

RECOMENDACIÓN DINÁMICA DE N EN MAÍZ BASADO EN LA PREDICCIÓN DEL AGUA TRANSPIRADA

Vargas, J^{1*}; Capurro, M.C.¹; Otero, A.²; Maltese, N.¹; Berger, A.G.^{1*}

¹ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), estación experimental La Estanzuela, Ruta 50 km 11, El Semillero, Colonia, Uruguay

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), estación experimental Salto Grande, Camino al Terrible, Salto, Uruguay

*E-mail: joaquinvargas1998@gmail.com; aberger@inia.org.uy

INTRODUCCIÓN

En Uruguay el cultivo de maíz es el segundo cultivo de verano de mayor relevancia después de la soja. Actualmente, el cultivo se encuentra en una etapa de pleno crecimiento en área, pasando de menos de 65,000 ha en el ciclo agrícola 2016/2017 a 140,000 ha en 2021/2022 acompañado de un fuerte crecimiento del maíz de segunda o tardío, que casi equipara en área a siembras tradicionales de primera (72,344 y 80,015 ha, respectivamente) (DIEA, 2022). La superficie regada en Uruguay también se encuentra en pleno desarrollo, en el año 2021/2022 se observó el mayor crecimiento en el área regada de maíz, alcanzando más de 20,000 ha (DIEA, 2022) incentivado por beneficios tributarios y por su capacidad de incrementar y estabilizar los rendimientos. Los sistemas productivos de secano ocurren en mayor proporción en suelos someros con poca capacidad de almacenaje de agua, lo que lleva a una gran variabilidad interanual en la producción de maíz a nivel nacional.

Mundialmente, las principales limitantes para la producción de cultivos son la disponibilidad de nitrógeno (N) y la disponibilidad agua (Sinclair & Rufty, 2012). En Uruguay, Rizzo et al (2022) definen que la mayor limitante para la producción de cultivos es la disponibilidad hídrica, producto de la alta variabilidad interanual que estas presentan comparado con otras regiones. Por tanto, definir prácticas de manejo específicas para cada año y cultivo parece ser la mejor estrategia para lograr una mayor estabilidad de los rendimientos y a la vez adaptar el manejo a los recursos disponibles.

La fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en Uruguay se realiza desde una lógica que contempla únicamente la oferta, utilizando niveles críticos de concentración de nitratos en suelo a siembra y V6 (Ritchie et al., 1982). Esta metodología genera interrogantes sobre la capacidad de mineralización de N de cada suelo en particular, y sobre la capacidad del cultivo de utilizar el N aplicado sin considerar la capacidad de crecimiento del cultivo. Tampoco contempla la fertilización tardía en maíz, es decir posterior a V6, una táctica que permitiría

una mayor sincronía entre oferta y demanda del N evitando pérdidas no deseadas de N del sistema (Cassman et al., 2002). Fernandez et al. (2020) a través de un metaanálisis, reportó efectos positivos de la fertilización tardía de N (pos-V10) en ambientes con potencial de absorción de N en estadios reproductivos, aunque aún no existe una metodología que permita estimar la dosis de N a aplicar.

Los cultivos siguen trayectorias bien definidas en términos de producción de biomasa pudiendo mostrar cierta plasticidad frente a diferentes condiciones ambientales (Weiner, 2004). Existe una relación entre la absorción de un nutriente y la acumulación de biomasa (Lemaire et al., 2008, Lemaire et al., 2019), que da lugar a la curva de dilución de N crítica ($N_{crit} = a W b$, donde a y b son constantes y W es la acumulación de materia seca por unidad de superficie). Esta curva, permite estimar la concentración de N crítica en función de la biomasa del cultivo (Plenet y Lemaire., 1999). Si bien la universalidad de esta relación es cuestionada, existe escasa variabilidad en sus coeficientes dada principalmente por la combinación híbrido x manejo (Ciampitti et al., 2021).

De dicha relación empírica, surge el concepto de índice de nutrición nitrogenada (Lemaire y Gastal, 1997) sugerido por Fernandez et al (2020) como un indicador robusto, pero de muy difícil implementación a nivel de producción. La necesidad de muestrear plantas de forma representativa, y analizar el contenido de N de la materia seca limitan su uso a lo experimental.

Partiendo de la base de que por un lado existe de la curva de dilución de N crítica, y por otro lado existe una relación altamente conservada entre la productividad de materia seca (**Figura 1A**) y la transpiración del cultivo (Steduto et al., 2007) (**Figura 1B**) es posible generar la hipótesis de que la cantidad de nitrógeno acumulada está estrechamente asociada a la cantidad de transpiración acumulada por el cultivo (**Figura 1D**). Esto ha sido reportado por Kunrath et al. (2018), aunque no existe certeza de la universalidad de esta relación, ni tampoco se ha planteado su uso para el diagnóstico de necesidades futuras de N del cultivo. Implícito en este razonamiento

esta la necesidad de disectar la evapotranspiración entre el agua evaporada y la efectivamente transpirada por el cultivo (**Figura 2C**).

