

# IMPACTO DEL FÓSFORO EN LAS ETAPAS FENOLÓGICAS DEL TRIGO EN LA ARAUCANÍA: ANÁLISIS MEDIANTE MODELADO BIOCLIMÁTICO

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad Católica de Temuco, Temuco, 4813302, Chile.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Carillanca, km 10 camino Cajón-Vilcún s/n, Casilla 929, Temuco, Chile

\*Autor de correspondencia: wcampillay@uct.cl

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial por su aporte esencial en la seguridad alimentaria y nutricional (Akter and Rafiqul Islam, 2017). En Chile, la Región de La Araucanía concentra la mayor superficie de cultivo de trigo, destacándose como un eje productivo clave del sur del país, tanto en rendimiento como en diversidad varietal (Hirzel et al., 2017; Lizana and Calderini, 2013). El rendimiento y el desarrollo del trigo dependen fuertemente de la disponibilidad de nutrientes esenciales, siendo el fósforo (P) uno de los más relevantes por su papel en el crecimiento radicular, la floración y la formación de granos (Batten, 1992). No obstante, el uso agrícola del fósforo enfrenta limitaciones importantes debido a su baja movilidad en el suelo, su tendencia a fijarse en formas no disponibles para las plantas y su potencial impacto negativo sobre la calidad ambiental. Además, su efecto específico sobre las etapas fenológicas del cultivo aún no ha sido evaluado en profundidad. El modelado fenológico constituye una herramienta clave para comprender y predecir el desarrollo de los cultivos frente a distintas condiciones ambientales y prácticas de manejo. En frutales como vid, cerezo y peras, se han desarrollado y validado diversos enfoques de modelado matemático, entre los que destacan los modelos bioclimáticos basados en grados día acumulados (Campillay-Llanos et al. 2025; Ortega-Farías et al. 2024). Este tipo de enfoques no ha sido aplicado sistemáticamente en cultivos anuales como el trigo. Su aplicación al trigo representa, por tanto, una propuesta metodológica innovadora, especialmente relevante bajo las condiciones agroclimáticas de la Región de La Araucanía. En este contexto, monitorear con precisión el ciclo fenológico del trigo resulta fundamental para evaluar el impacto de la fertilización fosforada sobre su desarrollo.

## Materiales y métodos

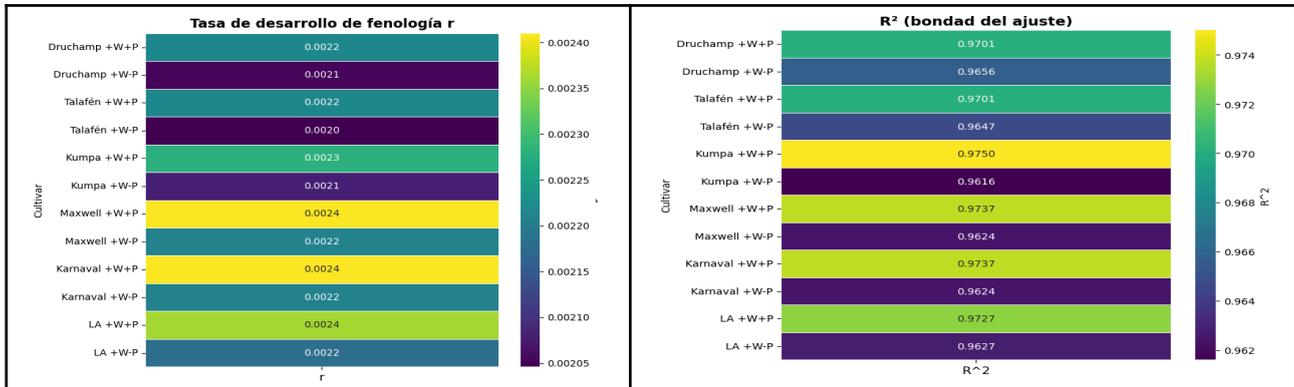
El ensayo se realizó sobre un Andisol volcánico (Serie Temuco) en el Centro Regional de Investigación INIA Carillanca, Temuco, Chile (38°41' S, 72°25' W), bajo un diseño de parcelas divididas completamente aleatorizado. El factor principal correspondió a la disponibilidad de fósforo en dos niveles: basal (-P, 10 mg P kg<sup>-1</sup>) y alto (+P, 30 mg P kg<sup>-1</sup>) mediante aplicación de superfosfato triple (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Se evaluaron seis cultivares de trigo de invierno representativos de distintas etapas de mejoramiento genético: Druchamp (1940), Talafén (1982), Kumpa (2002), Maxwell (2012), Karnaval (2023) y una línea avanzada LA (2025), sembrados el 15 de julio en parcelas de 6 m<sup>2</sup>. Las condiciones climáticas se monitorearon mediante la estación meteorológica de INIA Carillanca. Para describir el desarrollo fenológico del trigo bajo distintos tratamientos de manejo, se empleó un modelo monomolecular estocástico, el cual representa un crecimiento que inicia de forma lenta, se acelera progresivamente y luego se desacelera al aproximarse a un valor máximo (cosecha), en función de los grados día acumulados (GDD). Se utilizó la variable respuesta PS como indicador de las etapas fenológicas, asociando PS=10 con germinación, PS=20 con producción de hojas, PS=30 con macollos, PS=40 con encañado, PS=50 con vaina engrosada, PS=60 con espigado, PS=65 con antésis, PS=70 con estado lechoso del grano, PS=75 con estado pastoso y PS=80 con madurez.

