



Uso del inhibidor de la nitrificación DMPP en trigo (*Triticum durum* L.): Impacto en el rendimiento y calidad del grano †

[Use of the nitrification inhibitor DMPP in wheat (*Triticum durum* L.): Impact on yield and grain quality]

Juan Daniel Castillo-Murillo¹, Silvia Mónica Avilés-Marín^{1*},
Juan Gabriel Brigido-Morales¹, Roberto Soto-Ortiz¹, Carlos Enrique Ail-Catzim¹ and Samuel Sandoval-Solís²

¹ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n, Ejido Nuevo León, C.P. 21705. Mexicali, Baja California, México. E-mail: monica_aviles@uabc.edu.mx

² University of California, Davis. 135 Veihmeyer Hall, Davis, CA, 95616, USA

*Corresponding author

SUMMARY

Background: High nitrogen (N) losses in conventional agriculture, ranging from 32% to 65%, reduce the efficiency of nitrogen fertilizers use and contribute to environmental impacts. Nitrification inhibitors such as 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) optimize nitrogen availability; however, their impact on the industrial quality of durum wheat (*Triticum durum* L.) under arid conditions remains underexplored. **Objective:** To evaluate the effect of DMPP on yield, nitrogen use efficiency (NUE), and grain quality of durum wheat in the Mexicali Valley, Mexico. **Methodology:** A randomized trial with three replicates was implemented on sandy loam soil, moderately alkaline (pH 8.4) and moderately saline (2.5 dS m⁻¹) and four treatments: (1) control (conventional urea, 400 kg N ha⁻¹ without DMPP), DMPP doses (2) 200, (3) 300 and (4) 400 kg N ha⁻¹. Yield, NUE, grain protein content (%), test weight (kg hL⁻¹), and white belly (%) were assessed. ANOVA and Tukey's test (p<0.05) were used for statistical analysis. **Results:** No significant differences in yield were observed (p>0.05). The 200 kg N ha⁻¹ + DMPP treatment achieved the highest NUE (40 kg kg⁻¹), significantly outperforming the control (p<0.05). In terms of grain quality, the control showed optimal values: protein (11.81%), test weight (83.00 kg hL⁻¹), and white belly (1.20%). All DMPP treatments significantly affected grain quality, with lower protein (9.64–9.85%), lower test weight (80.50–81.33 kg hL⁻¹), and higher white belly incidence (35.0–58.1%) (p<0.05). **Implications:** These findings suggest that while DMPP enhances NUE and allows for reduced N application rates without compromising yield, it adversely affects commercial grain quality under arid conditions, requiring adjustments in application rates, timing and irrigation management. **Conclusions:** The use of DMPP in durum wheat is viable in terms of yield and nitrogen fertilization efficiency, but its negative impact on quality necessitates integrated management strategies that complement commercial quality standards.

Key words: Nitrogen; urea; 3,4-dimethylpyrazole phosphate; arid zones.

RESUMEN

Antecedentes: Las altas pérdidas de nitrógeno (N), que oscilan entre 32 a 65%, en la agricultura convencional reducen la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados y generan impactos ambientales. Inhibidores como el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) optimizan la disponibilidad de nitrógeno, pero su efecto sobre la calidad industrial del trigo duro (*Triticum durum* L.) en regiones áridas es poco documentado. **Objetivo:** Evaluar el efecto del DMPP en el rendimiento, eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) y calidad del grano de trigo duro en el Valle de Mexicali, México. **Metodología:** Se realizó un ensayo en suelo franco-arenoso, medianamente alcalino (pH 8.4) y moderadamente salino (2.5 dS m⁻¹), bajo un diseño en bloques completos al azar (3 repeticiones) y cuatro tratamientos: (1) testigo (urea convencional, 400 kg N ha⁻¹ sin DMPP), dosis de DMPP de (2) 200, (3) 300 y (4) 400 kg N ha⁻¹. Se evaluaron el rendimiento, EUN, proteína (%) del grano, peso hectolítrico (kg hL⁻¹) y panza blanca (%). Los datos se analizaron con ANOVA y prueba de Tukey (p<0.05). **Resultados:** No hubo diferencias significativas en

† Submitted December 22, 2025 – Accepted September 4, 2026. <https://doi.org/10.56369/tsaes.6762>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = J.D. Castillo-Murillo: <https://orcid.org/0009-0009-7149-6748>; S.M. Avilés-Marín: <https://orcid.org/0000-0003-1040-5442>; J.G. Brigido-Morales: <https://orcid.org/0000-0003-3442-9510>; R. Soto-Ortiz: <https://orcid.org/0000-0002-9568-4104>; C.E. Ail-Catzim: <https://orcid.org/0000-0003-3426-1578>; S. Sandoval-Solís: <https://orcid.org/0000-0003-0329-3243>

rendimiento ($p > 0.05$). La dosis de $200 \text{ kg N ha}^{-1} + \text{DMPP}$ alcanzó la máxima EUN (40 kg kg^{-1}), superando significativamente al testigo ($p < 0.05$). En calidad de grano, el testigo mostró valores óptimos: proteína (11.81%), peso hectolítrico (83.00 kg hL^{-1}) y panza blanca (1.20%). Todos los tratamientos con DMPP afectaron significativamente la calidad de grano: menor proteína ($9.64\text{-}9.85\%$), menor peso hectolítrico ($80.50\text{-}81.33 \text{ kg hL}^{-1}$) y mayor porcentaje de panza blanca ($35.0\text{-}58.1\%$) ($p < 0.05$). **Implicaciones:** El DMPP permite reducir las dosis de nitrógeno manteniendo el rendimiento y mejorando la EUN, pero compromete severamente la calidad comercial del grano de trigo en condiciones áridas, requiriendo ajustes en dosis, fechas y manejo de riego. **Conclusiones:** El uso de DMPP en trigo duro es viable en rendimiento y eficiencia de fertilización nitrogenada, pero su impacto negativo en calidad requiere estrategias de manejo integrado que permitan complementar con los estándares comerciales de calidad.

