

## **EFFECTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CO-LIMITACIÓN DE AGUA Y NITROGENO SOBRE LA EFICIENCIA DE USO DE AMBOS RECURSOS EN EL CULTIVO DE MAÍZ**

Ing. Agr. MSc. Albarenque S.M.

INTA. Centro Regional Entre Ríos. Estacion Experimental Agropecuaria Paraná. Argentina  
albarenque.susana@inta.gob.ar

### **INTRODUCCIÓN**

El rendimiento en grano del cultivo de maíz se encuentra principalmente limitado por agua y nitrógeno (N), presentando la oferta de ambos recursos una importante variabilidad, tanto espacial como temporal. Las variaciones espaciales dentro de los lotes de producción están principalmente asociadas a diferencias en las propiedades físico químicas del suelo, la topografía, el clima y factores de manejo agronómico (Mamo et al., 2003; Basso et al., 2001). En consecuencia, se originan complejas interacciones que determinan variaciones espaciales en el crecimiento de los cultivos, generando cambios en la captura y eficiencia de uso de estos recursos.

La aplicación de dosis de fertilización con N uniformes, donde los requerimientos de un cultivo y la disponibilidad del nutriente varían espacialmente, genera desajustes entre la oferta y las necesidades del cultivo (Huggins y Pan, 1993), pudiendo producir impactos negativos en términos ambientales y económicos (Pierce y Nowak, 1999). La delimitación de zonas de manejo (ZM) según la uniformidad de recursos, resulta apropiada para la aplicación de dosis únicas en cada sub-región del lote (Doerge, 1999).

El crecimiento de un cultivo está limitado simultáneamente por varios recursos (Sinclair y Park, 1993) y su respuesta a dos o más factores es mayor que la respuesta aislada, sugiriendo la existencia de co-limitación de recursos (Sadras, 2005). Existen antecedentes sobre los efectos de la disponibilidad de agua y del N y su interacción sobre el rendimiento en varios cultivos (e.g. Gregory et al., 1997; Nielsen et al., 1991; Kallsen et al., 1984) así como sobre las eficiencias de uso de estos recursos (Bolton, 1981; Ping et al., 2008). También ha sido documentado el impacto sobre el rendimiento de la variabilidad espacial de la disponibilidad de agua (Sadler et al., 2000; Nosetto, 2009) y del N (Khosla et al., 2002; Washmon, 2002; Everett y Pierce, 1996), pero son menos frecuentes los estudios que consideran la interacción de la variación espacial de ambos recursos sobre la eficiencia de uso de los mismos. A nivel de lote de producción, donde las limitaciones de agua y N varían espacial y temporalmente, sería esperable la existencia de co-limitaciones que generarían variaciones intra-lote en la eficiencia de uso de agua (EUA) y del N (EUN). El incremento en la disponibilidad de N conduce generalmente a una disminución en la EUN (Lemaire y Gastal, 2009); en contraste, la EUA responde positivamente a la oferta de N (Hatfield et al., 2001). Como consecuencia, es relevante determinar el nivel de disponibilidad de N al cual se equilibran el incremento en la EUA con la reducción en la EUN.

La evaluación de las interacciones entre suelo, clima y manejo del N, para conocer las relaciones entre la EUA, EUN y el efecto del grado de co-limitación de agua y N, requeriría de numerosos experimentos de campo realizados a largo plazo, los modelos de simulación se

presentan como una solución (Batchelor et al., 2002). Estos han probado ser una herramienta valiosa para acortar significativamente el proceso experimental que se necesita para mejorar las estrategias de manejo de cultivos en secano, a través de simulaciones de largo plazo (López Cedron et al., 2008). Existe abundantes antecedentes que evalúan efectos de la variabilidad espacio-temporal en la productividad de los cultivos y como herramienta para optimizar el uso de insumos (Sadler et al., 2000; Batchelor et al., 2002; Rinaldi et al., 2004; Basso et al., 2006; Miao et al., 2006; Oliver et al., 2010; Albarenque et al., 2016).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la variabilidad espacial y temporal de la co-limitación de agua y N sobre la EUA y EUN en el cultivo de maíz en diferentes ZM de un lote de producción.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue realizado durante la campaña 2011/12 en un lote de maíz cultivado en la EEA del INTA Paraná (31°50'S, 60°32'O; 110 msnm) sobre un suelo Argiudol ácuico con diferentes grados de erosión. Se delimitaron 4 ZM utilizando el software MZA (Management Zone Analyst) en base a mapas previos de conductividad eléctrica, elevación y materia orgánica.