La estimación de la producción de biomasa basado en la eficiencia del agua transpirada permitiría una estimación más certera que a través de la eficiencia de uso de la radiación (acumulación de biomasa, crecimiento objetivo o rendimiento objetivo) dado lo conservado de dicho

parámetro a través de diferentes ambientes (Steduto et al., 2007).

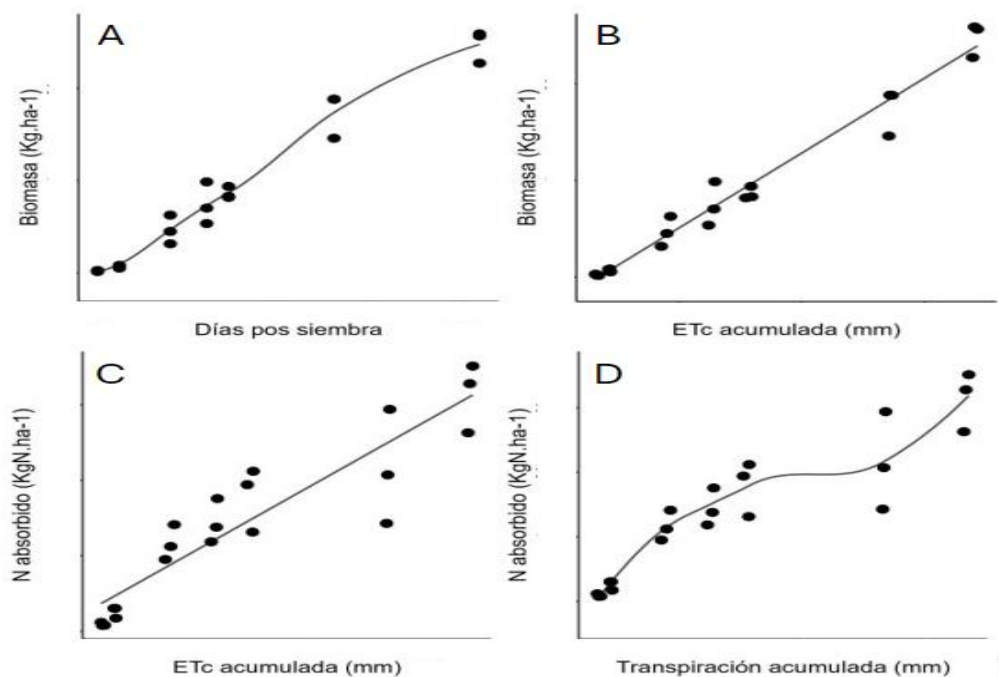


Figura 1. Resumen gráfico

El objetivo del presente trabajo es estudiar la estabilidad de la relación entre el N absorbido y el agua transpirada para luego explorar nuevas herramientas de predicción de necesidades de fertilización nitrogenada basadas en la predicción de la demanda de N por esta vía. De ser una herramienta confiable y extrapolable a diferentes ambientes, sería de gran utilidad para utilizar de forma racional y eficiente del N ante escenarios de diferente disponibilidad hídrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del sitio experimental

El ensayo se localizó en la estación experimental INIA La Estanzuela (34° 20' 23.72" S – 57° 41' 39.48" O), Colonia, Uruguay.

La serie de datos climáticos proviene de una estación meteorológica Campbell Scientific situada a 1 km del sitio experimental a excepción de la precipitación que fue registrada en el sitio experimental. El clima se caracteriza por ser cálido-templado. La temperatura media durante el verano e invierno es 23°C y 11.9°C, siendo el promedio anual de 17.5°C. Las precipitaciones promedio son 1144 mm con gran variabilidad interanual.

El suelo fue caracterizado con datos recabados en una calicata y análisis de suelo del sitio experimental (**Tabla 1**). Según el sistema de clasificación de suelos de USDA (Soil Survey Staff, 2010) el suelo se clasifica como un Argiudol Vértico esmectítico (Grahmann et al., 2020). El mismo presenta una clase textural limo-arcillosa.