Palabras clave: Nitrógeno; urea; 3,4-dimetilpirazol fosfato; zonas áridas.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno, esencial para la producción agrícola, presenta un alto riesgo de pérdidas por volatilización, en forma de amoníaco (NH_3) (Dawar *et al.*, 2021; Tong *et al.*, 2022), por desnitrificación, que regulado por los microorganismos del suelo en condiciones anaeróbicas, el nitrato (NO_3^-) se reduce secuencialmente a nitrito (NO_2^-), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno molecular (N_2) (Cui *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2013; Tapia *et al.*, 2022) y por lixiviación en forma nitratos (NO_3^-) (Huang *et al.*, 2017; Cui *et al.*, 2021); y de acuerdo con Wang *et al.*, (2024) estas tasas de pérdida anuales oscilan entre 32% , 2% y 65% respectivamente. Estas pérdidas reducen la eficiencia de uso del nitrógeno y generan impactos negativos en la salud humana, el medio ambiente y la economía (Duncan *et al.*, 2017; Dawar *et al.*, 2021; Patel *et al.*, 2022). En este contexto, es crucial investigar estrategias sostenibles de manejo que optimicen la eficiencia en el uso del nitrógeno, promuevan la producción agrícola y minimicen riesgos ambientales. Una de las estrategias más prometedoras es el uso de sistemas de fertilizantes de liberación controlada y lenta, que regulan la disponibilidad de nutrientes de acuerdo a la demanda del cultivo, así como inhibidores enzimáticos como los inhibidores de ureasa [triamida tiofosfórica N-(n-butilo) (NBPT)] y de nitrificación, como la nitrapirina, diciandiamida (DCD), dimetilpirazol fosfato succínico (DMPSA) y 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), que reducen las pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviación (Liu *et al.*, 2013; Byrne *et al.*, 2020; Duff *et al.*, 2022; Barreras *et al.*, 2023; Guan *et al.*, 2024). El DMPP, un inhibidor de la nitrificación, retrasa la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-), prolongando la disponibilidad de nitrógeno (Arregui y Quemada, 2008; Cui *et al.*, 2021; Friedl *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2024); esto favorece una absorción continua de nitrógeno en etapas críticas del cultivo, mejorando el rendimiento agrícola (Norton y Ouyang, 2019; Wang *et al.*, 2021a; Shalmani *et al.*, 2022). Duncan *et al.* (2017), Dawar *et al.* (2021) y Shalmani *et al.* (2022) demostraron que el DMPP puede incrementar el rendimiento del trigo entre 10% y 37% respecto a

fertilizantes nitrogenados convencionales, especialmente en ambientes semiáridos y bajo condiciones de sequía. La disponibilidad sostenida de nitrógeno en el suelo favorece el contenido proteico del grano, principal indicador de calidad del trigo, que determina sus propiedades tecnológicas y clasificación en mercados internacionales. Mientras que el trigo panificable requiere alto contenido proteico, el trigo blando, con niveles más bajos, se usa en galletas y en cadenas especializadas (De Santis *et al.*, 2020; An *et al.*, 2024). La nutrición nitrogenada del trigo (*Triticum durum* L.) es determinante para el rendimiento y la calidad del grano, ya que una asimilación deficiente de nitrógeno durante el llenado limita la síntesis y movilización de aminoácidos, reduciendo el contenido de proteína y favoreciendo la aparición de panza blanca, caracterizada por granos opacos, harinosos y llenado deficiente (Zörb *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021b; Abiola *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2026). Esta disminución proteica afecta negativamente la calidad industrial del trigo, especialmente en los parámetros reológicos y panificables, que conlleva penalizaciones económicas porque no se alcanzan los estándares comerciales de proteína, impactando la rentabilidad del cultivo para el productor (Goos *et al.*, 2014; Peprah, 2021; Fan *et al.*, 2025). Por ello, la evaluación de estrategias que mejoren la eficiencia en el uso y la asimilación del nitrógeno cobra especial relevancia dentro de los parámetros agronómicos y de calidad considerados en la producción de trigo. Aunque el DMPP podría incrementar la acumulación de proteínas al optimizar la absorción de nitrógeno en fases críticas (Liu *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2021), estudios muestran que no siempre aumenta el contenido proteico, pese a mejorar la eficiencia del nitrógeno (Arregui y Quemada, 2008; Huérfano *et al.*, 2015; Duncan *et al.*, 2017). En México, el Valle de Mexicali, Baja California, es el cuarto productor nacional de trigo, con $260,000$ toneladas en $39,000$ hectáreas y un rendimiento promedio de 6.68 t ha^{-1} en el ciclo 2023 (SIAP, 2024). En esta región, la fertilización nitrogenada convencional se basa en una dosis de 35 kg de nitrógeno por tonelada de producción esperada, lo que aporta $200\text{-}300 \text{ kg N ha}^{-1}$ para rendimientos

promedio, y hasta 300-400 kg N ha⁻¹ en parcelas con mayores expectativas de rendimiento. Entre las fuentes de fertilizantes nitrogenados de uso más frecuente en la región es la urea, que a nivel mundial se estima un consumo anual que alcanza los 70 millones de toneladas métricas, con proyección a duplicarse en los próximos 20 años, de continuar las prácticas convencionales de fertilización nitrogenada, con pérdidas que oscilan entre el 30% y 40% (Davis *et al.*, 2016; Barreras *et al.*, 2023), presentan tendencia crítica por la degradación de los suelos agrícolas y el incremento en los costos de los insumos de nitrógeno. El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados justifica explorar tecnologías como los inhibidores de la nitrificación para mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno, reducir pérdidas ambientales y promover la sostenibilidad agrícola. Sin embargo, la evidencia sobre el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en trigo duro (*Triticum durum* L.) es limitada, especialmente en su impacto sobre el rendimiento y la calidad del grano, incluyendo el contenido proteico, clave para su valor comercial. Este trabajo evaluó el efecto del 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en el rendimiento y la calidad del grano de trigo duro (*Triticum durum* L.) en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó durante el ciclo agrícola 2023–2024 en una parcela de producción comercial de 12,000 m² (120 m × 100 m) en el Ejido Tehuantepec, Valle de Mexicali, Baja California, México (32° 53' 28.52" N y 115° 04' 26.27" O) (Figura 1). El clima es árido, semicálido [BWh(x')], con precipitaciones invernales escasas (INEGI, 2010). La normal climatológica (1981-2020) de la estación meteorológica más cercana indica 54 mm de precipitación total anual, temperaturas máximas de 41 °C en verano (aunque existen registros diarios de hasta 51 °C) y 23 °C en invierno (SMN, 2025). El suelo es franco-arenoso, con densidad aparente de 1.47 g cm⁻³, pH de 8.4 (medianamente alcalino) y conductividad eléctrica de 2.5 dS m⁻¹ (moderadamente salino).

Se utilizó trigo duro (*Triticum durum* L. cv. Atil), sembrado al voleo con una densidad de 200 kg ha⁻¹. El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones (Figura 2). Cuatro tratamientos fueron evaluados: (1) testigo de urea convencional (46 % nitrógeno) sin inhibidor de nitrificación, en dosis convencional (D.C.) de la región (400 kg N ha⁻¹), tratamientos del fertilizante NovaTec® Solub 45 (46 % nitrógeno ureico, 0.36 % 3,4-dimetilpirazol fosfato [DMPP] como inhibidor de nitrificación) con dosis de (2) 200, (3) 300 y (4) 400 kg N ha⁻¹ que se indican como N200, N300, N400, respectivamente.

