



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

ALOMETRÍA ENTRE LA ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y EL AGUA TRANSPIRADA EN MAÍZ: ¿EN QUE MEDIDA ES MODULADA POR LA DENSIDAD DE PLANTAS, EL NITRÓGENO Y EL AGUA?

Vargas J.^{a*}; Maltese N.^a; Gonzalez P.^b; Ciampitti I.^c; Berger A.G.^a

a Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Estación Experimental La Estanzuela, Ruta 50 km 11, El Semillero, Colonia, Uruguay.

b Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDELAR), Av. Gral. Eugenio Garzón 780, 12900, Montevideo, Uruguay.

c Kansas State University, Department of Agronomy, 1712 Claflin Road, Manhattan, KS 66506, Estados Unidos.

*Autor de correspondencia: Joaquín Vargas. INIA La Estanzuela, Ruta 50 km 11, Colonia, Uruguay. E-mail: joaquinvargas1998@gmail.com

MAIZE NITROGEN UPTAKE AND TRANSPIRED WATER ALLOMETRY: HOW FAR IS IT MODULATED BY PLANTING DENSITY, NITROGEN AND WATER SUPPLY?

Understanding how nitrogen (N) uptake relates to crop transpiration is key to improving in-season N management in maize (*Zea mays* L.) under variable climatic conditions. This study evaluated the stability of the allometric relationship between N uptake and transpired water (T), and its potential as a predictive tool for N fertilization across environments differing in plant density, N rate and water supply. Three field experiments were conducted in La Estanzuela, Uruguay (2022-2024), combining planting densities (3-12 plants m⁻²), N availability (0N and Full N) and irrigation regimes. Cumulative transpiration was estimated with the FAO-56 model (pyFAO56) using measured canopy height, cover, NDVI, biomass, and N uptake were determined through destructive sampling at seven phenological stages. Biomass, transpiration, and N uptake were tightly coupled across environments. A previously proposed transpiration-based N uptake model was evaluated with the observed data, showing a good overall fit, although the locally fitted parameters ($a=23.8$; $b=0.82$) differed significantly ($p<0.01$) from the reference values, indicating that regional calibration is required. These preliminary findings support developing a transpiration-based framework, combined with remotely sensed variables, to estimate in-season maize N demand and improve N fertilization decisions under variable water availability.

Palabras clave: Absorción de nitrógeno; Eficiencia de uso de agua; Densidad de siembra; Modelo alométrico; Manejo de nitrógeno

Keywords: Nitrogen uptake; Water use efficiency; Planting density; Allometric model; Nitrogen management

1. Introducción

A nivel global, la disponibilidad de nitrógeno (N) y de agua constituyen las principales limitantes de la productividad de los cultivos (Sinclair y Rufty, 2012). En Uruguay, la disponibilidad hídrica ha sido identificada como el factor más limitante para la productividad de los cultivos debido a su elevada variabilidad interanual (Rizzo et al., 2022). En maíz (*Zea mays* L.), la fertilización nitrogenada se guía habitualmente por criterios de oferta, utilizando umbrales críticos de nitrato en el suelo a la siembra y en



V6 (Ritchie y Hanway, 1982), frecuentemente sin considerar el potencial de crecimiento del cultivo ni las aplicaciones tardías de N (posteriores a V6), que podrían mejorar la sincronía entre oferta y demanda (Cassman et al., 2002; Fernandez et al., 2020).

La curva crítica de dilución de N ($N_{crit} = aW^b$) permite estimar la concentración crítica de N en función de la biomasa (Plénet y Lemaire, 1999) y sustenta el cálculo del índice de nutrición nitrogenada (NNI) (Lemaire y Gastal, 1997), un indicador robusto pero de aplicación limitada a nivel de producción por requerir muestreo destructivo de plantas y posterior análisis de laboratorio. Dado que la producción de biomasa guarda una relación conservativa con la transpiración del cultivo (Steduto et al., 2007), resulta plausible que la absorción de N esté estrechamente vinculada a la transpiración acumulada, tal como reportaron Kunrath et al. (2020), aunque la universalidad de esta relación y su utilidad para pronosticar requerimientos de N no han sido suficientemente exploradas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la estabilidad de la relación entre la absorción de N y el agua transpirada, y explorar su utilidad como herramienta predictiva para la fertilización nitrogenada del maíz bajo escenarios contrastantes de densidad de siembra, N y agua.