Se evaluaron 4 niveles de N disponible (Nd) dentro de cada una de las ZM con 3 repeticiones. El nivel de Nd se calculó como la sumatoria del contenido de N mineral a la siembra (profundidad 0-60cm) más el N del fertilizante, resultando en 70 kg N ha<sup>-1</sup> (N70), 140 kg N ha<sup>-1</sup> (N140), 210 kg N ha<sup>-1</sup> (N210) y un testigo sin fertilizar (N0). El N mineral a la siembra mostró bajos niveles de disponibilidad y fue de 31, 34, 29 y 39 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> en las ZM 1, 2, 3, y 4, respectivamente.

La EUN (kg grano kg de Nd<sup>-1</sup>) se calculó como la relación entre el rendimiento y el Nd y la EUA (kg grano mm<sup>-1</sup>) como la relación entre el rendimiento y la evapotranspiración durante el ciclo del cultivo. Se realizaron mediciones semanales de humedad de suelo con una sonda de neutrones hasta 1.6m de profundidad, la evapotranspiración fue estimada como la variación de almacenaje entre fechas y precipitación efectiva. Se utilizaron los índices de estrés de N (L<sub>N</sub>) y agua (L<sub>A</sub>) modelados con SALUS (System Approach to Land Use Sustainability; Basso, 2006) para calcular la co-limitación de agua y N (C<sub>AN</sub>), en base a la ecuación propuesta por Sadras (2005):

$$C_{AN} = 1 - |L_N - L_A|$$

Donde C<sub>AN</sub> es la de co-limitación de agua y N, varía entre 0 y 1, y tiende a 1 cuando los dos estreses son de similar magnitud.

Para evaluar el efecto de la variabilidad temporal de la C<sub>AN</sub> sobre las eficiencias, se realizaron simulaciones para 41 años del período 1971-2012 de la serie de datos climáticos históricos de la EEA INTA Paraná considerando 4 niveles de N a la siembra: N0, N70, N140 y N210. A partir de los resultados de la simulación, se estimó la eficiencia de uso de N (EUN), la eficiencia de uso de agua (EUA), la limitación de agua (L<sub>A</sub>), la limitación de N (L<sub>N</sub>) y la co-limitación de agua y N (C<sub>AN</sub>).

La variabilidad temporal (entre años) y espacial (entre ZM) por tratamiento se analizó mediante los coeficientes de variación (CV) (Blackmore et al., 2000). Los CV para evaluar la variabilidad temporal se estimaron como la relación entre el desvío estándar (DE) y el promedio de los 41 años simulados de la combinación de tratamiento de fertilización (ZMxN).



La variabilidad espacial se estimó como la relación entre el DE y el promedio de 41 años entre las ZM de cada tratamiento de fertilización (N0, N70, N140 y N210).

Para determinar si la relación entre EUA y EUN con la  $C_{AN}$  es estable a través del tiempo, se estudió la asociación entre variables mediante análisis de regresión para cada año del período simulado (1971-2012) y en cada zona de manejo, en los casos que las relaciones fueron significativas en todas las ZM se realizó una regresión con un único modelo por año para corroborar si este explica la relación de la misma manera que un modelo por zona.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Eficiencia de uso de agua, eficiencia de uso de nitrógeno y co-limitación de agua y nitrógeno*