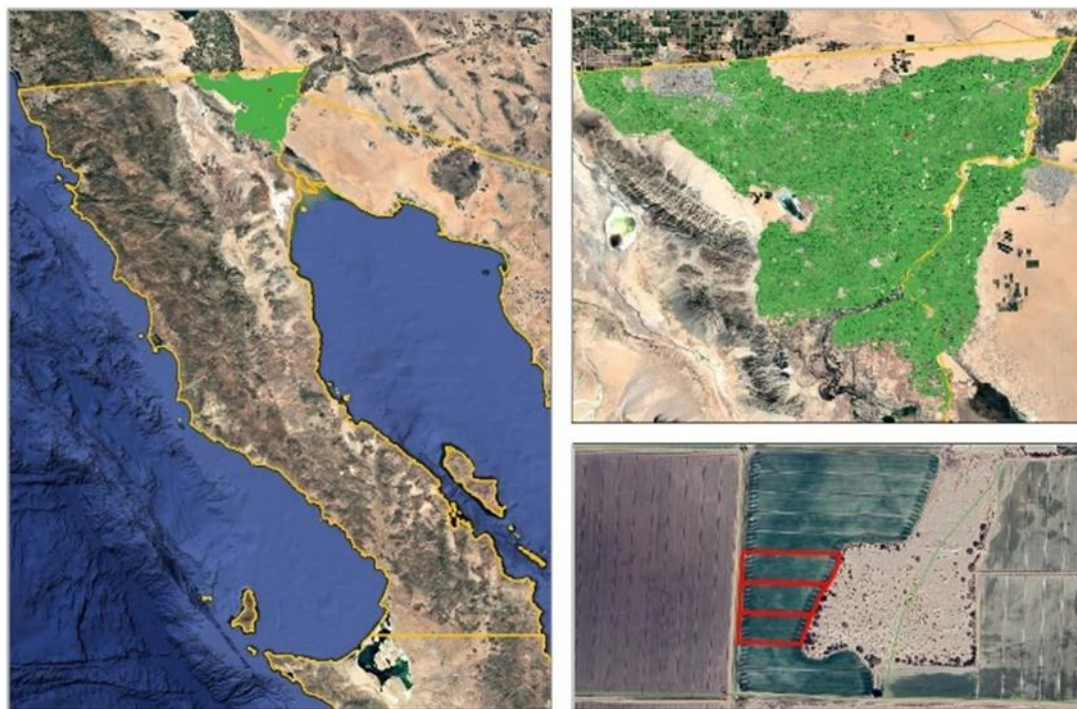


Figura 1. Sitio experimental ubicado en el Valle de Mexicali, Baja California, México. Fuente: Elaboración propia.

BLOQUE 1				BLOQUE 2				BLOQUE 3			
D.C	N200	N300	N400	D.C	N300	N400	N200	N400	N200	N300	D.C

Figura 2. Distribución de los tratamientos con inhibidor de nitrificación DMPP (N200, N300, N400) y urea en dosis convencional (D.C.) en bloques completamente al azar.

Los tratamientos se aplicaron en tres momentos: presiembra, primer riego de auxilio (51 días después de la siembra, DDS) y segundo riego de auxilio (80 DDS), distribuyendo la dosis total equitativamente entre cada aplicación (Tabla 1), el cultivo se manejó según las prácticas agronómicas convencionales de la región.

Tabla 1. Tratamientos de fertilización nitrogenada y el inhibidor DMPP aplicados en el cultivo de trigo. (*Triticum durum* L. var. Atil).

Tratamiento	Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	DMPP (kg ha ⁻¹)
Testigo (D.C.)	400	0.00
N200	200	0.72
N300	300	1.08
N400	400	1.44

Nota: El tratamiento testigo utilizó urea convencional (46% de nitrógeno) sin DMPP. Las dosis de DMPP corresponden al 0.36% del fertilizante NovaTec® Solub 45.

Variables de estudio

Rendimiento de grano

El rendimiento se estimó cosechando un área de 1 m² por tratamiento en cada repetición, seleccionada al azar, y los datos se extrapolaron para expresar el rendimiento en kg ha⁻¹.

Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN)

La EUN se determinó mediante la productividad parcial del fertilizante nitrogenado (PPFN), utilizando la fórmula descrita por Cui *et al.* (2010):

$$PPFN = \text{Rendimiento de grano (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Dosis de nitrógeno (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Calidad del grano

Los análisis de calidad del grano se realizaron en el laboratorio de Grupo La Moderna, S.A. de C.V., evaluando las siguientes variables:

- **Contenido de proteína en grano (%):** Se midió mediante espectrofotometría de reflectancia en el

infrarrojo cercano (Inframatic 9500 NIR), calibrado previamente con valores obtenidos por el método Kjeldahl (método 46-11A, AACC, 2000).

- **Peso hectolítrico (PHEC) (kg hL⁻¹):** Se determinó con una balanza Winchester Bushel Meter Ohaus®, conforme al método 55-10 de la AACC (2005).
- **Panza blanca (PB) (%):** En una muestra de 100 g, los granos se clasificaron según el tipo de endospermo (vitróo o harinoso). Los granos con endospermo almidonoso se consideraron como “panza blanca”, y el porcentaje se calculó con la fórmula:

$$\text{Panza blanca (\%)} = (\text{Número de granos con panza blanca} / \text{Número total de granos}) \times 100$$

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) bajo el modelo de bloques completos al azar. Las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Se realizó un análisis de correlación de Pearson para determinar la asociación entre las variables rendimiento, proteína, panza blanca (PB), peso hectolítrico (PHEC) y eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN). Los análisis se llevaron a cabo utilizando el software IBM SPSS Statistics 23.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficiencia en el uso del Nitrógeno (EUN)

La Figura 3 muestra el efecto del inhibidor de nitrificación (DMPP) sobre el rendimiento del grano y la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) en trigo duro (*Triticum durum* L. cv. Atil). La aplicación de 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno en combinación con DMPP resultó en la mayor EUN, con un valor aproximado de 40 kg kg⁻¹, significativamente superior ($p < 0.05$, prueba de Tukey) al tratamiento testigo (urea convencional, 400 kg ha⁻¹ sin DMPP) y a los tratamientos con 300 y 400 kg ha⁻¹ de nitrógeno más DMPP (N300 y N400), que mostraron valores de EUN inferiores al 30 kg kg⁻¹.