## Resultados

Los resultados obtenidos mediante el ajuste del modelo monomolecular, complementado con simulaciones estocásticas, evidencian diferencias significativas en la dinámica fenológica del trigo bajo tratamientos contrastantes de manejo nutricional. En general, la aplicación de fósforo (+P), combinada con riego (+W), acelera el desarrollo fenológico, como lo reflejan los mayores valores del parámetro  $r$ . Esta aceleración permite que las plantas alcancen más rápidamente etapas fenológicas, lo que podría traducirse en ventajas agronómicas, especialmente bajo condiciones de ventanas climáticas estrechas o riesgos de estrés. Sin embargo, la magnitud de la respuesta al tratamiento con fósforo varía entre variedades. Cultivares como Kumpa, Maxwell, Karnaval y LA mostraron una sensibilidad particularmente alta a la fertilización fosforada, evidenciando ajustes más precisos y mayor eficiencia en la acumulación térmica bajo +W+P. En contraste, Druchamp y Talafén presentaron una respuesta más estable entre tratamientos, lo que sugiere una menor dependencia del fósforo en sus patrones de desarrollo.

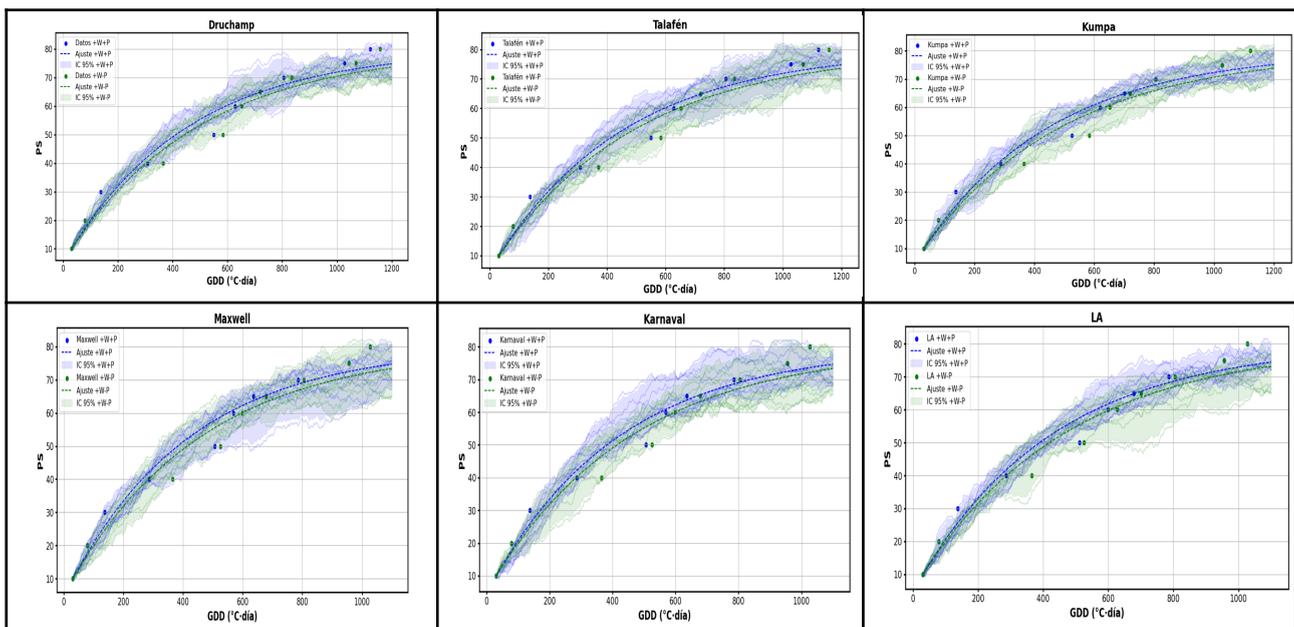
## Conclusión

Estos hallazgos destacan la importancia de ajustar las prácticas de manejo nutricional a la especificidad genética de cada variedad. La integración de modelos deterministas y estocásticos permite no solo caracterizar el comportamiento medio, sino también capturar la incertidumbre asociada a las condiciones ambientales, lo que es clave para la planificación agronómica y la selección varietal en contextos de cambio climático.