La EUN promedio de las 4 ZM fue de 39, 31, 26 y 22 kg grano kg de  $Nd^{-1}$ , para los tratamientos N0, N70, N140 y N210, respectivamente. Para el promedio de los 4 niveles de N, la mayor EUN se obtuvo en la ZM1 (33 kg grano kg  $Nd^{-1}$ ) y la menor en la ZM3 (23 kg grano kg  $Nd^{-1}$ ). En las ZM2 y ZM4 la EUN alcanzó valores intermedios (ca. 31 kg grano kg  $Nd^{-1}$ ). En general, la EUA promedio de las 4 ZM aumentó ante incrementos de la disponibilidad de N, resultando en 12, 11, 13 y 15 kg grano  $mm^{-1}$ , para los tratamientos N0, N70, N140 y N210, respectivamente. Similarmente a lo hallado para la EUN, la mayor EUA (15 kg grano  $mm^{-1}$ ) correspondió a la ZM1 y la menor (9 kg grano  $mm^{-1}$ ) a la ZM3, con valores intermedios en las otras dos ZM (ca. 13.5 kg grano  $mm^{-1}$ ).

La  $C_{AN}$  tuvo un estrecho rango de variación (0.73-0.95). Consecuentemente, la  $C_{AN}$  se relacionó en mayor medida con la limitación de N ( $r = 0.85$ ), que con la de agua ( $r = -0.27$ ). La EUN en promedio se incrementó con aumentos en la  $C_{AN}$  en las 4 zonas de manejo evaluadas (Fig 1a); en contraste, la EUA disminuyó ante incrementos en la  $C_{AN}$  en las 4 zonas de manejo (Fig 2b). Resultados contrastantes con los reportados por Cossani et al. (2010), quienes hallaron que tanto la EUN como EUA, aumentan con la  $C_{AN}$ . En trabajos previos (Sadras y Roget, 2004) se ha relacionado la EUN con el índice de estrés de agua y la EUA con el índice de estrés de N, mostrando que ambas eficiencias disminuyen con el aumento del estrés.

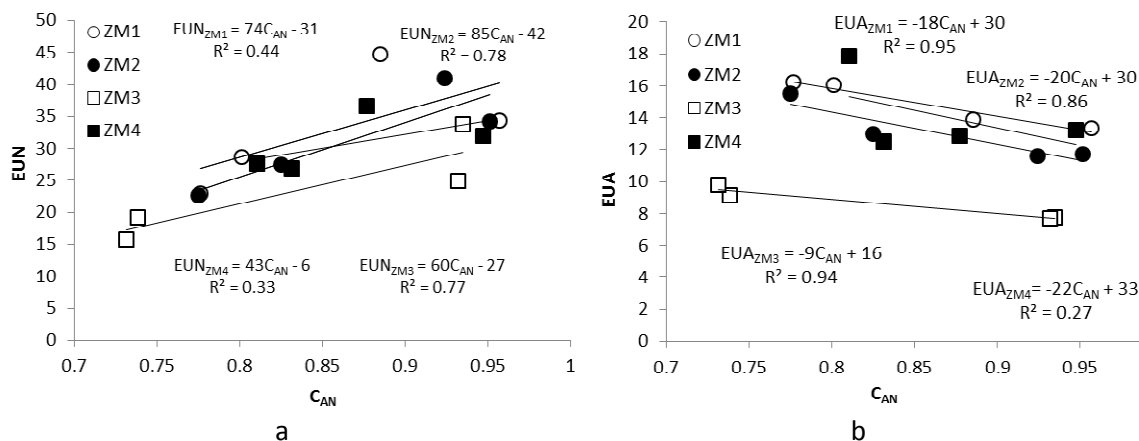


Figura 1. a) Eficiencia de uso de N (EUN, kg grano kg  $Nd^{-1}$ ) y b) eficiencia de uso de agua (EUA, kg grano  $mm$  ET) del cultivo de maíz en función del índice de co-limitación de agua y N

( $C_{AN}$ ) para 4 zonas de manejo (ZM1, ZM2, ZM3 y ZM4) de un lote de producción de maíz