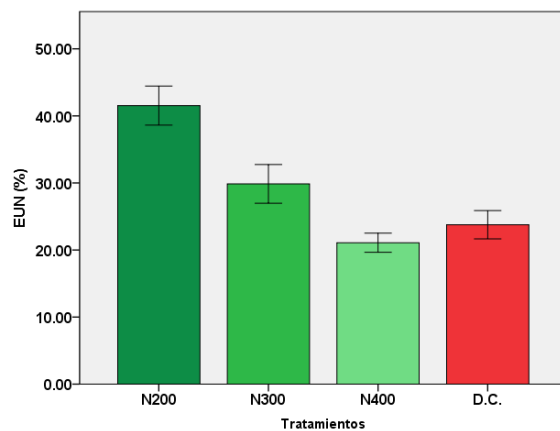


Figura 3. Efecto del inhibidor DMPP sobre la eficiencia en el uso de nitrógeno en trigo (*Triticum durum* L.). Barras de error no traslapadas de forma vertical indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Los resultados obtenidos muestran una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) con la dosis de 200 kg N ha⁻¹ combinada con DMPP en comparación con una dosis más alta (400 kg N ha⁻¹) sin DMPP, un resultado esperado y respaldado por investigaciones previas. Shalmani *et al.* (2022) reportaron un incremento del 19% en la EUN en trigo bajo condiciones de fertilización con DMPP y sin estrés hídrico, mientras que Zhang *et al.* (2025) indicaron que el DMPP puede aumentar la EUN en un rango de 4% a 93%, dependiendo de las condiciones experimentales.

Por otro lado, la mayor EUN observada con la dosis de 200 kg N ha⁻¹, en comparación con dosis más altas (300 y 400 kg N ha⁻¹), sugiere la existencia de un punto óptimo de aplicación de nitrógeno, más allá del cual el uso de un inhibidor como el DMPP no mejora significativamente la EUN. Este hallazgo es coherente con Huérfano *et al.* (2015), quienes identificaron 180 kg N ha⁻¹ como la dosis óptima para maximizar el rendimiento, un valor cercano al utilizado en este estudio. Asimismo, Wang *et al.* (2024) encontraron que una aplicación de 225 kg N ha⁻¹ optimizó la EUN en un sistema trigo-maíz, mientras que dosis excesivas (300 kg N ha⁻¹) incrementaron el riesgo de pérdidas ambientales sin beneficios adicionales en la eficiencia.

Rendimiento

En cuanto al rendimiento del cultivo, no se observaron diferencias significativas entre las distintas dosis de nitrógeno con adición de DMPP y la dosis comercial (Testigo) ver Figura 4. Este resultado coincide con investigaciones previas que, si bien han reportado mejoras en la EUN, señalan que el efecto

sobre el rendimiento no siempre es significativo. En un metaanálisis, Yang *et al.* (2016) concluyeron que el DMPP no incrementó de manera significativa el rendimiento, registrando en promedio solo un 1.2% de aumento, principalmente en suelos alcalinos.

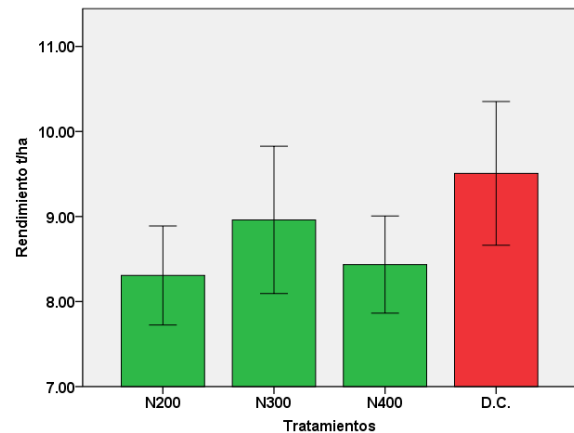


Figura 4. Efecto del inhibidor DMPP sobre el rendimiento de grano de trigo (*Triticum durum* L.). Barras de error no traslapadas de forma vertical indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

De forma similar, Duncan *et al.* (2017) evaluaron seis experimentos con ENTEC urea (urea con 1% de DMPP) y encontraron que solo en uno de ellos el rendimiento fue significativamente mayor, y de forma marginal. Ni *et al.* (2023) también reportaron que la adición de inhibidores elevó el rendimiento del grano apenas un 2%, con alta variabilidad interanual. No obstante, otros estudios, como los de Villar y Guillaumes (2010) y Shalmani *et al.* (2022), informaron aumentos del 10% al 13% en el rendimiento del trigo con la aplicación de DMPP. Estos hallazgos sugieren que el impacto del DMPP sobre el rendimiento de los cultivos es variable y está influenciado por la interacción entre factores edafoclimáticos y prácticas de manejo. Estudios recientes muestran que el efecto combinado de DMPP con residuos de trigo mejoran el rendimiento y la EUN (Shalmani *et al.*, 2026).

Calidad del grano

La fertilización nitrogenada es un factor crítico para optimizar el rendimiento y la calidad del grano en trigo, pero sus efectos dependen de la dosis, el momento de aplicación y las condiciones edafoclimáticas. Estudios previos han demostrado que una oferta adecuada de nitrógeno (N) puede incrementar simultáneamente el rendimiento y la calidad del grano hasta un punto máximo, tras el cual el contenido de proteína (GPC) puede seguir

umentando si el N no es limitante (Krüger *et al.*, 2021). De Santis *et al.* (2020) confirman que altas dosis de N favorecen un GPC elevado, a menudo asociado con mayores rendimientos, aunque frecuentemente a expensas de una relación negativa entre ambas variables. Además, dosis de hasta 240 kg N ha⁻¹, combinadas con un riego adecuado, pueden reducir la incidencia de panza blanca a valores inferiores al 10%, mejorando la calidad del endospermo (Solís y Díaz de León, 2001). En este contexto, los inhibidores de nitrificación, como el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), podrían optimizar la disponibilidad de N al reducir pérdidas por lixiviación y emisiones de N₂O, potencialmente mejorando la calidad del grano (Duncan *et al.*, 2017; Ni *et al.*, 2023). Sin embargo, la literatura reporta resultados inconsistentes, con efectos nulos o limitados en rendimiento y calidad en algunos casos (Huérano *et al.*, 2015; Antošovský *et al.*, 2025).

En el contexto específico del Valle de Mexicali, los resultados (Tabla 2) muestran que el testigo superó a los tratamientos con DMPP en los parámetros de calidad del grano, lo que sugiere que la urea convencional favoreció una mayor acumulación de nitrógeno en el grano en este contexto.

Peso hectolítrico

El peso hectolítrico del grano varió entre 80.50 y 83.00 kg hL⁻¹, con diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). El tratamiento testigo con urea convencional (400 kg ha⁻¹) alcanzó el valor más alto (83.00 kg hL⁻¹), mientras que la dosis de 200 kg ha⁻¹ con DMPP (N200) registró el menor valor (80.50 kg hL⁻¹). Los tratamientos N300 y N400 (300 y 400 kg ha⁻¹ con DMPP) presentaron valores intermedios (81.33 kg hL⁻¹), sin diferencias significativas entre ellos. Estos resultados sugieren que el DMPP, especialmente en dosis bajas, reduce la densidad del grano, probablemente por una menor acumulación de materia seca debido a la nitrificación retardada en un suelo alcalino bajo condiciones áridas (Lan *et al.*, 2022). Dado que el almidón constituye el 60-75% del peso seco del grano, su acumulación, limitada por el estrés térmico en la zona de estudio, pudo reducir el peso hectolítrico en los tratamientos con DMPP, amplificado por el riego limitado (presiembr, 51 y

80 DDS) (Han *et al.*, 2025; Kim and Kim, 2021; Li *et al.*, 2016).

El testigo combinó alto peso hectolítrico (83.00 kg hL⁻¹) y contenido de proteína en el grano (11.81%), indicando que la urea convencional optimizó ambos parámetros, a diferencia de los tratamientos con DMPP y aunque no se observaron diferencias significativas en rendimiento, el "efecto de dilución" en tratamientos con mayor rendimiento pudo contribuir a la menor densidad con DMPP (Antošovský *et al.*, 2024; Gauer *et al.*, 1992).