2. Materiales y Métodos

Se condujeron tres experimentos de campo en INIA La Estanzuela, Uruguay (34°20'23,72" S – 57°41'39,48" O) durante dos zafra consecutivas (Exp1: 2022-2023, siembra 15/12/2022; Exp2: 2023-2024, siembra temprana 01/10/2023; Exp3: 2023-2024, siembra tardía 12/12/2023), con el híbrido PWUE2021. El diseño fue en franjas divididas (strip-split-plot) con tres repeticiones, combinando cuatro densidades de plantas (3, 6, 9 y 12 plantas m⁻²), dos regímenes hídricos (riego y seco) y dos niveles de N (0N y una dosis suficiente de 178-218 kg N ha⁻¹, fraccionada en 3-4 aplicaciones y utilizando como fuente urea).

Se realizaron muestreos de biomasa en siete estadios fenológicos (V4, V6, V10, V12, R1, R3 y R6), determinando biomasa, concentración y absorción de N. La transpiración acumulada se estimó con el paquete pyFAO56 (Thorp, 2022), utilizando altura de planta, cobertura del suelo y NDVI medidos semanalmente para derivar los coeficientes Kcb (Johnson y Trout, 2012). Con estos datos y los registros de riego aplicado y precipitaciones se simuló la disponibilidad hídrica durante el ciclo del cultivo. La eficiencia de uso de agua transpirada (EUAt) se estimó mediante regresión lineal entre biomasa y transpiración acumulada. Se evaluó el modelo de absorción de N basado en transpiración de Kunrath et al. (2020) [$N = A(T_{Emax} \cdot T)^B$, con $T_{Emax} = 0,0573 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$], ajustando los parámetros locales A y B para cada combinación de densidad × N × riego mediante mínimos cuadrados no lineales (paquete minpack.lm) y comparando los valores estimados con los de referencia (A=34; B=0,63) mediante prueba t (R Core Team, 2024). El ajuste del modelo se evaluó con el paquete Metrica (Correndo et al., 2022).

3. Resultados y discusión

La biomasa, la absorción de N y la transpiración acumulada estuvieron estrechamente asociadas en los tres experimentos, aunque la magnitud de la respuesta a la densidad, al riego y al N varió según las condiciones edafoclimáticas de cada sitio: el Exp1 estuvo determinado principalmente por el déficit hídrico, el Exp3 por la baja disponibilidad de N, y el Exp2 -sin limitaciones severas- permitió observar con mayor claridad el rol de la



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

densidad de siembra en la explotación de condiciones favorables (Tabla 1). Todas las respuestas a los tratamientos se manifestaron a partir de R1, tanto en la acumulación de biomasa como en la de N, consistente con el enfoque alométrico de Lemaire et al. (2019), según el cual la tasa de acumulación de N por unidad de biomasa es mayor en los estadios vegetativos tempranos y declina posteriormente.

Tabla 1. Condiciones climáticas y riego aplicado por experimento. ETref: evapotranspiración de referencia.

Experimento	Fecha de siembra	Lluvia (mm)	ETref (mm)	Riego aplicado (mm)
Exp1	15-dic-2022	255	761	347
Exp2	01-oct-2023	448	929	339
Exp3	12-dic-2023	815	718	85

La eficiencia de uso del agua transpirada (EUAt) mostró cambios significativos asociados a la disponibilidad de N, el riego, la densidad de siembra y sus interacciones (Figura 1). En general, una mayor fertilización nitrogenada y una mayor densidad de plantas tendieron a incrementar la EUAt, mientras que el riego la redujo (excepto en el Exp3 con fertilización), dado que las parcelas regadas transpiraron más agua sin un incremento proporcional en la acumulación de biomasa.

