métodos

Sitio de estudio:

El área de estudio se encuentra ubicada en el partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. A una distancia de 11 km de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Hilario Ascasubi y a 5 km de la Colonia San Adolfo ubicada en la Ruta Nacional 3 km 794 (figura 20). Pertenece al área de riego del Valle Bonaerense del Río Colorado. Las coordenadas de la parcela de estudio son 39°25'09.1"S 62°33'02.0"W.



Figura 20. Imagen satelital tomada de Google Earth. Fecha de imagen: enero del 2024.

El suelo del lote experimental presenta una textura franco arenosa. Previo a la siembra, se realizó un muestreo de suelo compuesto para determinar las propiedades físico-químicas iniciales y la oferta nutricional base. Los resultados del análisis de laboratorio se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Análisis de suelo inicial presiembra.*

Determinación	Profundidad (cm)	Valor
Materia Orgánica (%)	0 - 20	2,29
Conductividad eléctrica (dS/m)	0 - 20	1,77

Determinación	Profundidad (cm)	Valor
Fósforo extractable (ppm)	0 - 20	12,1
pH	0 - 20	8,0
Zinc (ppm)	0 - 20	3,9
Nitrógeno anaeróbico (Nan) (ppm)	0 - 20	25.2
Nitrógeno de amonio (N-NH ₄) (ppm)	0 - 60	16,6
Nitrógeno de nitratos (N-NO ₃) (ppm)	0 - 60	14,1

Las condiciones meteorológicas durante el ciclo del cultivo se registraron a través de la estación meteorológica automática de la EEA INTA Hilario Ascasubi, ubicada en proximidad al sitio experimental.

La siembra del maíz se realizó con una sembradora Erca H.70 de 10 surcos a 70 cm de distancia entre hileras y un tractor John Deere 6.115J, el 26 de Noviembre de 2024. El híbrido utilizado fue el BMH Piumassimo, un híbrido con aptitud de cosecha de grano, sembrado a la densidad sugerida de 70 mil plantas ha⁻¹ (figura 21).



Figura 21. Equipo de siembra realizando una siembra en otro sector del campo.

Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA). El ensayo contó con tres (3) bloques. En cada bloque se estableció un nivel diferente de fertilización fosfatada de base, y dentro de cada uno de ellos se aleatorizaron seis (6) combinaciones de fertilización nitrogenada y con zinc, con 2 repeticiones, totalizando 36 parcelas.

Primer factor a ensayar: Fósforo (P)

Se aplicó fertilizante fosfatado a la siembra en la línea, utilizando Fosfato Monoamónico (MAP, 11-52-0).

- B1: 0 kg MAP ha⁻¹ (Testigo absoluto de P).
- B2: 90 kg MAP ha⁻¹
- B3: 160 kg MAP ha⁻¹

Segundo y tercer factor: Nitrógeno (N) y Zinc (Zn)

La fertilización nitrogenada se realizó con Urea (46-0-0) aplicada al voleo en estadio V4, después de haber realizado un riego por gravedad, una vez que se detuvo el agua, antes de la absorción de la misma por el suelo (figura 22 y 23).



Figura 22 (izq) aplicación de urea al voleo. Figura 23 (derecha) estado del suelo al momento de la aplicación.

Las dosis de N y Zn utilizados en el segundo factor ensayado, se detallan a continuación:

- T1 (Testigo): 0 kg N ha⁻¹.
- T2: 75 kg N ha⁻¹(aprox. 163 kg Urea ha⁻¹).
- T3: 150 kg N ha⁻¹ (aprox. 326 kg Urea ha⁻¹).
- T4: 300 kg N ha⁻¹ (aprox. 652 kg Urea ha⁻¹).
- T5: 150 kg N ha⁻¹ + 1 L Yara Vita Zintrac ha⁻¹.
- T6: 300 kg N ha⁻¹+ 1 L Yara Vita Zintrac ha⁻¹.

Cada unidad experimental (UE) fue de 17,5 m² de superficie (5 surcos x 5 metros de longitud), distanciados a 0,70 m entre hileras (figura 24).



Figura 24. Imagen de las parcelas experimentales delimitadas.

La fertilización con Zinc se realizó vía foliar utilizando una formulación comercial (Yara Vita Zintrac) a dosis de 1 L ha⁻¹ en el mismo estadio fenológico (figura 25 y 26). Para la calibración de la mochila pulverizadora se utilizó un envase medidor especial para mochilas. Se realizó una simulación de velocidad y caudal del operario y en base a esto se calculó la cantidad de litros por hectárea aplicados (figura 27 y 28).



Figura 25 (izq): Aplicación de Zinc. Figura 26 (der): Planta luego de la aplicación.



Figura 27 y 28: Regulación de la mochila.

Manejo del Cultivo

- Antecesor: El cultivo se implantó sobre un rastrojo de Avena-Vicia (*Avena sativa* - *Vicia villosa*) cuyo destino fue la confección de rollos, generando una extracción total de la biomasa aérea generada.

- **Material Genético y Siembra:** Se utilizó un híbrido comercial de la empresa BMH. La siembra se realizó el 25 de noviembre de 2024. La densidad de siembra utilizada fue de 75.000 semillas ha^{-1} (figura 29), lográndose un estand promedio final a cosecha de 68.000 plantas ha^{-1} a nivel de lote.
- **Manejo Sanitario y control de malezas:** El control de malezas se realizó mediante un barbecho químico presiembra, con Glifosato. En post-emergencia (V4), se aplicó una mezcla de Glifosato + 2,4-D para el control de malezas latifoliadas y gramíneas. No se registraron incidencias significativas de plagas o enfermedades.
- **Riego:** El cultivo se condujo bajo riego gravitacional (sistema de surcos con sifones). Se realizaron un total de cuatro riegos suplementarios a lo largo del ciclo.



Figura 29. Imagen del monitor de siembra indicando una densidad parcial de 76,4 mil semillas ha^{-1} .