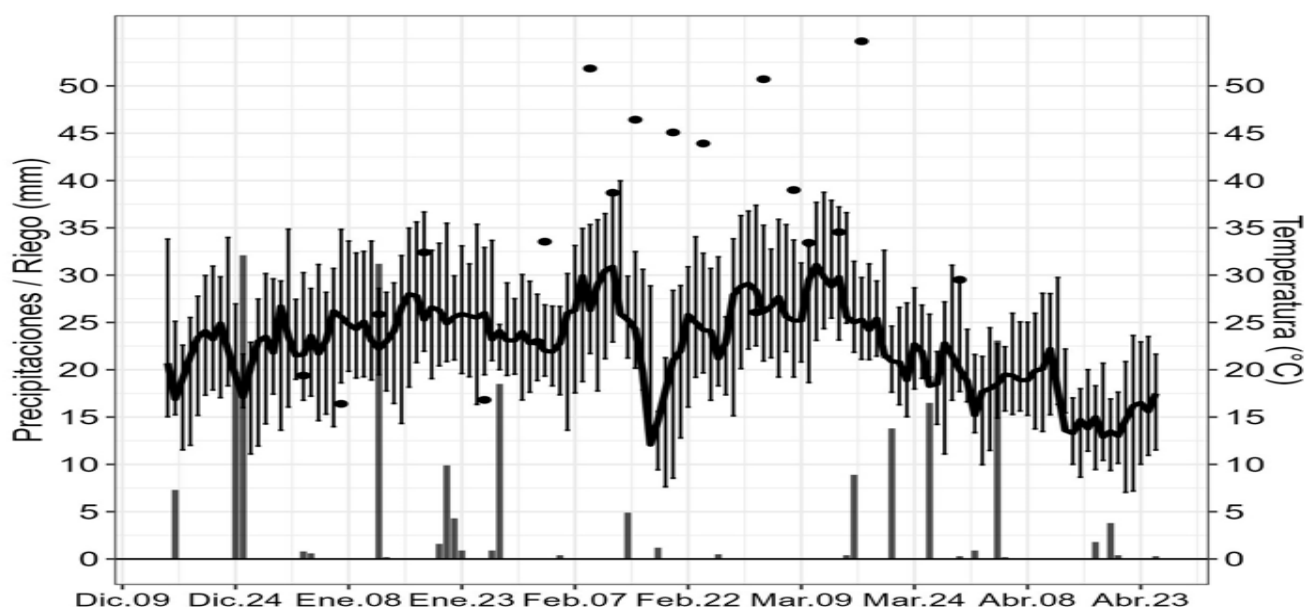


Figura 2. Distribución de precipitaciones (barras, mm), temperatura media, máxima y mínima diaria (°C) y riego aplicado (puntos, mm) en desde el 15 diciembre 2022 hasta el 25 de abril 2023.

Tabla 1. Descripción del suelo.

Prof.	pH (H ₂ O)	C.Org %	K meq/ 100g	Bray I µg P/g	PMN mg/Kg	Arena %	Limo %	Arcilla %
0-20	5.60	2.33	0.50	21.7	85	14.00	45.00	41.00
20-40	6.73	1.40	0.48	26.7	12	10.33	39.00	51.00
40-60	7.27	0.96	0.54	18.4	12	10.67	38.33	51.00

Diseño Experimental

Se realizaron 3 ensayos, uno en la zafra 2022/2023 y dos en la 2023/2024 que aún están en curso. El diseño experimental utilizado fue de parcelas sub-sub-divididas con 3 repeticiones. La parcela grande fue la densidad de siembra abarcando 4 sub sub parcelas. La sub-parcela fue la disponibilidad hídrica dada por un sistema de riego por goteo o secano, abarcando 2 de las 4 sub-sub-parcelas. Dentro de cada combinación densidad x riego se aleatorizaron los tratamientos de N (sub-sub-parcela). Se sembraron 4 densidades diferentes: 3, 6, 9 y 12 pl m⁻². Los tratamientos de disponibilidad hídrica fueron i) riego según FAO56 (umbral 50% de agotamiento del agua transpirable) y ii) secano. Para el N, hubo 2 tratamientos, un testigo sin fertilización con N (ON) para estimar el aporte del suelo y otro fertilizado sin deficiencias nutricionales.

Manejo del ensayo

El ensayo fue sembrado el 15 de diciembre de 2022 con una sembradora neumática comercial. Se tomaron muestras de suelo previo a la siembra y V6 separadas en

tres estratos: 0-20, 20-40, 40-60; para nitratos y amonio (**Tabla 2**).

Las parcelas testigo no recibieron ningún tipo de fertilización con N. En el resto de las parcelas se aplicó un total de 170 kg N ha⁻¹ distribuidos en 3 momentos: siembra (46 kg N ha⁻¹), V6 (69 kg N ha⁻¹) y entre Vt y R1 (55 kg N ha⁻¹). La fuente utilizada en todos los casos fue urea (46-0-0). Las aplicaciones se realizaron en todos los casos con previo pronóstico de precipitaciones para mitigar las pérdidas de N del sistema.

Se utilizó un sistema de riego por goteo con una pluviometría de 8mm h⁻¹. Se ubicaron cintas porta gotero (30cm entre goteros) en todas las entre hileras. El manejo del riego se realizó basado en el modelo FAO56 con doble coeficiente del cultivo propuesto por Allen et al (2005). Se utilizó un umbral de agotamiento permisible de 50% del agua transpirable para calcular los momentos de riego. El ensayo se mantuvo libre malezas, plagas y enfermedades durante todo el ciclo.