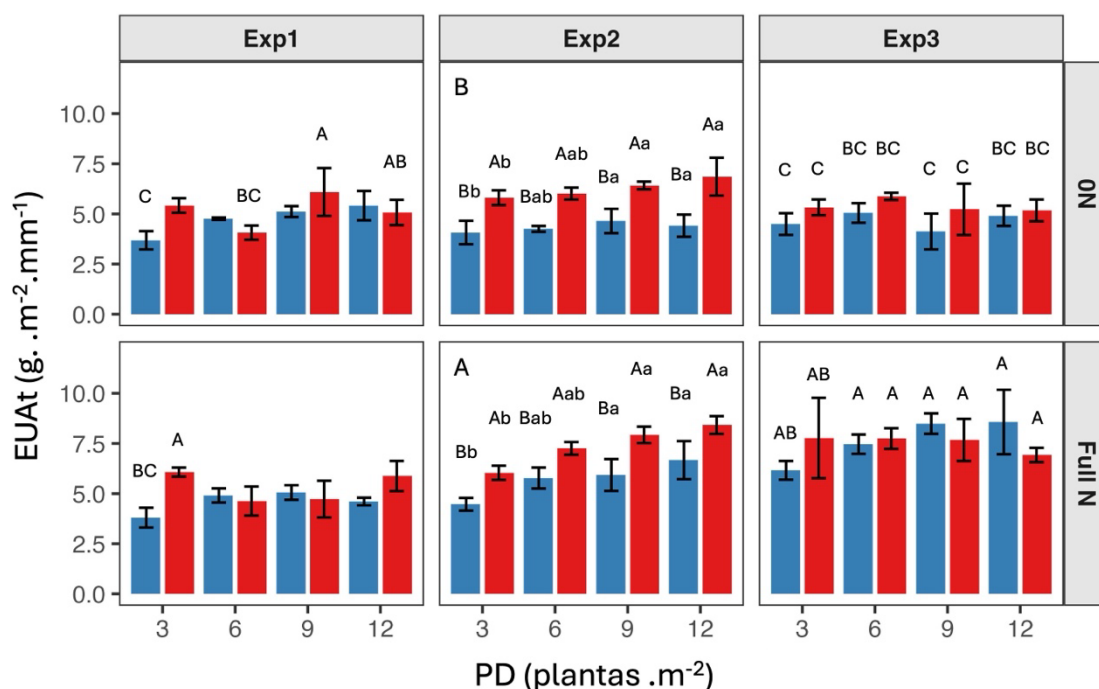


Figura 1: Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la eficiencia de uso de agua transpirada (EUAt) en los tres experimentos de campo (Exp1, Exp2, Exp3) bajo regímenes contrastantes de nitrógeno (N full vs. 0N). Los niveles de densidad de siembra (PD) se muestran en el eje x, mientras que los colores distinguen los tratamientos de disponibilidad de agua: rojo (secano) y azul (irrigado). Las barras de error corresponden al error estándar. Letras diferentes indican medias diferentes estadísticamente ($p < 0,05$). En el Exp1, en la interacción densidad de siembra x riego x N. En el Exp2, las letras mayúsculas se refieren al riego, las minúsculas a la densidad de siembra, y las mayúsculas de panel al N. En el Exp3, las letras muestran diferencias significativas a nivel de densidad de siembra x N.

La curva crítica de absorción de N fue común a los tres experimentos (Figura 2): los ambientes con mayor tasa de crecimiento del cultivo (Exp1 y Exp2) presentaron más puntos alineados con la curva de referencia, mientras que el Exp3 -con las condiciones de crecimiento más restrictivas (baja radiación, bajo N y lluvias excesivas)- se alejó de dicha curva, excepto en la densidad de 3 plantas m^{-2} , que fue la única que logró acoplarse, probablemente por una mayor tasa de crecimiento y de absorción de N por planta individual.