Variables Determinadas

La cosecha se realizó de forma manual el día 20 de junio de 2025. Se recolectaron las espigas presentes en 2,1 m^2 (1,5m lineales de los dos surcos centrales) de cada parcela, para descartar las borduras en orden de evitar el efecto de competencia diferencial (Figura 30)

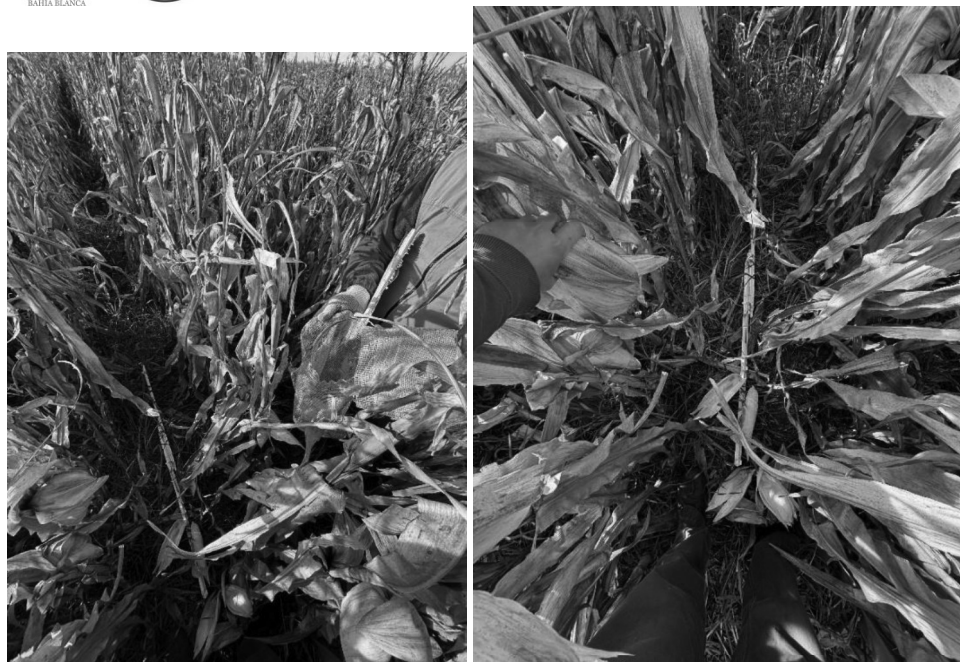


Figura 30. Momento de la cosecha.

Posteriormente, el material fue procesado en laboratorio, utilizando una desgranadora manual (figura 31), un humidímetro digital (figura 32) y balanza para determinar las siguientes variables: Rendimiento en grano (kg ha^{-1}) ajustado a humedad comercial base del 14,5%. Peso de 1000 granos (g). Peso Hectolítrico (kg hL^{-1}) y humedad del grano (%).



Figura 32 (izq): Humidímetro John Deere utilizado. Figura 31 (der): desgranadora de espigas.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) utilizando el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). Para la comparación de medias de los tratamientos y la evaluación de interacciones, se utilizó la prueba de LSD de Fisher con un nivel de significancia de 0,05.

Resultados y discusión

Condiciones meteorológicas durante la Campaña 2024/2025

En la Tabla 2 se detallan las variables meteorológicas registradas durante el ciclo del cultivo (noviembre 2024 - abril 2025) por la estación meteorológica automática de INTA Hilario Ascasubi.

Tabla 2. Resumen agrometeorológico del ciclo del cultivo.

Mes	Temp. Media del aire (°C)	Temp.Máx. Absoluta del aire (°C)	Temp. Min absoluta 0,05m (°C)	Precipitaciones (mm)	Total ETP ¹ . Thornthwaite
Noviembre	19,4	33,3	-0,1	38,7	96,2
Diciembre	19,8	34,3	10	29,7	107,1
Enero	24,0	37,8	3,2	9,0	97,5
Febrero	23,0	37,8	2,7	47,7	76,4
Marzo	19,4	34,3	1,9	89,5	86,0
Abril	14,2	24,4	-1,1	62,1	43,2
Mayo	12,0	24,2	-7,7	10,5	31,9
Junio	7,8	20,3	-8,9	4,0	14,2
TOTAL CICLO				291,2	629

1. Evapotranspiración potencial.

Durante el ciclo del cultivo, las precipitaciones acumularon un total de 290 mm, lo cual representó menos de la mitad de la demanda evapotranspirativa del cultivo, siendo el resto cubierto mediante los cuatro riegos gravitacionales

aplicados. Se destacaron picos de temperatura en los meses de enero y febrero que coincidieron con la floración, periodo crítico del cultivo.

Consideraciones sobre el Desarrollo del Cultivo

Durante el ciclo del cultivo se observó una marcada heterogeneidad fenotípica atribuible a la calidad de la semilla del híbrido (BMH), registrándose problemas de emergencia (figura 33) y presencia de plantas con alteraciones morfológicas y una alta susceptibilidad a patógenos (figura 34). Esta variabilidad intra-parcela elevó el coeficiente de variación experimental y explica algunas incongruencias. Al evaluar el impacto, se observó que la densidad promedio (54500 pl ha^{-1}) fue un 22% inferior al objetivo de 70000 pl ha^{-1} , con un coeficiente de variación del 23% en las 36 parcelas.



Figura 33 (izq): Vista de parcelas con espacios sin plantas emergidas. Figura 34 (der): Espiga de pequeño tamaño y con alta infestación de patógenos.

El análisis de la varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos contempló que el primer factor ensayado (Fertilización fosfatada) sea evaluado como bloque, y de esa manera ver una posible interacción con los tratamientos dispuestos dentro de ellos (Fertilización con N y Zn – Segundo Factor). El ANOVA no detectó ninguna interacción entre factores para las variables evaluadas. Es por ello que en adelante se compararán las distintas dosis de P utilizando el promedio de los tratamientos de N y Zn, como así también, para comparar los distintos

tratamientos se podrán unificar los datos obtenidos como promedio de las dosis de P.