Tabla 2. Niveles pre siembra de N-NO3 y N-NH4 en el perfil de suelo. SD= desvío estándar.

Profundidad	N-NO3 µg N/g	SD	N-NH4 µg N/g	SD
0-20	11.60	2.62	10.27	1.76
20-40	4.10	0.44	9.83	0.68
40-60	3.43	0.21	8.90	1.15

Muestras y mediciones

Se realizaron 7 muestreos de biomasa en los estadíos V4, V6, V10, V12, R1, R3 y R6 para construir la curva de acumulación de materia seca, estimar la concentración de N en planta, grano y marlo. De esta forma, se ajustó la curva de N absorbido en función del agua transpirada.

El modelo FAO56 que fue utilizado para estimar evapotranspiración y su partición en transpiración y evaporación, requiere datos de cobertura de suelo, coeficiente de cultivo ajustado por cobertura (Kcb) y altura del cultivo. Semanalmente se midieron 5 plantas por parcela hasta R1. El Kcb se estimó a partir de mediciones semanales de NDVI realizadas con un equipo Rapidscan (Holland Scientific, Nebraska) y se utilizaron las ecuaciones propuestas por Johnson y Trout (2012) y Trout y DeJonge (2018). Dado que el modelo FAO56 es de paso diario se interpolaron las mediciones de cobertura y altura con el paquete Zoo (Zeileis A y Grothendieck G, 2005) en el software Rstudio (R Core Team (2021)). Las curvas de NDVI fueron interpoladas con el paquete Greenbrown (Forkel M, Wutzler T., 2015) mediante el método propuesto por Beck et al. (2006) de curva doble logística. Adicionalmente se midió la intercepción de luz con un ceptómetro Accupar LP-80 (Decagon devices, Logan Utah) y posteriormente se estimó el porcentaje de intercepción de luz diario mediante el coeficiente de extinción de luz difusa (Norman, 1985).

Modelo de predicción de la transpiración

El balance hídrico fue simulado mediante el método de doble coeficiente de cultivo de FAO56 dado que permite evaluar por separado la contribución de la evaporación y la evapotranspiración del cultivo, haciéndolo más certero para estimar la evapotranspiración en cortos períodos de tiempo (Allen et al., 2005).

La simulación fue realizada con el paquete PyFAO56 (Thorp, 2022) dado que permite realizar de forma rápida la simulación por parcela durante todo el ciclo del cultivo.

La base de datos climática utilizada para el modelo se elaboró a partir datos recabados por la estación automática de la estación experimental donde se llevó a cabo el ensayo, con excepción de la evapotranspiración de referencia se calculó con el paquete según el método

propuesto por ASCE.

La caracterización del suelo se realizó con datos de puntos de marchitez permanente y capacidad de campo (**Tabla 3**) obtenidos a partir de muestras indisturbadas tomadas en una calicata en la misma chacra según Richards y Weaver (1944) y Richards, L. A. (1956). Se caracterizó hasta los 90cm ya que fue la profundidad radicular asumida para realizar la simulación.

Se calcularon los mm de agua aplicados en cada evento de riego para utilizarlos en la simulación a partir de los datos recabados en los aforadores del sistema de riego.

Tabla 3. Contenido de agua (cm³. cm³) en puntos característicos del perfil del suelo. Capacidad de campo (0.01 MPa) y puntos de marchitez permanente (1.5MPa) cada 15cm.

Profundidad	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente	Agua disponible
0-15	0.41	0.29	0.12
15-30	0.40	0.27	0.14
30-45	0.35	0.24	0.12
45-60	0.37	0.24	0.13
60-75	0.43	0.32	0.11
75-90	0.45	0.30	0.15

Ajuste del modelo

A partir del valor de agotamiento de agua en el suelo provisto por la salida del modelo se estimó el contenido total de agua en el suelo. Para corroborar el ajuste del modelo con el contenido real de agua se realizaron medidas con sonda de neutrones en todas las parcelas cada 15 cm hasta los 90 cm.

La evaluación de la performance del modelo se realizó con el paquete Métrica (Correndo et al., 2022).

Análisis de datos

Los datos fueron analizados con el software R studio (R Core Team (2021)). Se plantearon modelos mixtos con varianzas heterogéneas según el tratamiento de riego. Posteriormente, se realizaron análisis de varianza (ANAVAs) para cada variable de respuesta y posteriormente una prueba pos-hoc para realizar el

ranking de medias y conocer cuándo hubo diferencias significativas entre tratamientos.