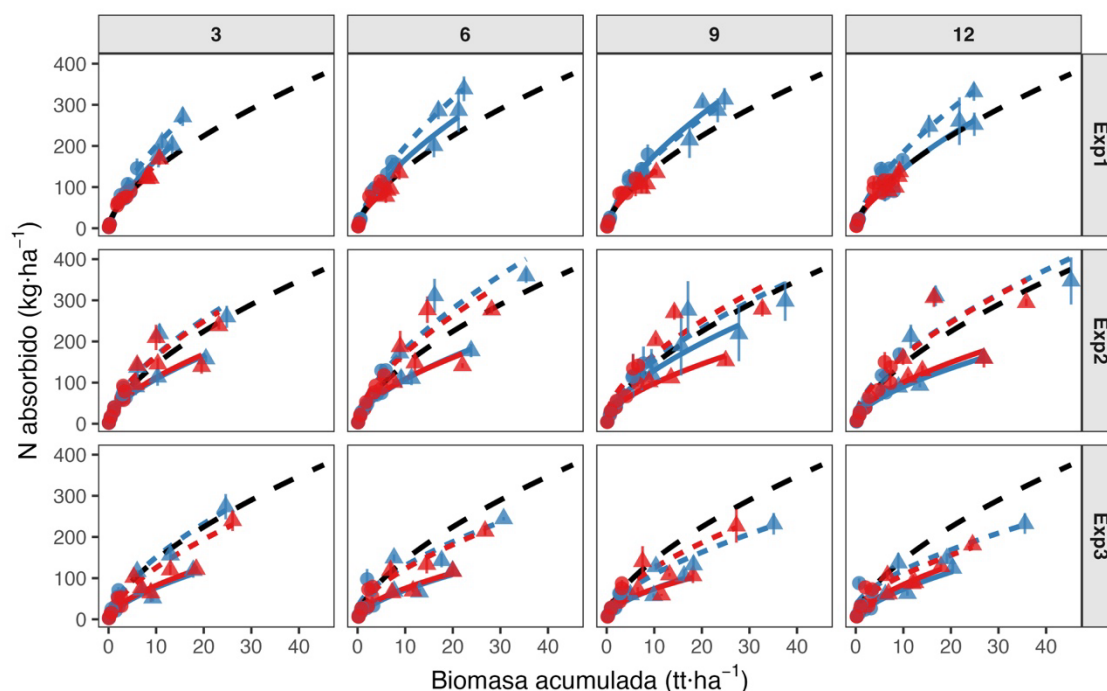


Figura 2. Absorción de N observada en función de la biomasa acumulada, por densidad de siembra (paneles) y experimento (filas). La línea negra discontinua es la curva crítica de absorción de N de referencia para maíz (Lemaire et al., 2019). Las curvas roja y azul son los ajustes locales para secano y riego, respectivamente (línea llena: control sin nitrógeno (0N); línea discontinua: N de suficiencia). Los círculos corresponden a muestreos en estadios vegetativos y los triángulos a muestreos en estadios reproductivos.

El modelo de absorción de N basado en la transpiración (Figura 3), mostró concordancia con los datos observados, aunque la fertilización nitrogenada tuvo el mayor impacto sobre la capacidad predictiva, con mayores desvíos en las parcelas sin fertilizar (0N), tanto en secano como en riego. La densidad de siembra, en cambio, no afectó sustancialmente el ajuste del modelo, algo que podría estar explicado por la estabilidad en la eficiencia de uso del agua transpirada entre densidades de siembra.