Rendimiento en Grano

El rendimiento en grano se vio afectado por la dosis de N, creciendo con el aumento de la misma (Figura 35). Aunque estadísticamente sólo se diferenciaron los tratamientos extremos (0 N y 300 N), se observó una tendencia consistente en el aumento del rendimiento, a medida que las dosis de fertilizante nitrogenado aumentaron. La disponibilidad de N inorgánico inicial, medida como nitrato y amonio en los 0-60 cm de profundidad, arrojó valores altos en los análisis presiembra, superando los 210 kg de N ha⁻¹. Dicho valor es considerado alto, teniendo en cuenta los requerimientos del maíz, que oscilan entre 18 y 22 Kg N t⁻¹ de grano (IPNI, Echeverría et al., 2014). Esta respuesta a la fertilización, a pesar de la alta reserva en el suelo, pone en evidencia las significativas pérdidas de nitrógeno que ocurren en estos sistemas productivos.

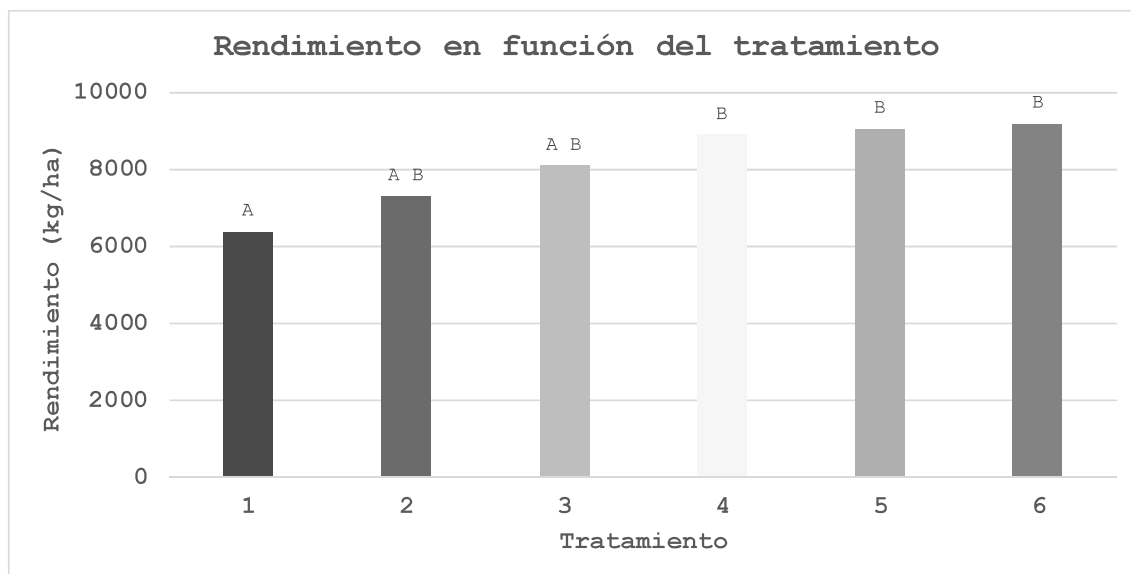


Figura 35: Rendimiento de maíz en función de los distintos tratamientos de fertilización con N y Zn.

Al evaluar el impacto de la fertilización fosfatada (Figura 36), no se hallaron diferencias significativas en el rendimiento del maíz, aunque se destaca la tendencia a un aumento en el rendimiento por el agregado de éste nutriente. El diagnóstico inicial había arrojado un valor de fósforo disponible de $12,1 \text{ mg kg}^{-1}$, considerado bajo para la textura franco arenosa de estos suelos. Por otra parte, los inconvenientes sufridos en el establecimiento del ensayo (fallas en poder germinativo y variabilidad espacial en la distribución de plantas) aumentaron la variación de datos dentro de cada tratamiento, con implicancias en los análisis estadísticos que buscan evaluar la diferencia entre tratamientos (Figura 37).

A pesar de la falta de significancia estadística en el rendimiento final, durante los estadios vegetativos tempranos (V3 a V5) se observaron síntomas visuales compatibles con deficiencia de fósforo en las parcelas del tratamiento testigo (P0). Las plantas presentaron una coloración violácea característica en los márgenes de las hojas basales (figura 38).

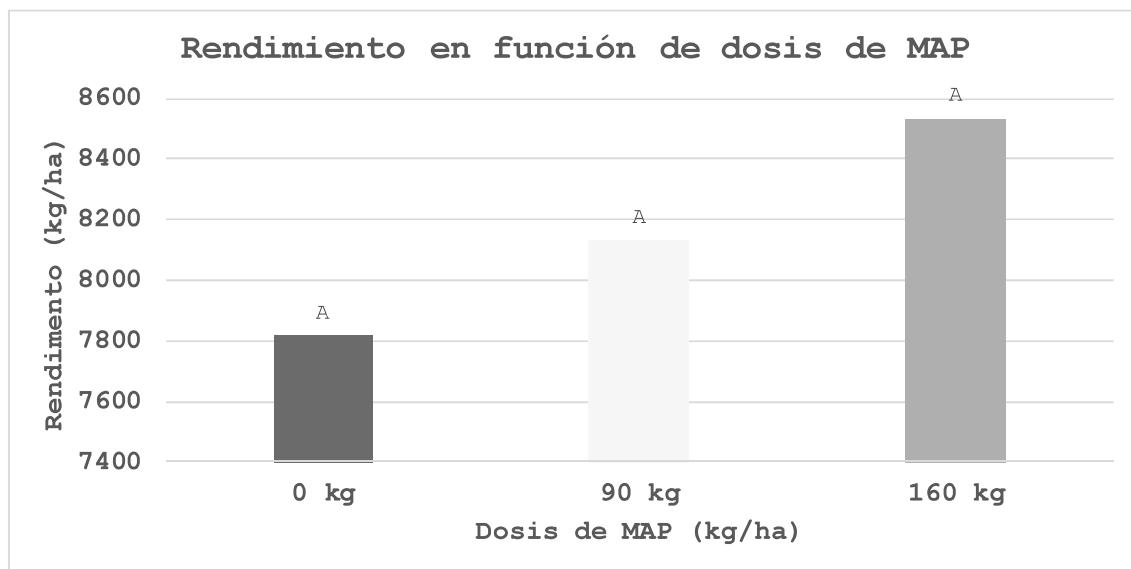


Figura 36: Rendimiento de maíz en función de los distintos tratamientos de fertilización con P.