Por otro lado, el cálculo de las eficiencias de uso de agua transpirada (EUA) y radiación (EUR) se realizó mediante regresiones lineales entre la biomasa acumulada y la radiación o transpiración acumulada (cumT).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de biomasa, rendimiento, índice de cosecha y absorción de N

El rendimiento logrado osciló entre 2.76 y 13.6 tn ha⁻¹ con excepción de los tratamientos de baja densidad, los tratamientos regados presentaron mayor rendimiento (**Tabla 4**).

Tabla 4. Valores medios de Rendimiento (tn ha⁻¹), Producción de biomasa (tn ha⁻¹), índice de cosecha (IC), N absorbido a R1 (kg ha⁻¹) y N absorbido a R6 (kg ha⁻¹) para cada tratamiento. Nabs R1 evaluado a nivel de riego. Medias en la misma columna con diferente letra son significativamente diferentes a través del test de Tukey, con un p-valor<0.05.

Tratamiento	Rendimiento	Biomasa R6	IC	N absorbido R1	N absorbido R6
R31	6.81 cde	13.38 B	0.51AB	87.80 bc	202.00 cde
R32	9.04 bcd	15.50 B	0.58A	145.80 abc	271.00 bcd
R61	10.19 abc	21.21 A	0.48ABC	155.40 abc	286.50 abc
R62	11.00 ab	22.35 A	0.50AB	161.63 abc	338.90 ab
R91	12.86 ab	23.34 A	0.55AB	132.50 abc	286.60 ab
R92	12.88 ab	24.76 A	0.52AB	179.10 a	314.00 ab
R121	11.59 ab	24.92 A	0.46ABC	90.37 abc	252.70 ab
R122	13.60 a	24.84 A	0.55AB	165.84 ab	332.00 a
S31	4.50 ef	8.76 BC	0.52AB	91.00 abc	121.80 ef
S32	5.50 def	10.69 BC	0.51AB	76.50 c	168.70 def
S61	2.51 f	5.92 C	0.39ABC	84.60 bc	77.60 f
S62	2.56 f	6.20 C	0.41ABC	98.60 abc	92.31 f
S91	4.40 ef	10.43 C	0.42ABC	109.20 abc	135.72 ef
S92	2.76 f	7.34 C	0.35BC	120.34 abc	97.12 f
S121	2.90 f	8.31 C	0.35BC	103.30 abc	99.90 f
S122	2.84 f	8.96 C	0.29C	115.95 abc	125.98 f

Los tratamientos regados fueron los que acumularon más N al final del ciclo. Por el contrario, los tratamientos sin riego de 6, 9 y 12 plantas por m² que fueron los más afectados por la baja disponibilidad hídrica a R6 tuvieron un valor de N acumulado menor que a R1, pudiendo deberse a la pérdida de hojas o lavado por las lluvias ocurridas entre el 15/02 cuando se encontraba en R1 y el 13/4 cuando se realizó el corte de biomasa a R6. El índice de cosecha solo se vio afectado por la población hallándose diferencias significativas únicamente entre el tratamiento más extremos (R31-2 y S121-2).

Eficiencias de uso: Radiación y Agua transpirada

La eficiencia de uso de la radiación interceptada estuvo afectada por la densidad de plantas y la disponibilidad

hídrica (**Tabla 5**). Bajo riego, las densidades más altas tuvieron una eficiencia significativamente mayor que el tratamiento de 3 pl m⁻² que no se diferenció del mismo en condiciones de secano (**Figura 3**). Este último únicamente se diferenció del tratamiento de 6 pl. m⁻².

A diferencia de los resultados hallados por Hernández et al (2021) el N no tuvo efecto sobre la eficiencia del agua transpirada (**Figura 4**), pero sí la tuvo la densidad de siembra y la disponibilidad hídrica.

En relación a la EUR, la EUAt se mostró más conservativa como indica (Steduto et al., 2007), encontrándose únicamente diferencias entre los tratamientos regados en baja densidad (3pl m⁻²) con algunos tratamientos en secano (**Figura 5**).

Tabla 5. Valores medios de eficiencia de uso de la radiación (EUR; g Mj interceptado⁻¹) y agua transpirada (EUAt) (g mm transpirado⁻¹) para cada combinación de riego y población. Medias en la misma columna con diferente letra son significativamente diferentes a través del test de Tukey, con un p-valor<0.05.