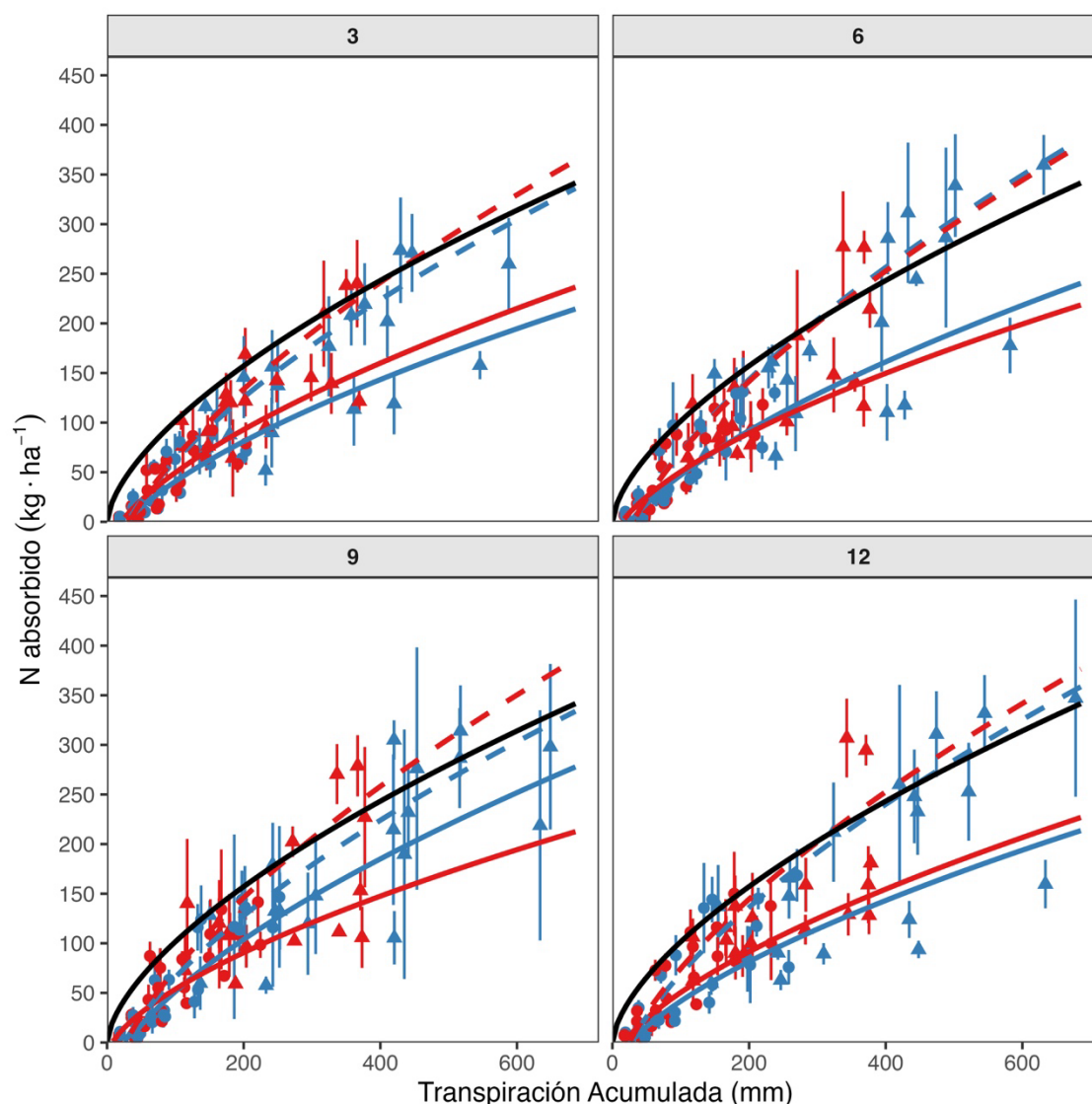


Figura 3. Absorción de nitrógeno observada en función del agua transpirada acumulada, por densidad de siembra (pl m^{-2}) (paneles). La curva negra corresponde al modelo de referencia (Kunrath et al., 2020); las curvas roja y azul son los ajustes locales para seco y riego, respectivamente (línea llena: control sin nitrógeno (0N); línea discontinua: N de suficiencia). Los círculos corresponden a muestreos en estadios vegetativos y los triángulos a muestreos en estadios reproductivos.