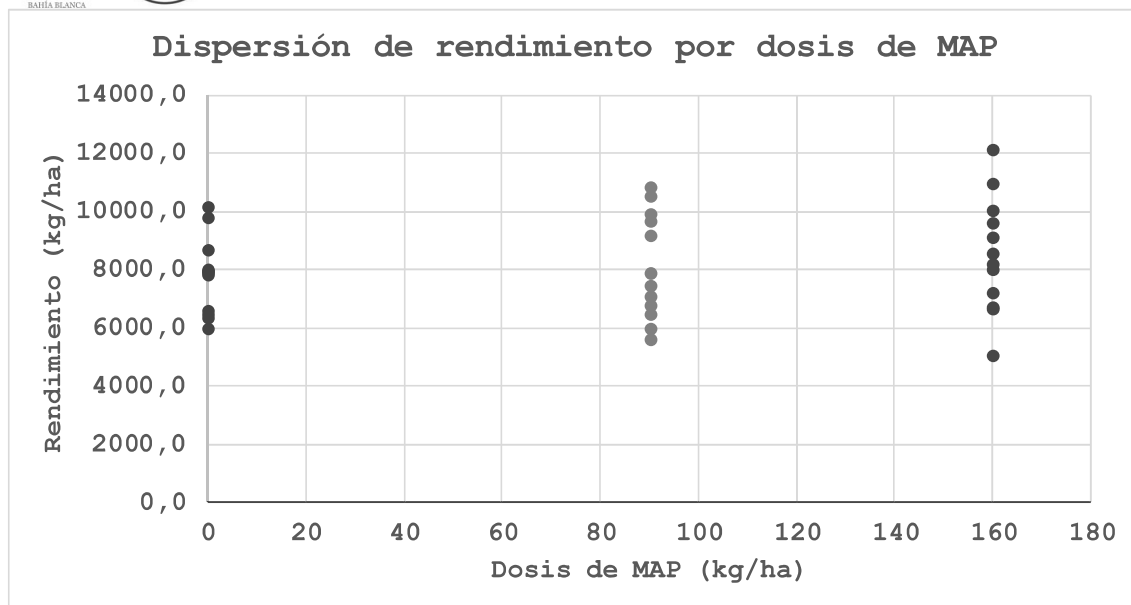


Figura 37: Variabilidad de resultados para cada dosis de P ensayada.



Figura 38. Coloración violácea en hojas en las parcelas con menos dosis.

La respuesta productiva a la fertilización con Zn tampoco evidenció resultados contundentes. En principio, el diagnóstico en la disponibilidad de este micronutriente arrojó valores sorprendentemente elevados ($3,9 \text{ mg kg}^{-1}$

utilizando DTPA como extractante), comparados con los umbrales que presuponen deficiencias por debajo de 1 mg kg^{-1} y de valores regionales que fluctúan entre $0,6$ a $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$. Si comparamos los tratamientos 3 (150 N) y 5 ($150 \text{ N} + \text{Zn}$), por ejemplo, en promedio hubo una respuesta de 840 kg ha^{-1} (8100 vs 9060 kg ha^{-1}) aunque dichos valores no alcanzan a ser estadísticamente diferentes, a causa de la dispersión de los rendimientos.

Fitotoxicidad y Estrategia de Aplicación:

La fitopatología es la disciplina que estudia las causas y el desarrollo de enfermedades de las plantas. Comprende el estudio de agentes patógenos tales como hongos, pseudohongos, virus, bacterias, micoplasmas, protozoarios, plantas parásitas, nemátodos y condiciones ambientales adversas tales como temperatura, luz, agua y exceso o deficiencia de nutrientes que ocasionan enfermedades (Agrios, 2005). “*Enfermedades Fisiogénicas*” se denominan a aquellas que son producidas por condiciones adversas del ambiente, también llamadas enfermedades abióticas. Para las condiciones de este ensayo se observaron síntomas en plantas sometidas a altas dosis de N (300 N)(Figura 39) en días posteriores a la fertilización. Con el desarrollo de nuevas hojas las plantas se recuperaron, aunque las hojas dañadas mantuvieron los síntomas (necrosis en bordes) hasta el final del ciclo. En los tratamientos con menores dosis (0 a 150 N) no se vieron estos síntomas, lo que supone una ventaja de fraccionar la dosis a aplicar.



Figura 39 necrosis en el borde de las hojas posterior a la aplicación de urea al voleo.

Sobre los granos recolectados durante la trilla, se evaluó el impacto de los tratamientos sobre algunos parámetros de calidad de los mismos como el peso de los mismos (P1000), el peso hectolítrico (PH) y la humedad (H°).

Peso de mil granos (P1000)

Como se observa en la Figura 40, el aumento en la dosis de N, favoreció el crecimiento y llenado de los granos y consecuentemente su peso, de manera muy significativa ($p < 0.001$). Se ha reportado la importancia de la nutrición nitrogenada en el tamaño y peso de los granos (Uhart y Andrade, 1995). La deficiencia de N afecta la determinación del número de células endospermáticas y gránulos de almidón en posfloración temprana, y disminuye la fuente de asimilados durante el período de llenado, debido a la menor tasa fotosintética y duración del área foliar.