Tratamiento	EUR	EUAt
R31	0.91 B	3.68 B
R32		
R61	1.22 A	4.76 AB
R62		
R91	1.32 A	5.01 AB
R92		
R121	1.31 A	4.95 AB
R122		
S31	0.70 BC	6.31 A
S32		
S61	0.41 D	5.11 AB
S62		
S91	0.52 CD	6.11 A
S92		
S121	0.49 CD	6.18 A
S122		

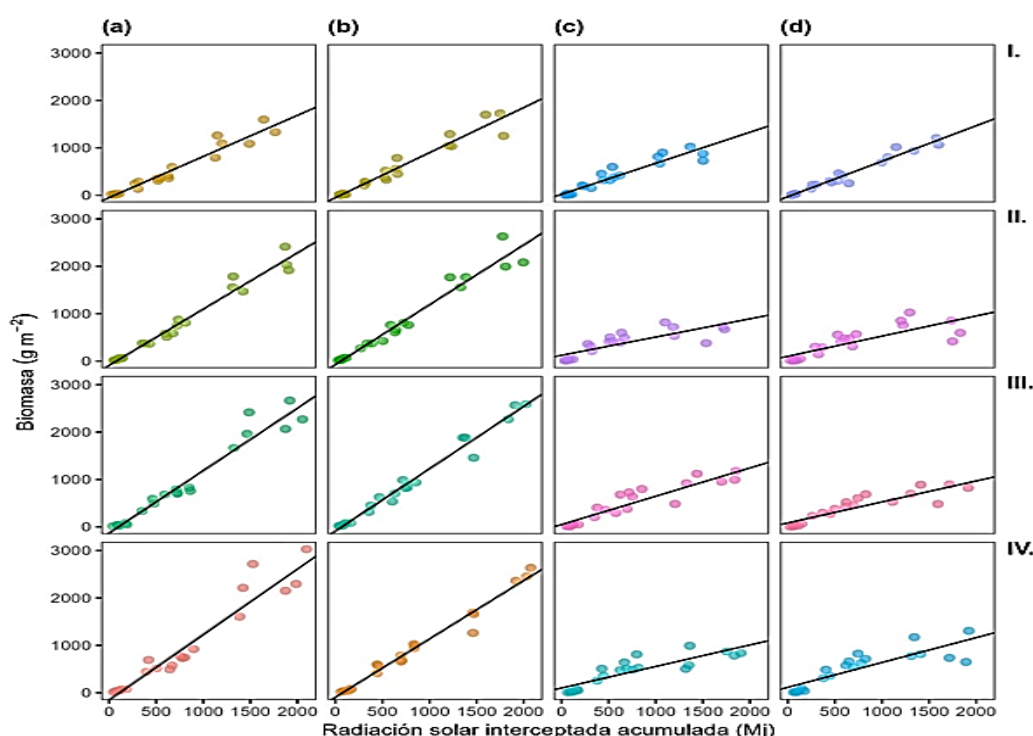


Figura 4. Eficiencia de uso de la radiación interceptada (gr ms. Mj interceptado⁻¹) por tratamiento. a) y b) riego sin y con N respectivamente, c) y d) secano sin y con N respectivamente. I), II), III), IV) corresponden a los tratamientos de 3, 6, 9 y 12 plantas.m⁻² respectivamente.