Los parámetros locales del modelo (A y B) difirieron significativamente de los valores de referencia ($p < 0,01$): el parámetro A (N acumulado en biomasa aérea cuando esta alcanza 1 Mg ha^{-1}) ajustado localmente ($23,8 \text{ kg N ha}^{-1}$) fue menor al de referencia (34 kg N ha^{-1}), con una elevada variabilidad asociada principalmente a la disponibilidad de N por planta (interacción densidad $\times$ fertilización); el parámetro B, que describe el patrón de absorción de N a medida que el cultivo transpira, fue mayor al de referencia ($0,82$ vs. $0,63$; $p < 0,01$), con menor variabilidad, lo que permitió detectar diferencias significativas entre grupos (Figura 4): los valores más bajos se asociaron a tratamientos de seco y/o sin fertilización (0N). Al promediar por factor, las mayores diferencias se explicaron por el N ($0,71$ y $0,90$ para 0N y N de suficiencia, respectivamente) y por el



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

riego (0,83 y 0,77 para condición de riego y seco, respectivamente), mientras que la densidad de siembra no mostró diferencias notorias entre niveles.

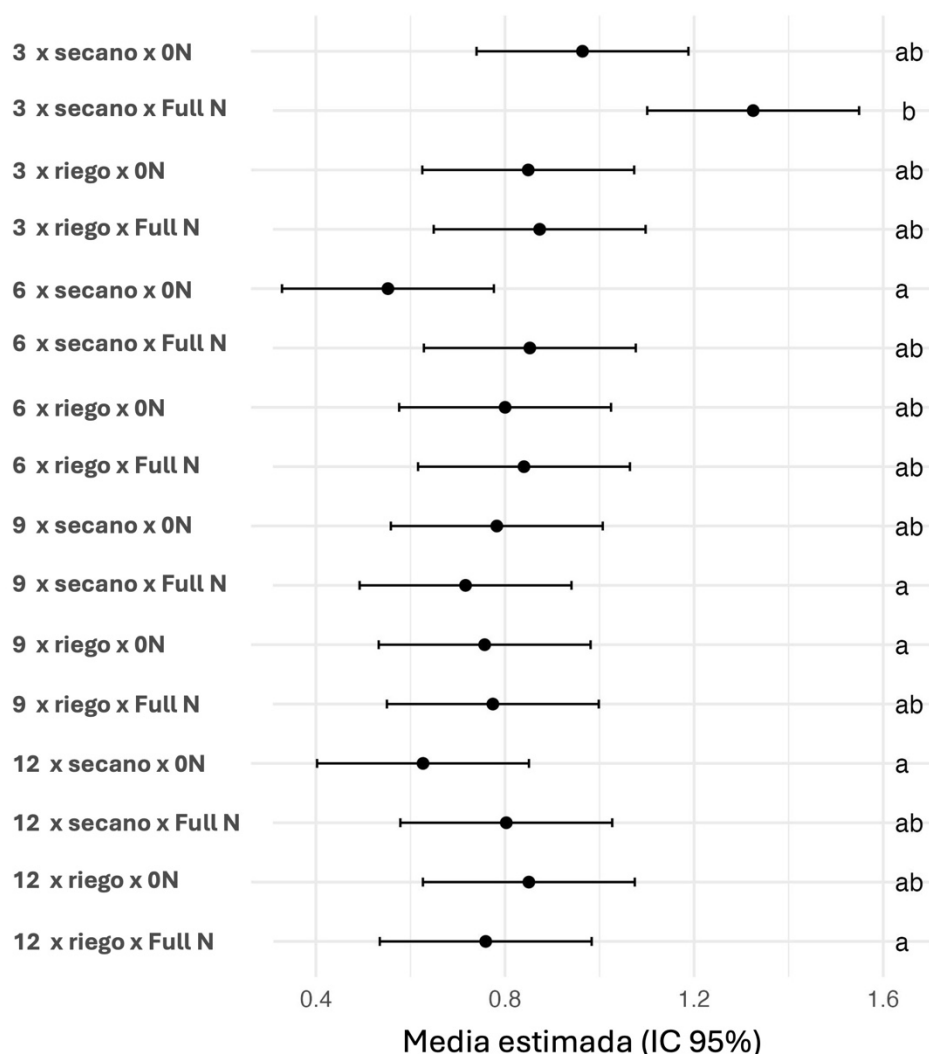


Figura 4. Valores medios estimados del parámetro B para las 16 combinaciones de densidad de siembra (3pl.m^{-2} , 6pl.m^{-2} , 9pl.m^{-2} , 12pl.m^{-2}), riego (Irrigado y Seco) y nivel de N (0N, Full N). Las barras indican el intervalo de confianza 95%; letras distintas indican diferencias significativas entre grupos ($p < 0,05$).