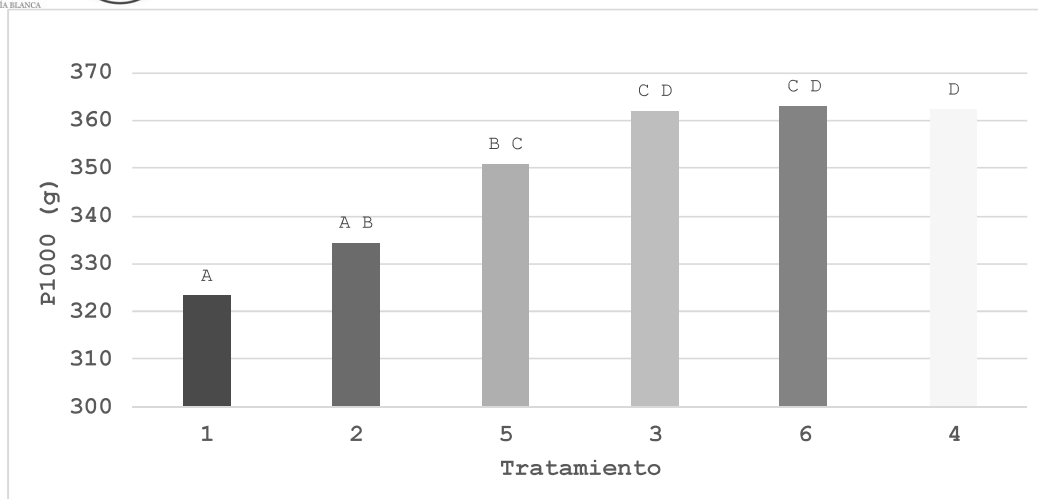


Figura 40: Efecto de los distintos tratamientos ensayados sobre el peso de los granos de maíz

Peso hectolítrico de los granos (PH)

Otra de las variables de calidad del grano que puede ser afectada por la nutrición es el PH. La norma de calidad en la comercialización distingue 3 categorías según éste parámetro: Grado 1 (PH>75), Grado 2 (PH>72), Grado 3 (PH>69). Mientras que el grado 2 se considera la base comercial, el grado 3 suele sufrir descuentos en el precio, y, si el valor es inferior a 69, la entrega en puerto puede ser rechazada.

Aunque estadísticamente no se observaron diferencia entre los tratamientos, el PH de los granos tendió a aumentar hasta los tratamientos con 150N, para estabilizarse por encima de los 73 kg hl⁻¹. (Figura 41).

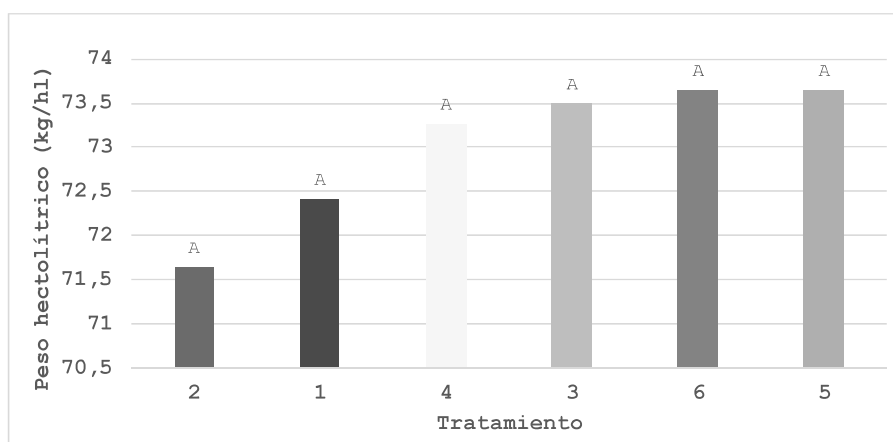


Figura 41: Efecto de los distintos tratamientos ensayados sobre el peso hectolítrico de los granos de maíz

Humedad del grano (H°)

La humedad del grano a cosecha es otra variable de impacto económico en los cultivos de grano. En cuanto a las condiciones de recibo de los granos, tanto en plantas de almacenamiento como en puertos, se establece que por encima de 14,5% de humedad el grano debe secarse, generando un costo adicional para el productor. Para las condiciones del estudio, sólo el tratamiento testigo (0N) fue el que alcanzó la humedad por debajo del límite (Figura 42). Las plantas con un mayor nivel de N tendieron a alargar el ciclo de crecimiento y llenado de los granos (Figura 40), alcanzando la madurez fisiológica con posterioridad.

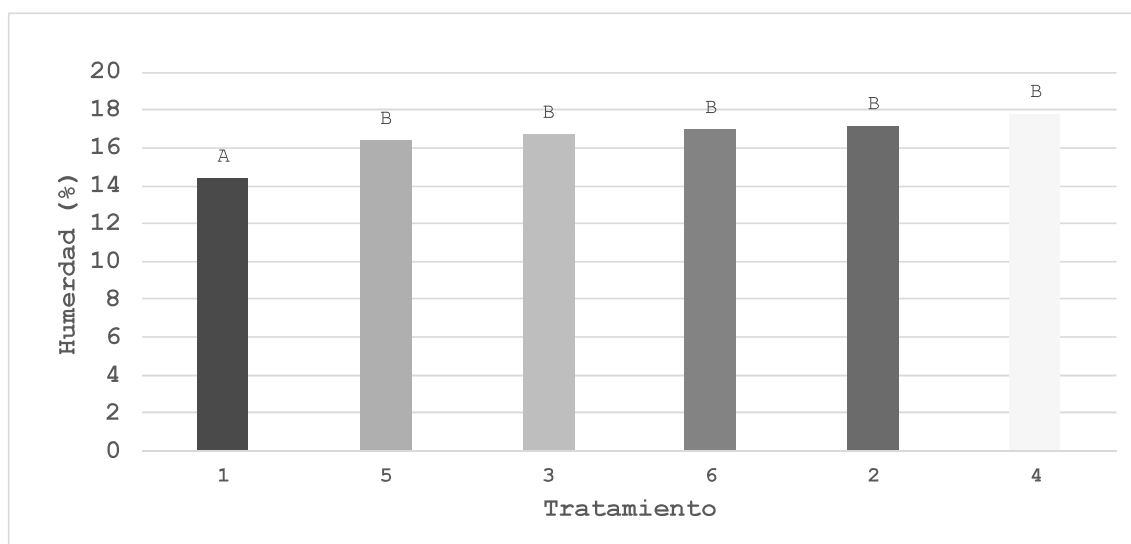


Figura 42: Efecto de los distintos tratamientos ensayados sobre la humedad a cosecha.