Panza blanca

El porcentaje de panza blanca en el grano de trigo mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), donde el tratamiento testigo con urea convencional (400 kg ha⁻¹) registró el menor valor (1.20%), mientras que los tratamientos con DMPP (NovaTec® Solub 45) presentaron valores más altos: 35.0%, 58.1%, y 47.3% para N200, N300, y N400 (200, 300, y 400 kg ha⁻¹, respectivamente).

La panza blanca, caracterizada por gránulos de almidón sueltos y espacios no ocupados por proteína en el endospermo, reduce la calidad del grano (Solís y Díaz de León, 2001); su mayor incidencia con DMPP se atribuye a la baja disponibilidad de nitrógeno, que favorece la acumulación de almidón sobre proteína, exacerbada por la inhibición de la nitrificación en un suelo alcalino, donde el DMPP es más persistente (Li *et al.*, 2024). Desde un punto de vista bioquímico, la mayor disponibilidad sostenida de NH₄⁺ puede favorecer la asimilación directa de nitrógeno en la raíz mediante la vía glutamina sintetasa/glutamato sintasa (GS/GOGAT), incrementando la producción de aminoácidos como glutamina y asparagina, principales formas de transporte de nitrógeno hacia los órganos de reserva (Fan *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2021b). Sin embargo, diversos estudios han señalado que una nutrición parcialmente amoniacal inducida por DMPP no siempre se traduce en un aumento del contenido total de proteína del grano, sino más bien en cambios en la composición y partición de las fracciones proteicas (Huérano *et al.*, 2021).

Tabla 2. Efecto del inhibidor DMPP sobre los parámetros de calidad en panza blanca (%), peso hectolítrico y proteína (%) (kg hL⁻¹) del grano de trigo (*Triticum durum* L.).

Tratamiento	Panza blanca (%)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Proteína (%)
Dosis convencional	1.20 a	83.00 a	11.81 a
200 kg ha ⁻¹	35.0 b	80.50 b	9.64 b
300 kg ha ⁻¹	58.1 c	81.33 b	9.77 ab
400 kg ha ⁻¹	47.3 c	81.33 b	9.85 ab

Medias con letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey $p < 0.05$)

En particular, se ha observado que el uso de DMPP puede modificar la relación entre gliadinas y gluteninas, con mínimas reducciones en fracciones específicas como las ω -gliadinas, sin afectar de manera significativa la aptitud tecnológica de la harina (Huérffano *et al.*, 2021). Este comportamiento puede explicarse por una alteración en la señalización metabólica durante el llenado del grano, donde la disponibilidad de nitrógeno influye en la expresión de genes codificantes de proteínas de almacenamiento y en la competencia entre la síntesis de almidón y proteína en el endospermo (Wang *et al.*, 2021b, Xu *et al.*, 2025).

Asimismo, la literatura indica que el efecto del DMPP sobre la proteína del grano depende estrechamente del momento de aplicación, la estrategia de fraccionamiento del nitrógeno y las condiciones edáficas. En esquemas de fertilización con menor número de aplicaciones, el DMPP puede mantener el rendimiento del grano, pero diluir el contenido de proteína debido a una mayor acumulación de carbohidratos durante el llenado, fenómeno conocido como efecto de dilución (Guzman-Bustamante *et al.*, 2022). Esto concuerda con estudios que reportan ausencia de incrementos significativos en proteína bajo DMPP, a pesar de mejoras en la eficiencia de uso del nitrógeno y reducción de pérdidas por lixiviación y desnitrificación (Duncan *et al.*, 2017; Villar and Guillaumes, 2010).

Aunque la literatura reporta una correlación negativa entre panza blanca y contenido de proteína en grano (GPC), con una reducción de 16.4-18.5% en panza blanca por cada unidad porcentual de aumento en GPC (Robinson *et al.*, 1979), en este estudio el GPC no disminuyó drásticamente (9.64–11.81%), lo que sugiere que el estrés térmico y el manejo del riego influyeron en mayor medida en el contenido de panza blanca que en el contenido de proteína.

Contenido de proteína en grano (%)

El contenido de proteína en grano (GPC) de trigo mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), donde el testigo con urea convencional (400 kg ha^{-1}) alcanzó el mayor GPC (11.81%), superando a los tratamientos con DMPP (NovaTec® Solub 45), que registraron valores más bajos: 9.64%, 9.77% y 9.85% para las dosis de 200, 300 y 400 kg ha^{-1} , respectivamente. El menor GPC obtenido en los tratamientos con DMPP, puede atribuirse a la baja disponibilidad de nitrógeno por la inhibición de la nitrificación en un suelo alcalino, donde el DMPP puede persistir hasta tres meses (Pérez-Castaño, 2019). Además, altas concentraciones de DMPP pueden alterar las comunidades microbianas del suelo, reduciendo bacterias nitrificantes y la absorción de micronutrientes como zinc y hierro, clave para la

calidad proteica (Duncan *et al.*, 2017; Bachtsevani *et al.*, 2021).

La fertilización nitrogenada influye significativamente en el GPC, requiriendo dosis de al menos 140 kg N ha^{-1} en suelos de fertilidad media para alcanzar rendimientos superiores a 3500 kg ha^{-1} y estándares de calidad (Krüger *et al.*, 2021). Sin embargo, como se indicó anteriormente, en condiciones áridas el estrés térmico y el riego limitado favorecen la acumulación de almidón sobre nitrógeno (Solís y Díaz de León, 2001).