Estos resultados sugieren que la trayectoria de absorción de N del cultivo está determinada principalmente por la disponibilidad de N a lo largo del ciclo, y en menor medida por la disponibilidad de agua y la densidad de plantas, las cuales definirían más bien el techo máximo de N que el cultivo puede absorber. Esto respalda la posibilidad de utilizar una curva de calibración local única para distintas densidades y regímenes hídricos, reservando los ajustes específicos para escenarios de disponibilidad de N contrastante.

4. Conclusiones

La disponibilidad de N fue el principal factor que determinó la magnitud y la dinámica de la absorción de N, mientras que la disponibilidad de agua y la densidad de plantas definieron el techo alcanzable de acumulación de N. El agua transpirada, la cual



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

se puede estimar a partir de información remota o modelada, podría constituir una variable integradora confiable para pronosticar los requerimientos de N durante el ciclo del cultivo.

La evaluación preliminar del modelo de absorción de N basado en transpiración en ambientes contrastantes demostró capacidad de capturar variaciones en la demanda de N por parte del cultivo, aunque requiere calibración local de sus parámetros para reflejar las interacciones específicas de suelo, clima y manejo de cada región. Como próximo paso, se plantea profundizar en la estimación de biomasa y transpiración a partir de sensores remotos, con el fin de desarrollar una herramienta de recomendación de fertilización nitrogenada sitio-específica para el cultivo de maíz en Uruguay.

Apoyo financiero

Este trabajo fue financiado por INIA (SAG_08_0_00 PEI 2021-2025) y ANII (POS_NAC_2022_2_174112).

Referencias bibliográficas

- Cassman, K.G.; Dobermann, A.; Walters, D.T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31, 132–140.
- Correndo, A.A.; Rosso, L.H.M.; Hernandez, C.H.; Bastos, L.M.; Nieto, L.; Holzworth, D.; Ciampitti, I.A. 2022. metrica: an R package to evaluate prediction performance of regression and classification point-forecast models. *Journal of Open Source Software* 7, 4655.
- Fernandez, J.A.; DeBruin, J.; Messina, C.D.; Ciampitti, I.A. 2020. Late-season nitrogen fertilization on maize yield: A meta-analysis. *Field Crops Research* 247, 107586.
- Johnson, L.F.; Trout, T.J. 2012. Satellite NDVI-assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing* 4, 439–455.
- Kunrath, T.R.; Lemaire, G.; Teixeira, E.; Brown, H.E.; Ciampitti, I.A.; Sadras, V.O. 2020. Allometric relationships between nitrogen uptake and transpiration to untangle interactions between nitrogen supply and drought in maize and sorghum. *European Journal of Agronomy* 120, 126145.
- Lemaire, G.; Gastal, F. 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*, Springer, Berlín.
- Lemaire, G.; Sinclair, T.; Sadras, V.; Bélanger, G. 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 39, 27.
- Plénet, D.; Lemaire, G. 1999. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops: Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216, 65–82.
- Ritchie, S.W.; Hanway, J.J. 1982. How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48, Iowa State University of Science and Technology, Ames.
- Rizzo, G.; Mazzilli, S.R.; Ernst, O.; Baethgen, W.E.; Berger, A.G. 2022. Season-specific management strategies for rainfed soybean in the South American Pampas based on a seasonal precipitation forecast. *Agricultural Systems* 196, 103331.
- Sinclair, T.R.; Rufty, T.W. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* 1, 94–98.
- Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25, 189–207.
- Thorp, K.R. 2022. pyfao56: FAO-56 evapotranspiration in Python. *SoftwareX* 19, 101208.