**Figura 1.** Mapa de calor del parámetro  $r$  estimado a partir del ajuste del modelo monomolecular desplazado para cada cultivar bajo los tratamientos +W+P y +W-P. Se observa una mayor tasa de respuesta en los tratamientos con +W+P en la mayoría de los cultivares.

**Figura 2.** Mapa de calor del coeficiente de determinación  $R^2$ , que representa la bondad del ajuste del modelo monomolecular desplazado en cada tratamiento y cultivar. Valores cercanos a 1 indican un ajuste adecuado entre el modelo y los datos observados.



**Figura 3.** Representación del comportamiento fenológico estimado para las seis variedades, combinando ajuste determinista y simulaciones estocásticas bajo los tratamientos +W+P y +W-P. El modelo permite describir tanto la tendencia general como la incertidumbre asociada al desarrollo fenológico.

## Bibliografía

- Akter, N., & Rafiqul Islam, M. (2017). Heat stress effects and management in wheat. A review. *Agronomy for sustainable development*, 37, 1-17.
- Batten, G. D. (1992). A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and soil*, 146, 163-168.
- Campillay-Llanos, W., Ahumada, L., Ortega-Farías, S., Díaz, G., & López-Olivari, R. (2025). Phenological analysis through biomathematical models of three varieties of pear (*Pyrus communis* L.) in Mediterranean climate conditions. *Ecological Modelling*, 483, 110626.
- Hirzel, J., Retamal-Salgado, J., Walter, I., & Matus, I. (2017). Cadmium accumulation and distribution in plants of three durum wheat cultivars under different agricultural environments in Chile. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(1), 77-88.

- Lizana, X. C., & Calderini, D. F. (2013). Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination: considerations for the climatic change scenarios of Chile. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 209-221.
- Ortega-Farías, S., Campillay-Llanos, W., & Ahumada-Orellana, L. (2024). Biomathematical modeling and phenology in sweet cherry: Addressing the challenges of climate change. *IEEE CHILECON*, 1–6