Correlación de variables

En el Tabla 3 se muestra el análisis de correlación de variables de rendimiento y calidad del grano del trigo, se obtuvo lo siguiente:

- Rendimiento está estrechamente relacionado al PHEC, lo que indica que la energía disponible es un factor crítico. En cambio, el contenido de Proteína y PB están inversamente relacionadas, lo que sugiere que son indicadores opuestos en la composición del grano.
- EUN no correlaciona significativamente con rendimiento, pero sí con PHEC (negativa), lo que podría implicar que a mayor eficiencia en nitrógeno no siempre se traduce en más energía.
- Rendimiento vs PHEC: Presenta correlación muy alta y positiva ($r = 0.825$, $p = 0.001$). Se observa que, a mayor rendimiento, mayor PHEC.
- Rendimiento vs Proteína: Presenta correlación moderada positiva ($r = 0.552$, $p = 0.063$, no significativa al 0.05). La tendencia que a mayor rendimiento se asocie con más proteína, pero no es estadísticamente significativa.
- Proteína vs PB: Correlación muy alta y negativa ($r = -0.967$, $p < 0.001$). Se observa que, al aumentar el contenido de proteína, disminuye PB.
- Proteína vs PHEC: Presenta correlación alta positiva ($r = 0.684$, $p = 0.014$). Más proteína se asocia con más PHEC.
- PB vs PHEC: Correlación alta negativa ($r = -0.682$, $p = 0.015$). Se observa, a mayor PB, menor PHEC.
- EUN (Eficiencia de uso de nitrógeno): Correlación negativa con PHEC ($r = -0.601$, $p = 0.039$, significativa). Correlación débil con rendimiento (-0.363 , $p = 0.246$, no significativa).

Tabla 3. Correlación de variables de parámetros de rendimiento y calidad del grano de trigo (*Triticum durum* L.).

		Rendimiento (t ha)	Proteína (%)	PB (%)	PHEC	EUN (%)
Rendimiento	Correlación de Pearson	1	0.552	-0.562	0.825**	-0.363
	Sig. (bilateral)		0.063	0.057	0.001	0.246
	N	12	12	12	12	12
Proteína	Correlación de Pearson	0.552	1	-0.967**	0.684*	-0.234
	Sig. (bilateral)	.063		.000	.014	.465
	N	12	12	12	12	12
PB	Correlación de Pearson	-0.562	-0.967**	1	-0.682*	0.139
	Sig. (bilateral)	0.057	.000		0.015	0.667
	N	12	12	12	12	12
PHEC	Correlación de Pearson	0.825**	0.684*	-0.682*	1	-0.601*
	Sig. (bilateral)	0.001	0.014	0.015		0.039
	N	12	12	12	12	12
EUN	Correlación de Pearson	-0.363	-0.234	0.139	-0.601*	1
	Sig. (bilateral)	0.246	0.465	0.667	0.039	
	N	12	12	12	12	12

** La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

CONCLUSIONES

El uso del inhibidor de nitrificación 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP) en trigo duro (*Triticum durum* L. cv. Atil) en el Valle de Mexicali (ciclo 2023–2024) permitió reducir la dosis de nitrógeno a 200 kg ha⁻¹ sin afectar el rendimiento y mejorando la eficiencia en suelos franco-arenosos, medianamente alcalinos (pH 8.4) y moderadamente salinos (2.5 dS m⁻¹). No obstante, el DMPP disminuyó la calidad comercial del grano, reduciendo el peso hectolítrico (80.50–81.33 kg hL⁻¹), el contenido de proteína (9.64–9.85%) y aumentando la incidencia de panza blanca (35.0–58.1%) en comparación con la urea convencional. El análisis de correlación evidenció que el rendimiento se relaciona fuertemente con PHEC ($r = 0.825$, $p < 0.01$), indicando que la energía disponible en el grano es clave para la productividad. La proteína mostró correlación positiva con PHEC ($r = 0.684$, $p < 0.05$) y negativa con PB ($r = -0.967$, $p < 0.01$), reflejando ajustes en la composición proteica. La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) no correlacionó con rendimiento, pero sí negativamente con PHEC ($r = -0.601$, $p < 0.05$), lo que sugiere que mayor eficiencia no implica mayor energía en el grano. Estos hallazgos subrayan la necesidad de optimizar dosis y momentos de aplicación de fertilizantes con DMPP, así como ajustar calendarios de riego, para equilibrar rendimiento, calidad y uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, así como la sostenibilidad ambiental.

Acknowledgements

Los autores agradecen al Productor cooperante, Sr Mauricio Castillo Murillo y Familia, por brindar el acceso a sus parcelas agrícolas de producción comercial y permitir establecer los ensayos experimentales, al Ing. Oracio Rivera Caudillo, por su

apoyo técnico en el Laboratorio de Agua y Suelo, ICA-UABC, Dr. Israel Camacho por su asistencia técnica en el Laboratorio de análisis reológicos en Grupo La Moderna, Mexicali, BC.

Funding. This research was funded by the Autonomous University of Baja California. Research project number 200/5/C/81/23, granted to Silvia Mónica Avilés-Marín.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Due to its characteristics, this study does not require the approval of a bioethics committee.

Data availability. Data are available upon reasonable request, with the corresponding author Silvia Mónica Avilés-Marín (monica_aviles@uabc.edu.mx).

AI disclosure statement. The authors declare that no generative artificial intelligence tools were employed in the preparation of this manuscript.

Author contribution statement (CRediT). **J.D. Castillo-Murillo** – Investigation, Formal analysis, Writing - original draft. **S.M. Avilés-Marín** – Conceptualization, Formal analyses, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing. **J.G. Brigido-Morales** – Methodology, Writing - original draft, Writing - review & editing. **R. Soto-Ortíz** – Methodology, Writing - review & editing. **C.E. Ail-Catzim** – Formal analyses, Writing - review & editing. **S. Sandoval-Solís** – Writing - review & editing. All

authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

REFERENCES

- AACC. American Association of Cereal Chemists., 2000. *Approved Methods of the AACC*. 10th ed. St. Paul, Minnesota. AACC. <https://www.cerealsgrains.org/resources/methods/Pages/default.aspx>
- AACC. American Association of Cereal Chemists., 2005. *Approved Methods of the AACC*. 10th ed. St. Paul, Minnesota. AACC. <https://www.cerealsgrains.org/resources/methods/Pages/default.aspx>
- Abiola, S.O., Lacasa, J., Carver, B.F., Arnall, B.D., Ciampitti, I. A. and de Oliveira Silva, A., 2024. Nitrogen uptake dynamics of high and low protein wheat genotypes. *Frontiers in Plant Science*, 15, pp. e1493901. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1493901>
- An, H., Han, J., He, Q., Zhu, Y., Wu, P., Wang, Y., Gao, Z., Du, T. and Xue, J., 2024. Influence of nitrogen application rate on wheat grain protein content and composition in China: A meta-analysis. *Agronomy*, 14(6), pp. e1164. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061164>
- Antošovský, J., Škarpa, P. and Ryant, P., 2024. The effect of nitrogen-sulphur fertilizer with nitrification inhibitor on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nutrition. *Heliyon*, 10(12), pp. e33035. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33035>
- Antošovský, J., Škarpa, P. and Ryant, P., 2025. The effect of nitrification inhibitor on the yield and quality of *Triticum aestivum* L. and *Brassica napus* L. – A long-term experiment. *Field Crops Research*, 328, pp. e109906. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109906>
- Arregui, L.M. and Quemada, M., 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agronomy Journal*, 100(2), pp. 277–284. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0187>
- Bachtsevani, E., Papazlatani, C.V., Rousidou, C., Lamproniou, E., Menkissoglu-Spiroudi, U., Nicol, G.W., Karpouzas, D.G. and Papadopoulou, E.S., 2021. Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on the activity and diversity of the soil microbial community under contrasting soil pH. *Biology and Fertility of Soils*, 57(8), pp. 1117–1135. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01602-z>
- Barreras-Urbina, C.G., Rodríguez-Félix, F., Cárdenas-López, J.L., Plascencia-Jatomea, M., Pérez-Tello, M., Ledesma-Osuna, A.I. and Castro-Enríquez, D.D., 2023. Effect of a prolonged-release system of urea on nitrogen losses and microbial population changes in two types of agricultural soil. *ACS omega*, 8(45), pp. 42319–42328. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04572>
- Byrne, M.P., Tobin, J.T., Forrestal, P.J., Danaher, M., Nkwonta, C.G., Richards, K., Cummins, E., Hogan, S.A. and O’Callaghan, T.F., 2020. Urease and nitrification inhibitors—As mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: A review. *Sustainability*, 12(15), pp. e6018. <https://doi.org/10.3390/su12156018>
- Cui, L., Li, D., Wu, Z., Xue, Y., Xiao, F., Zhang, L., Song, Y., Li, Y., Zheng, Y., Zhang, J. and Cui, Y., 2021. Effects of nitrification inhibitors on soil nitrification and ammonia volatilization in three soils with different pH. *Agronomy*, 11(8), pp. e1674. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081674>
- Cui, Z., Chen, X. and Zhang, F., 2010. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat–maize system in China. *AMBIO*, 39(5–6), pp. 376–384. <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0076-6>
- Davis, A.M., Tink, M., Rohde, K. and Brodie, J.E., 2016. Urea contributions to dissolved “organic” nitrogen losses from intensive, fertilised agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 223, pp. 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.006>
- Dawar, K., Khan, H., Zaman, M., Muller, C., Alam, S.S., Fahad, S., Alwahibi, M.S., Alkahtani, J., Saeed, B., Saud, S., Hammad, H.M. and Nasim, W., 2021. The effect of biochar and nitrogen inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions and wheat productivity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(6), pp. 2465–2475. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10283-1>
- De Santis, M.A., Giuliani, M.M., Flagella, Z., Reyneri, A. and Blandino, M., 2020. Impact of nitrogen fertilization strategies on the protein content, gluten composition and rheological properties of wheat for biscuit production.

- Field Crops Research*, 254, pp. e107829. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107829>
- Duff, A.M., Forrestral, P., Ikoyi, I. and Brennan, F., 2022. Assessing the long-term impact of urease and nitrification inhibitor use on microbial community composition, diversity and function in grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, pp. e108709. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108709>
- Duncan, E.G., O'Sullivan, C.A., Roper, M.M., Peoples, M.B., Treble, K. and Whisson, K., 2017. Crop and microbial responses to the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in Mediterranean wheat-cropping systems. *Soil Research*, 55(6), pp. 553-566. <https://doi.org/10.1071/sr16327>
- Fan, Y., Li, W., Zhang, L., Song, J., Wang, D., Xue, J. and Gao, Z., 2025. Wheat Nitrogen Use and Grain Protein Characteristics Under No-Tillage: A Greater Response to Drip Fertilization Compared to Intensive Tillage. *Agronomy*, 15(3), pp. e588. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030588>
- Friedl, J., Scheer, C., Rowlings, D.W., Deltedesco, E., Gorfer, M., De Rosa, D., Grace, P.R., Müller, C. and Keiblinger, K.M., 2020. Effect of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on N-turnover, the N₂O reductase-gene nosZ and N₂O:N₂ partitioning from agricultural soils. *Scientific Reports*, 10, pp. e2399. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59249-z>
- Gauer, L.E., Grant, C.A., Bailey, L.D. and Gehl, D.T., 1992. Effects of nitrogen fertilization on grain protein content, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency of six spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars, in relation to estimated moisture supply. *Canadian Journal of Plant Science*, 72(1), pp. 235-241. <https://doi.org/10.4141/cjps92-026>
- Goos, R.J., Westfall, D.G. and Ludwick, A.E., 2014. *Grain protein content and nitrogen needs*. Colorado State University Extension. <https://extension.colostate.edu/resource/grain-protein-content-and-n-needs/> (Consulta 8 de agosto 2025)
- Guan, T., Lei, J., Fan, Q. and Liu, R., 2024. Soil factors key to 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) efficacy: EC and SOC dominate over biotic influences. *Microorganisms*, 12(9), pp. e1787. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091787>
- Guzman-Bustamante, I., Schulz, R., Müller, T. and Ruser, R., 2022. Split N application and DMP-based nitrification inhibitors mitigate N₂O losses in a soil cropped with winter wheat, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 123(3), pp. 119-135. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10211-7>
- Han, P., Wang, Y. and Sun, H., 2025. Impact of temperature stresses on wheat quality: A focus on starch and protein composition. *Foods*, 14(13), pp. e2178. <https://doi.org/10.3390/foods14132178>
- Huang, T., Ju, X. and Yang, H., 2017. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management. *Scientific Reports*, 7(1), pp. e42247. <https://doi.org/10.1038/srep42247>
- Huérffano, X., Estavillo, J.M., Duñabeitia, M.K., González-Moro, M.B., González-Murua, C. and Fuertes-Mendizábal, T., 2021. Response of wheat storage proteins and breadmaking quality to dimethylpyrazole-based nitrification inhibitors under different nitrogen fertilization splitting strategies, *Plants*, 10(4), pp. e703. <https://doi.org/10.3390/plants10040703>
- Huérffano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Duñabeitia, M.K., González-Murua, C., Estavillo, J.M. and Menéndez, S., 2015. Splitting the application of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP): Influence on greenhouse gases emissions and wheat yield and quality under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 64, pp. 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.008>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía., 2010. *Compendio de Información Geográfica Municipal 2010*. Mexicali, Baja California. . https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/02/02002.pdf
- Kim, K. and Kim, J., 2021. Understanding wheat starch metabolism in properties, environmental stress condition, and molecular approaches for value-added utilization. *Plants*, 10(11), pp. e2282. <https://doi.org/10.3390/plants10112282>
- Krüger, H.R., Zilio, J.P., Frolla, F.D. and Tranier Pérez, E.A., 2021. Clima, rendimiento y contenido proteico del grano de trigo en la región semiárida argentina. *Ciencia del Suelo*,