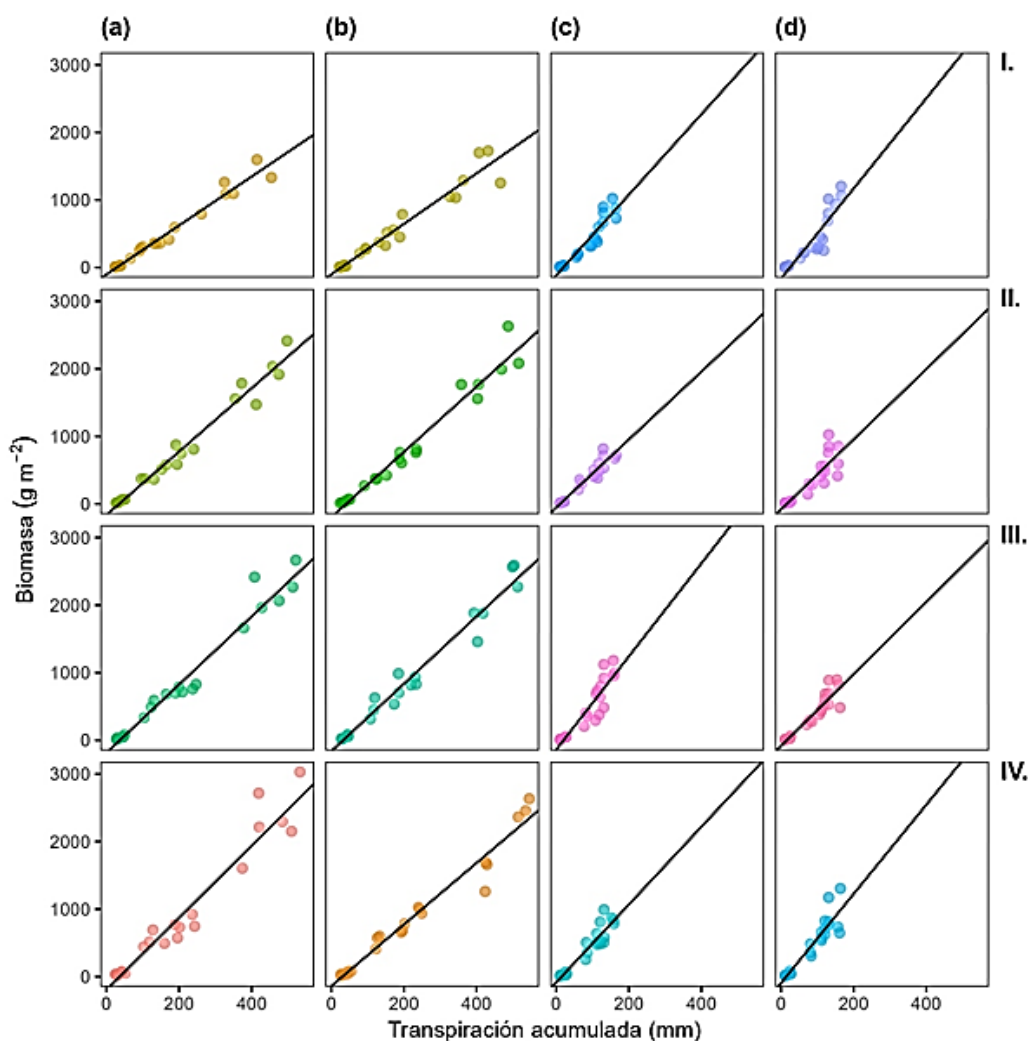


Figura 5. Eficiencia de uso del agua transpirada ($\text{gr ms. mm transpirado}^{-1}$) por tratamiento. a) y b) riego sin y con N respectivamente, c) y d) secano sin y con N respectivamente. I), II), III), IV) corresponden a los tratamientos de 3, 6, 9 y 12 plantas. m^{-2} respectivamente.

Relación N absorbido – biomasa y N absorbido - transpiración acumulada

La relación entre el nitrógeno absorbido y la transpiración acumulada obtenidos en el ensayo parecen seguir la curva teórica, no observándose ninguna tendencia clara en relación a los tratamientos de N ni población (**Figura 6**). Tal como muestran Kunrath et al., (2020) se observa un efecto de limitación de absorción de N dado por la menor cantidad de agua transpirada, producto del déficit hídrico sufrido en los tratamientos de secano. Sin embargo, no se observó en ningún caso un efecto del N que desplace la curva en todo su recorrido hacia abajo, indicando una menor absorción de N por mm de agua transpirado en los tratamientos de N no limitante.

CONCLUSIONES

Las condiciones del año y del sitio en 2023 llevaron a que se observara mayor respuesta al riego, densidad de plantas y en menor magnitud a disponibilidad de N. La eficiencia de uso de la radiación interceptada estuvo afectada por la densidad de plantas y la disponibilidad

hídrica mientras que la eficiencia de uso de agua transpirada, como se esperaba, fue más estable y solo vario en menor magnitud entre tratamientos extremos de población y riego. En concordancia, la absorción de N en función del agua transpirada no difirió de la curva de referencia, aunque si se observa un efecto de limitación de absorción de N dado por la menor cantidad de agua transpirada, producto del déficit hídrico sufrido en los tratamientos de secano. Si los experimentos de 2024 confirmaran las tendencias observadas en 2023, parecería factible utilizar la curva de referencia de N – agua transpirada, para el diagnóstico de la nutrición nitrogenada y predicción de necesidades de fertilización.

AGRADECIMIENTOS

Personal de apoyo de INIA La Estanzuela, a mis tutores Andrés Berger, Álvaro Otero y Cristina Capurro, Nicolas Maltese y a la ANII e INIA por financiar mi beca de maestría.