Eficiencia Agronómica del Nitrógeno

La eficiencia agronómica (EAGR) es la cantidad de producto obtenido por unidad de nutriente aplicado. Para las dosis ensayadas, las EAGR se muestran en la Figura 43. Debido a que la respuesta del rendimiento al agregado de un insumo puede ser descrita por la ley de los rendimientos decrecientes, la eficiencia de respuesta disminuye con el incremento de la dosis. Por otra parte, esta relación entre variables permite realizar una aproximación económica a la práctica de

fertilización conociendo los precios de los fertilizantes (y los costos de aplicación) y los precios de los productos, en éste caso del grano de maíz. Para poder llevar adelante el análisis económico de la práctica se necesita interpolar los resultados obtenidos, a través de una función de producción que se ajuste de la manera más certera, con los resultados experimentales (Figura 44). A partir de la función ajustada, se calcula el Producto Marginal (PM) dentro del rango donde aplica la función, donde:

$PM = \partial y / \partial x$ para la función ajustada.

A medida que se aumentó la dosis de N, dicho PM disminuyó (Figura 45). El punto en la recta donde se iguala el PM con el valor R, nos indica la dosis óptima económica para dicha función.

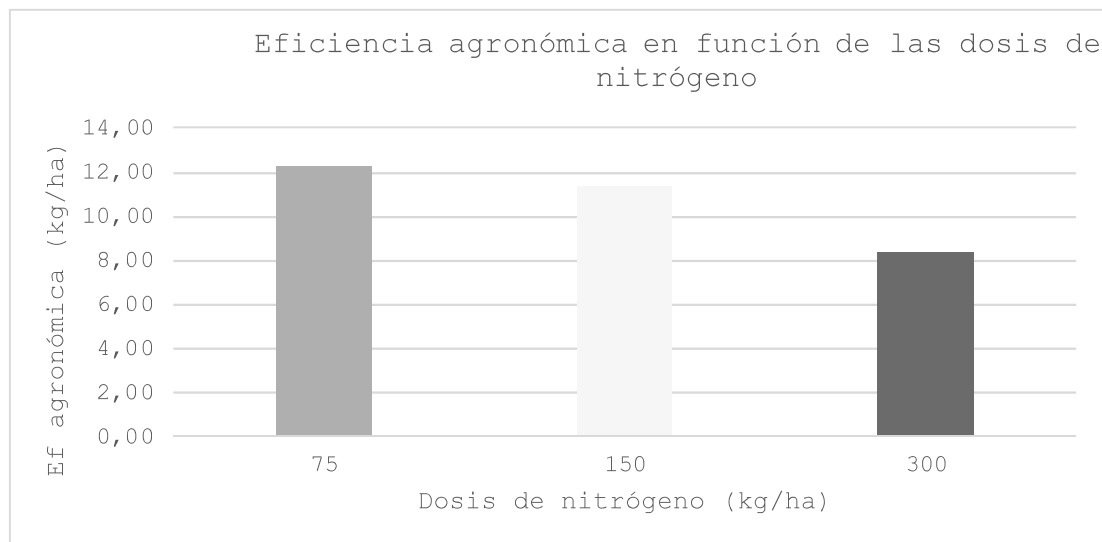


Figura 43: Eficiencia agronómica del nitrógeno para las distintas dosis ensayadas.

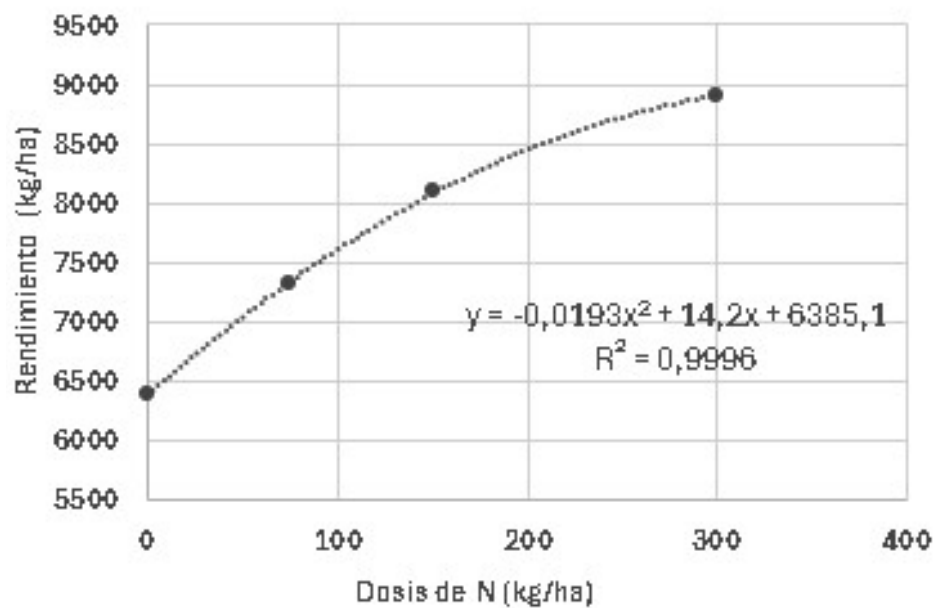


Figura 44: Función cuadrática que describe la respuesta a la fertilización nitrogenada.