La existencia de relaciones inversas para la EUA y la EUN en función de la  $C_{AN}$ , permiten determinar un valor de  $C_{AN}$  donde la EUN y EUA se igualan. Este valor de  $C_{AN}$  representaría el nivel de co-limitación en la cual se logra un equilibrio entre la disminución de la EUA y el incremento en la EUN. La respuesta en rendimiento en función del Nd se incrementó linealmente en todo el rango de Nd estudiado en las distintas ZM, mientras que los niveles de  $C_{AN}$  donde se igualan los cambios en la EUA y EUN fueron de 145, 175, 165 y 150 kg Nd ha<sup>-1</sup>, para la ZM1, ZM2, ZM3 y ZM4, respectivamente. La utilización de la  $C_{AN}$  permitiría ajustar el Nd por ZM, optimizandolas EUA y EUN, recursos que limitan comúnmente el rendimiento del cultivo de maíz en seco. Este enfoque representaría una mejora respecto a la determinación de la dosis de acuerdo con curvas de respuesta por zonas de manejo, metodología con la que sólo se optimiza la eficiencia de uso del N.

*Variabilidad espacial y temporal de la eficiencia de uso de agua, eficiencia de uso de nitrógeno, y co-limitación*

La EUA y la EUN simuladas para un período de 41 años variaron significativamente por efecto de la ZM y el N ( $p < 0.001$ ) sin verificarse interacción significativa ( $p < 0.001$ ). La EUA promedio estuvo comprendida entre 10 y 20 kg grano mm<sup>-1</sup> y tuvo menor variabilidad temporal que la EUN (Tabla 1). En general, la variabilidad temporal de la EUA estuvo entre 19 y 28%, y la de la EUN entre 33 y 62%, siendo la variación mayor con el aumento de la dosis de fertilización. El efecto de la fertilización con N fue mayor sobre la EUA que sobre la EUN.

**Tabla 1.** Eficiencia de uso de agua y de N promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM evaluadas. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros climáticos históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.

	EUA (kg grano mm <sup>-1</sup> )				EUN (kg grano kg N <sup>-1</sup> )		
	N0	N70	N140	N210	N70	N140	N210
<b>ZM1</b>	11 (20)*	14 (20)	18 (22)	19 (23)	20 (39)	21 (44)	17 (47)
<b>ZM2</b>	11 (22)	15 (22)	17 (22)	20 (23)	19 (38)	16 (42)	16 (50)
<b>ZM3</b>	10 (22)	14 (23)	16 (24)	19 (28)	19 (50)	16 (52)	15 (62)
<b>ZM4</b>	11 (19)	15 (19)	19 (20)	20 (21)	24 (33)	23 (38)	18 (40)

Promedio **11 (21)\*\***    **14 (21)**    **18 (23)**    **19 (24)**    **21 (41)**    **19 (46)**    **16 (50)**

\* CV entre años, representa la variabilidad temporal. \*\* CV entre ZM, representa la variabilidad espacial

La EUA promedio del tratamiento de fertilización N210 resultó 72, 35 y 5% mayor que las EUA de N0, N70 y N140, respectivamente (Tabla 1). En promedio, la EUA en las diferentes ZM fue de 16, 15, 14 y 16 kg mm<sup>-1</sup>, para ZM1, ZM2, ZM3 y ZM4. La ZM3 se diferenció de las otras ZM por alcanzar EUA menores, las que además fueron más variables.

La EUN disminuyó 23 y 16% con el aumento de la dosis de fertilización, respecto a N140 y N210. Las menores eficiencias se alcanzaron en la ZM3, zona en la que también se verificó una mayor variabilidad temporal (50-62%).

En general, la variabilidad espacial resultó mayor que la variabilidad temporal lo que permitiría utilizar prácticas de agricultura de precisión como las ZM como estrategia de manejo para aumentar la eficiencia de uso de los recursos y minimizar el impacto ambiental, como lo indicaron Whelan y McBratney (2000), ya que una gran variabilidad temporal dificultaría la planificación de estrategias de manejo y determinar la disponibilidad de N en el suelo y el rendimiento potencial.