- 39(1), pp. 168–182. <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/655>
- Lan, T., Li, M., He, X., Deng, O., Zhou, W., Luo, L. and Gao, X., 2022. Effects of synthetic nitrification inhibitor (3,4-dimethylpyrazole phosphate; DMPP) and biological nitrification inhibitor (methyl 3- (4-hydroxyphenyl) propionate; MHPP) on the gross N nitrification rate and ammonia oxidizers in two contrasting soils. *Biology and Fertility Soils*, 58(3), pp. 333–344. <https://doi.org/10.1007/s00374-022-01628-x>
- Li, C.Y., Zhang, R.Q., Fu, K.Y., Li, C. and Li, C., 2016. Effects of high temperature on starch morphology and the expression of genes related to starch biosynthesis and degradation. *Journal of Cereal Science*, 73, pp. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.005>
- Li, Z., Xu, P., Bo, X., Wu, J., Han, Z., Guo, S., Li, K., Shen, M., Wang, J. and Zou, J., 2024. Soil pH-dependent efficacy of DMPP in mitigating nitrous oxide under different land uses. *Geoderma*, 449, pp. e117018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117018>
- Liu, C., Wang, K. and Zheng, X., 2013. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat–maize cropping system. *Biogeosciences*, 10(4), pp. 2427–2437. <https://doi.org/10.5194/bg-10-2427-2013>
- Ni, K., Vietinghoff, M. and Pacholski, A., 2023. Targeting yield and reducing nitrous oxide emission by use of single and double inhibitor treated urea during winter wheat season in Northern Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, pp. e108391. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108391>
- Norton, J. and Ouyang, Y., 2019. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. *Frontiers in Microbiology*, 10, pp. e1931. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01931>
- Patel, N., Srivastav, A.L., Patel, A., Singh, A., Singh, S.K., Chaudhary, V.K., Singh, P.K. and Bhunia, B., 2022. Nitrate contamination in water resources, human health risks and its remediation through adsorption: A focused review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(46), pp. 69137–69152. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22377-2>
- Peprah, S., 2021. Managing nitrogen in spring wheat to boost grain yield, quality and nitrogen use efficiency. *Alberta Grains*. https://www.albertagrains.com/files/2021/06/managing_nitrogen_in_spring_wheat_to_boost_grain_yield_quality_and_nitrogen_use_efficiency_2.pdf
- Pérez-Castaño, E., 2019. Respuesta de los inhibidores de la nitrificación en el suelo agrícola: movilidad y permanencia. *E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas* (UPM). <https://oa.upm.es/57081/>
- Shalmani, M.A.M., Lakzian, A., Khorassani, R., Zaman, M., Feiziasl, V., Borzouei, A., Rudsari, M.K. and Khiabani, B.N., 2022. Nitrification inhibitor application at stem elongation stage increases soil nitrogen availability and wheat nitrogen use efficiency under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(11), pp. 2020–2037. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2132387>
- Shalmani, M.A.M., Zaman, M., Rudsari, M.K. and Feiziasl, V., 2026. Enhancing Wheat Nitrogen Uptake Through the Combined Use of Crop Residues and Nitrification Inhibitors. *International Journal of Plant Production*. 20(41). <https://doi.org/10.1007/s42106-026-00424-z>
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera., 2024. Estadísticas agrícolas. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon?idiom=es> (Consulta 30 de junio 2024)
- SMN. Servicio Meteorológico Nacional., 2025. Normales climatológicas del estado de Baja California. Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Normales9120/bc/nor9120_02141.txt (Consulta 8 de agosto 2025)
- Solis, M.E., y Díaz de León, T.J.G., 2001. Efecto de los factores controlables de la producción sobre el rendimiento y la panza blanca del grano en trigo duro. *Terra Latinoamericana*, 19(4), pp. 375–383. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319410.pdf>

- Sun, G., Qi, Z., Yin, W. and Dong, Y., 2026. Effects of Natural Rubber-Modified Epoxy Resin and NBPT/DMPP Dual Coated Urea on Soil Available Nitrogen Conversion and Wheat/Maize Growth: Assessment by PCA Analysis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-026-03407-1>
- Tapia-Hernández, J.A., Madera-Santana, T.J., Rodríguez-Félix, F. and Barreras-Urbina, C.G., 2022. Controlled and Prolonged Release Systems of Urea from Micro and Nanomaterials as an Alternative for Developing a Sustainable Agriculture: A Review. *Journal of Nanomaterials*, 2022 (1), pp. e5697803. <https://doi.org/10.1155/2022/5697803>
- Tong, B., Hou, Y., Wang, S. and Ma, W., 2022. Partial substitution of urea fertilizers by manure increases crop yield and nitrogen use efficiency of a wheat–maize double cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 127(1), pp. 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10705-022-10219-z>
- Villar, J.M. and Guillaumes, E., 2010. Use of nitrification inhibitor DMPP [3,4-dimethylpyrazole phosphate] to improve nitrogen recovery in irrigated wheat on a calcareous soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(4), pp. 1218–1230. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1241>
- Wang, H., Ma, S., Shao, G. and Dittert, K., 2021a. Use of urease and nitrification inhibitors to decrease yield-scaled N₂O emissions from winter wheat and oilseed rape fields: A two-year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, pp. e107552. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107552>
- Wang, J., Qian, R., Li, J., Wei, F., Ma, Z., Gao, S., Sun, X., Zhang, P., Cai, T., Zhao, X., Chen, X. and Ren, X., 2024. Nitrogen reduction enhances crop productivity, decreases soil nitrogen loss and optimizes its balance in wheat-maize cropping area of the Loess Plateau, China. *European Journal of Agronomy*, 161, pp. e127352. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127352>
- Wang, Y., Wang, D., Tao, Z., Yang, Y., Gao, Z., Zhao, G. and Chang, X., 2021b. Impacts of nitrogen deficiency on wheat (*Triticum aestivum* L.) grain during the medium filling stage: Transcriptomic and Metabolomic Comparisons. *Frontiers in Plant Science*, 12, pp. e674433. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.674433>
- Xu, B., Jia, Y., Feng, J., Yang, Y., Ma, G., Zhang, Y., 2025. Comparative proteome and weighted gene co-expression network analyses uncover the mechanism of wheat grain protein accumulation in response to nitrogen fertilizer application, *Foods*, 14(9), pp. e1481. <https://doi.org/10.3390/foods14091481>
- Yang, M., Fang, Y., Sun, D. and Shi, Y., 2016. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 6(1), pp. e22075. <https://doi.org/10.1038/srep22075>
- Zhang, J., Liu, Y., Wang, P., Zhao, Y., Zhu, Y. and Xiao, X., 2025. The effect of protein–starch interaction on the structure and properties of starch, and its application in flour products. *Foods*, 14(5), pp. e778. <https://doi.org/10.3390/foods14050778>
- Zörb, C., Ludewig, U. and Hawkesford, M. J., 2018. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. *Trends Plant Science*, 23(11), pp. 1029–1037. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.012>