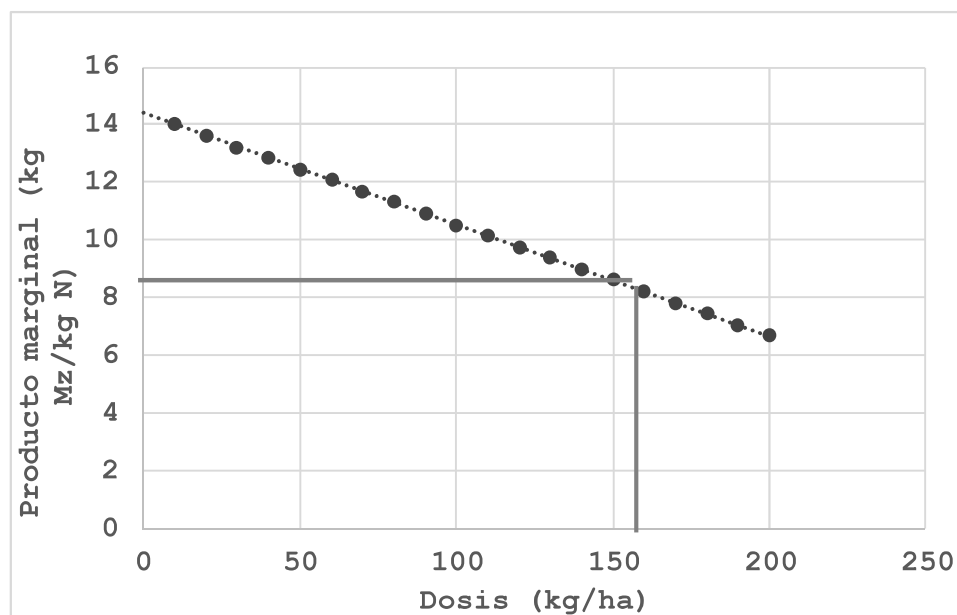


Figura 45: Producto Marginal como respuesta a la aplicación de N en función de la dosis de N.

Para conocer el valor de R, esto es los kg de maíz que son necesarios para poder comprar un kg de N como urea (la relación Insumo/Producto a valores netos de ambos), es necesario calcular el valor del maíz y restarle los gastos de

comercialización, y por otra parte, al fertilizante agregarle los costos de flete hasta el campo. Los valores tomados correspondientes a Febrero 2026 son:

Maíz: 190 u\$s t⁻¹. (precio pizarra) – Gastos de Comercialización (15%): 161,50 u\$s t⁻¹. Netos

Urea: 605 u\$s t⁻¹. (puesto en campo). Equivalente a 1.315 u\$s kgN⁻¹.

Valor R: $1,315 / 0,1615 =$ 8,14 Kg de Maíz/ Kg N.

En función del valor R para nitrógeno, la dosis óptima económica (DOE) fue de 160 kg N ha⁻¹, esto ocurre cuando se igualan los valores de R y PM (Figura 45).

Para el caso del fósforo, si tomamos las 2 dosis ensayadas, las respuestas en rendimiento alcanzadas fueron de 15,2 y 19,5 kg de maíz por kg de P aplicado, para las dosis de 90 y 160 kg MAP ha⁻¹, respectivamente. En ambos casos, la respuesta es inferior al costo (R) calculado. Para este nutriente en particular, la toma de decisión debería abarcar una mirada sistémica más amplia.

Maíz: 190 u\$s t⁻¹. (precio pizarra) – Gastos de Comercialización (15%): 161,50 u\$s t⁻¹. Netos

MAP (23%P): 905 u\$s t⁻¹. (puesto en campo). Equivalente a 4,13 u\$s KgP⁻¹.

Valor R: $4,13 / 0,1615 =$ 25,6 Kg de Maíz/ Kg P

Conclusiones

El estudio que se llevó adelante se caracterizó por el desarrollo del cultivo de maíz en condiciones hídricas favorables, esto es que la sumatoria de precipitaciones más riegos cubrieron las demandas evapotranspirativas del cultivo. Por otra parte, los problemas ocurridos en el establecimiento del cultivo determinaron una densidad de plantas 22% menor al objetivo y una desuniformidad alta entre las parcelas ensayadas (CV 23%).

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado en el presente trabajo, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Respuestas económicas a la fertilización con N: Bajo las condiciones del ensayo, y pese a la variabilidad registrada, se observaron respuestas económicas a la fertilización con hasta 160 kg N/ha. Este comportamiento, ocurrido aun con una disponibilidad inicial de N inorgánico elevada, evidencia las marcadas ineficiencias en el aprovechamiento del nutriente dentro de estos sistemas productivos.
- Tendencia positiva en el rendimiento al aplicar P: No obstante, el incremento en la variabilidad de los datos asociado al aumento de las dosis impidió establecer conclusiones con mayor rigor estadístico para este componente.
- Respuesta al Zn: si bien se partió de una disponibilidad inicial de Zn inusualmente alta, el agregado foliar de este micronutriente generó una respuesta promedio de 960 kg/ha para el tratamiento de 150 kg N/ha, demostrando la efectividad de la aplicación complementaria incluso en suelos con buenos niveles de reserva.