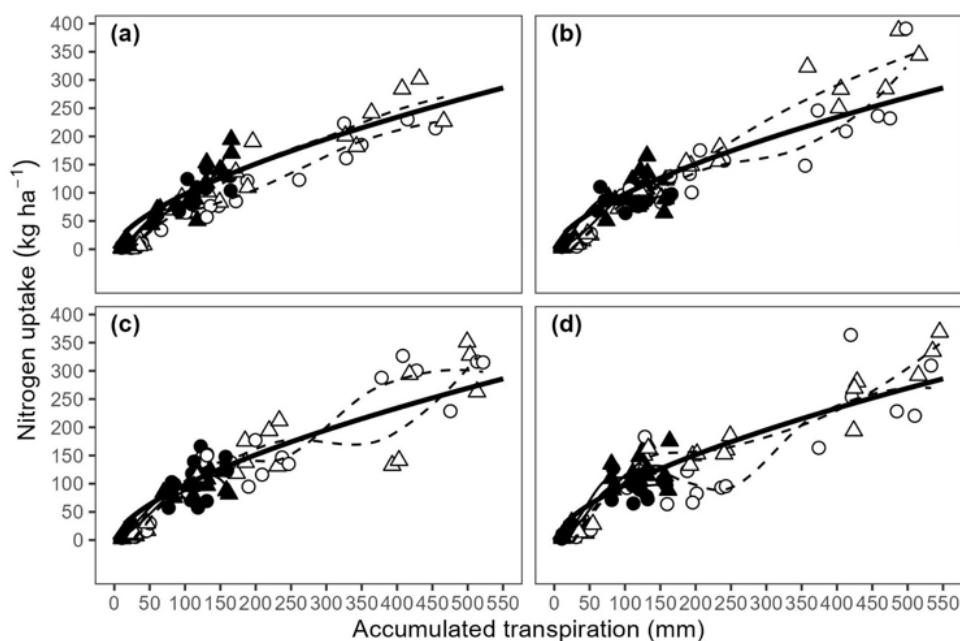


Figura 6. Absorción de N ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en función de la transpiración acumulada por tratamiento. Símbolos vacíos corresponden a tratamientos con riego y sólidos a seco. Triángulos (fertilizado) y círculos (testigo) corresponden al tratamiento de N. La curva de referencia (sólida negra) corresponde a la ecuación: $(a * (\text{TE}_{\text{max}})^b) * \text{cumT}^b$. Los coeficientes a (34) y b (0.63) son coeficientes de cultivo (Plénet and Lemaire, 1999; Plénet and Cruz, 1997). y la TE_{max} utilizada fue la mayor obtenida en condiciones de riego y fertilizado con N ($\text{TE}_{\text{max}} = 68.28 \text{ gr MS}\cdot\text{mm transpirado}^{-1}$). a, b c y d refiere a los diferentes tratamientos de densidad 3, 6, 9, 12 pl m^{-2} .

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L. 2005. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *J. Irrig. Drain Eng.* 131, 2–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2))
- Zeileis, A., Grothendieck, G. 2005. “zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series.” *Journal of Statistical Software*, 14(6), 1–27. doi:10.18637/jss.v014.i06.
- Forkel, M., Wutzler, T. 2015. Greenbrown - land surface phenology and trend analysis. A package for the R software. Version 2.2, 2015-04-15, <http://greenbrown.r-forge.r-project.org/>.
- Beck, P.S.A., Atzberger, C., Høgda, K.A., Johansen, B., Skidmore, A.K. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment* 100, 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walter, D.T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*. Mar;31(2):132-40. doi: 10.1579/0044-7447-31.2.132. PMID: 12078002.
- Ciampitti, I.A., Fernández, J., Tamagno, S., Zhao, B., Lemaire, G., Makowski, D. 2021. Does the critical N dilution curve for maize crop vary across genotype x environment x management scenarios? - a Bayesian analysis. *European Journal of Agronomy* 123, 126202. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126202>
- Correndo, A.A., et al. 2022. Metrica: an R package to evaluate prediction performance of regression and classification point-forecast models. *Journal of Open Source Software*, 7(79), 4655, <https://doi.org/10.21105/joss.04655>. Resultados de la Encuesta Agrícola “Invierno 2022,”.
- Fernández, 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. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107586>
- Grahmann, K., Rubio Dellepiane, V., Terra, J.A., Quincke, J.A. 2020. Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 287, 106710. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106710>
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs4020439>
- Hernández, M.D., Alfonso, C., Echarte, M.M., Cerrudo, A., Echarte, L. 2021. Maize transpiration efficiency increases with N supply or higher plant densities. *Agricultural Water Management* 250, 106816. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106816>

- Kunrath, T.R., Lemaire, G., Sadras, V.O., Gastal, F. 2018. Water use efficiency in perennial forage species: Interactions between nitrogen nutrition and water deficit. *Field Crops Research* 222, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.031>
- Lemaire, G. (Ed.) 1997. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7>
- Lemaire, G., Jeuffroy, M.-H., Gastal, F. 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. *European Journal of Agronomy* 28, 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005>
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., Bélanger, G. 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 27. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Richards, L. A. 1956. Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20: 301–303.
- Richards, L. A., and Weaver, L. R. 1944. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. *J. Agr. Res.* 69: 215–235.
- Ritchie, S.W. and Hanway, J.J. 1982. How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48, Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103331>
- Sinclair, T.R., Ruffy, T.W. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security* 1, 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.07.001>
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig Sci* 25, 189–207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- Thorp, K.R. 2022. pyfao56: FAO-56 evapotranspiration in Python. *SoftwareX* 19, 101208. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101208>
- Trout, T.J., DeJonge, K.C. 2018. Crop Water Use and Crop Coefficients of Maize in the Great Plains. *J. Irrig. Drain Eng.* 144, 04018009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001309)
- Weiner, J. 2004. Allocation, plasticity and allometry in plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6, 207–215. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00083>