Referencias

- Agrios, G. (2005). *Plant Pathology*. 5th Edition. New York, USA. Ed. Academic Press. 952 pp.
- Andrade, H. F., Neiff, N., & Andrade, J. (2023). Crecimiento del cultivo. In F. H. al.], *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (pp. 73-105). Balcarce: Asociación maíz y sorgo argentino (MAIZAR).
- Appezatto, A. (2014). *Evolución del paisaje de la cuenca hidrográfica inferior del Río Colorado*. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur - Departamento de Geografía y Turismo.
- Barbieri, P. A., Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., Salvagiotti, F., Barbagelata, P., Barraco, M., . . . Larsen, B. (2015). ¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de zinc en el cultivo de maíz? *Informaciones agronómicas*, 19, 18-21.
- Bender, R. R., Haeghele, J. W., Ruffo, M. L., & Below, F. E. (2013). Modern corn hybrids ´ nutrient uptake patterns. *Better crops*, 7-10.
- Bolsa de cereales y productos de Bahía Blanca. (2021). *Bolsa de cereales y productos de Bahía Blanca*. Retrieved from Bolsa de cereales y productos de Bahía Blanca: <https://www.bcp.org.ar/>
- Cantarero, M., Luque, S., & Rubiolo, O. (2000). Efecto de la época de siembra y la densidad de plantas sobre el número de granos y el rendimiento de un híbrido de maíz en la región central de Córdoba (Argentina). *Agriscientia*, 4-9.
- Cassim, B. M., Lisboa, I. P., Besen, M. R., Otto, R., Cantarella, H., Inoue, T. T., & Batista, M. A. (2024). Nitrogen; from discovery, plant assimilation, sustainable usage to current enhanced efficiency fertilizers technologies - A review. *Rev. Bras. Ciênc do Solo*, 1-28.
- Cátedra de Fertilización en cultivo de granos y forrajes. (2025). Fósforo. *Universidad Nacional del Sur*, 1-12 capítulo 7.
- Cátedra de Fertilización en cultivos de granos y forrajes. (2025). Nitrógeno - Un nutriente esencial para la planta. *Universidad Nacional del Sur*, 1-23.
- COIRCO. (2019). La evolución del riego en la cuenca del Colorado. In COIRCO, *Comité interjurisdiccional del Río Colorado - 40 años* (pp. 139-146). Bahía Blanca: COIRCO.
- Cordisco, M., De Uribe Echevarría, A., Maccagno, R., Scoponi, L., Nori, M., & Piñeiro, V. (2019). Riego por gravedad en el Valle Inferior del Río Colorado (BA): Análisis económico para una gestión eficiente del agua a escala predial. *L Reunión Anual AAEA* (pp. 1-20). Buenos Aires: Departamento de ciencias de la administración UNS.
- CORFO. (2025). *Corporación de fomento del Río Colorado*. Retrieved from Corfo: <http://corfo.gob.ar>

D´Angelo, G., & Calzada, J. (2025). La industria del bioetanol alcanzó nuevos máximos en 2024. Rosario: Bolsa de Comercio de Rosario.

Darwich, N. (2005). *Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes*. Mar del Plata, Argentina: EniChem Agricultura; Secretaría de agricultura, ganadería y pesca.

Dick, W. A. (1984). Influence of Long-Term Tillage and Crop Rotation Combinations on Soil Enzyme Activities. *Soil Science Society of America Journal*, 569-574.

Espósito, G., Balboa, G., Castillo, C., & Balboa, R. (2010). Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. *Simposio Fertilidad* (pp. 172-173). Córdoba: Fertilizar.

Fernandez, H. (2021). *Variación de la disponibilidad de fósforo luego de la fertilización en la serie de suelo de aptitud ganadera*. Luján: Universidad Nacional de Luján.

Fernández, M. E. (2020). *La radiación solar en Bahía Blanca*. Tesis de doctorado. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.

Ingeniería en fertilizantes. (2025). Mercado Local. *Reporte informativo de fertilizantes*, 1-3.

IPNI (International Plant Nutrition Institute). (2007). Mineralización y nitrificación: Procesos claves en el ciclo del nitrógeno. *Informaciones agronómicas del cono sur*, 1-9.

Lema, R. (2016). *Administración de sistemas de riego, con análisis del caso Corfo*. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.

Martínez, J. M., & Suñer, L. (2024). Diagnóstico de la fertilidad nitrogenada y fosfórica en suelos del sudoeste bonaerense. In Compiladores, M. Menghini, & V. Piñeiro, *Prácticas agronómicas para el sudoeste bonaerense: Un enfoque para la disminución de la unidad económica agraria* (pp. 50-59). Bahía Blanca: EDIUNS. Universidad Nacional del Sur.

Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1-4.

Otto, R., Cantarella, H., Soares Rodrigues, J., & Gomes de Brito Silva, A. (2018). Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of Advanced Research*, 13, 19-27.

Paliwal, R. L. (2001). Introducción al maíz y su importancia. *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción* (pp. 10-15). Roma: Food & Agriculture Org.

Ramírez Dávalos, L. L., Figueredo Karajallo, J. C., Andino, S., Portillo Aguilera, A., Ortega Arias, M. d., & .. (2023). Respuesta del cultivo de maíz (Zea Mays) a la aplicación de diferentes dosis de fertilizante foliar de zinc. *Revista científica UNE*, 94-101.

Ratto, S. E., & Miguez, F. H. (2007). Zinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. *Informaciones agronómicas*, 8-15.

Rochette, P., MacDonald, J., Angers, D., Chantigny, M., Gasser, M.-O., & Bertrand, N. (2009). Banding of Urea Increased Ammonia Volatilization in a Dry Acidic Soil. *Journal of Environmental Quality*, 1383-1390.

- Sainz Rozas, H. (2019). Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. *Simposio Fertilidad 2019 - Conocer más. Crecer mejor* (pp. 1-32). Rosario: Fertilizar - Asociación civil.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., & Angelini, H. P. (2011). Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del suelo*, 1-9.
- Salonio, M. E. (2008). *Evaluación de desempeño de riego gravitacional para Zea mays en el Valle del Río Colorado*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía de la UBA.
- Sharma, K. M., & Kumar, P. (2017). *Guía para la identificación y el manejo de la deficiencia de nutrientes en cereales*. Norcross, Georgia: International Plant Nutrition Institute (IPNI).
- Tasca, A. F., Ernani, P. R., Rogeri, D. A., Gatiboni, L. C., & Cassol, P. C. (2011). Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Rev. Bras. Ciênc.*, 494-502.
- USDA. (2026, Febrero 10). *International Baseline Data - Visualization: International Baseline Projections*. Retrieved from USDA: <https://www.ers.usda.gov/data-products/international-baseline-data/visualization-international-baseline-projections>
- Varela, P. (2017). *Análisis del impacto del riego por goteo subterráneo para maíz en el Valle Bonaerense del Río Colorado*. Hilario Ascasubi: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Zheng, J., Kilasara, M. M., Mmari, W. N., & Funakawa, S. (2018). Ammonia volatilization following urea application at maize fields in the East African highlands with different soil properties. *Biology and fertility of soils*, 411-422.
- Zura, G., & Vanzolini, J. I. (2025). *Actualización de la estadística meteorológica de Hilario Ascasubi, Buenos Aires*. Hilario Ascasubi: INTA Hilario Ascasubi.