La variabilidad temporal de la limitación de agua ( $L_A$ ), fue similar en las ZM1 y ZM2, variando entre 94 y 105%, mientras que en la ZM3 la variación temporal fue menor y estuvo entre 66 y 76%. La ZM4 tuvo la mayor variabilidad temporal en  $L_A$ , y abarcó un rango entre 107% y 117% (Tabla 2).

La limitación de nitrógeno ( $L_N$ ) se redujo entre un 86 y 92% con la dosis N210 respecto al testigo, abarcando un rango entre 0.042 y 0.31. La variación temporal de  $L_N$  se incrementó con la dosis de N. La ZM3, tuvo mayor variabilidad temporal en  $L_N$  que las otras ZM en los tratamientos N70, N140 y N210. Tanto para  $L_A$  como para  $L_N$ , la magnitud de la variabilidad espacial fue similar a la temporal (Tabla 2) en las ZM1 y ZM2. A diferencia de estas, en la ZM3 la variación temporal de  $L_A$  fue menor que la espacial (-27%). En la ZM4, la variabilidad temporal de  $L_A$  fue entre 11 y 40% mayor que en las otras ZM (Tabla 2). El rango explorado por  $L_N$  (0.066-0.331) fue mayor que el de  $L_A$  (0.064-0.156) (Tabla 2, Fig 2), notándose claras diferencias entre los tratamientos de N, esto se vio reflejado en la  $C_{AN}$  la que mostró variaciones por efecto de N y ZM.

La  $C_{AN}$  mostró una menor variabilidad temporal que las limitaciones de agua y N, variando entre 7 y 15%, variación que resultó similar a la espacial. En todas las ZM, la  $C_{AN}$  aumentó con la dosis de N (Tabla 2, Fig 2). Los valores de  $C_{AN}$  y las limitaciones de agua y N, concuerdan con lo reportado por otros autores (Sadras y Roget, 2004; Sadras, 2004; Cossani et al., 2010).

**Tabla 2.** Limitación de agua ( $L_A$ ), limitación de N ( $L_N$ ) y co-limitación de agua y N ( $C_{AN}$ ) promedio de los tratamientos de fertilización nitrogenada simulados, N0, N70, N140 y N210, para las 4 ZM evaluadas. Valores promedio de la simulación realizada para un período de 41 años (1971-2012) con registros climáticos históricos de Paraná. El valor entre paréntesis representa el coeficiente de variación, para una ZM y tratamiento de N en particular representa la variabilidad temporal, y para el promedio de cada dosis de N la variabilidad espacial.

	$L_A$				$L_N$				$C_{AN}$			
	N0	N70	N140	N210	N0	N70	N140	N210	N0	N70	N140	N210
<b>ZM1</b>	0.071(105)	0.081(95)	0.082(94)	0.082(94)	0.308(25)	0.173(41)	0.066(76)	0.038(102)	0.754(13)	0.87(9)	0.924(7)	0.925(7)
<b>ZM2</b>	0.071(105)	0.081(95)	0.082(94)	0.082(94)	0.296(27)	0.164(45)	0.098(76)	0.035(113)	0.770(13)	0.88(9)	0.912(8)	0.921(8)
<b>ZM3</b>	0.137(76)	0.155(66)	0.156(66)	0.156(66)	0.331(27)	0.163(53)	0.087(80)	0.027(144)	0.778(15)	0.87(11)	0.871(11)	0.862(12)
<b>ZM4</b>	0.055(117)	0.055(117)	0.064(107)	0.064(107)	0.306(25)	0.163(43)	0.068(72)	0.042(94)	0.745(12)	0.87(1)	0.931(6)	0.939(6)
<b>Promedio</b>	<b>0.085(103)</b>	<b>0.094(95)</b>	<b>0.097(93)</b>	<b>0.097(92)</b>	<b>0.310(26)</b>	<b>0.166(45)</b>	<b>0.080(74)</b>	<b>0.036(110)</b>	<b>0.762(13)</b>	<b>0.876(9)</b>	<b>0.910(8)</b>	<b>0.912(9)</b>

\* CV entre años, representa la variabilidad temporal. \*\* CV entre ZM, representa la variabilidad espacial

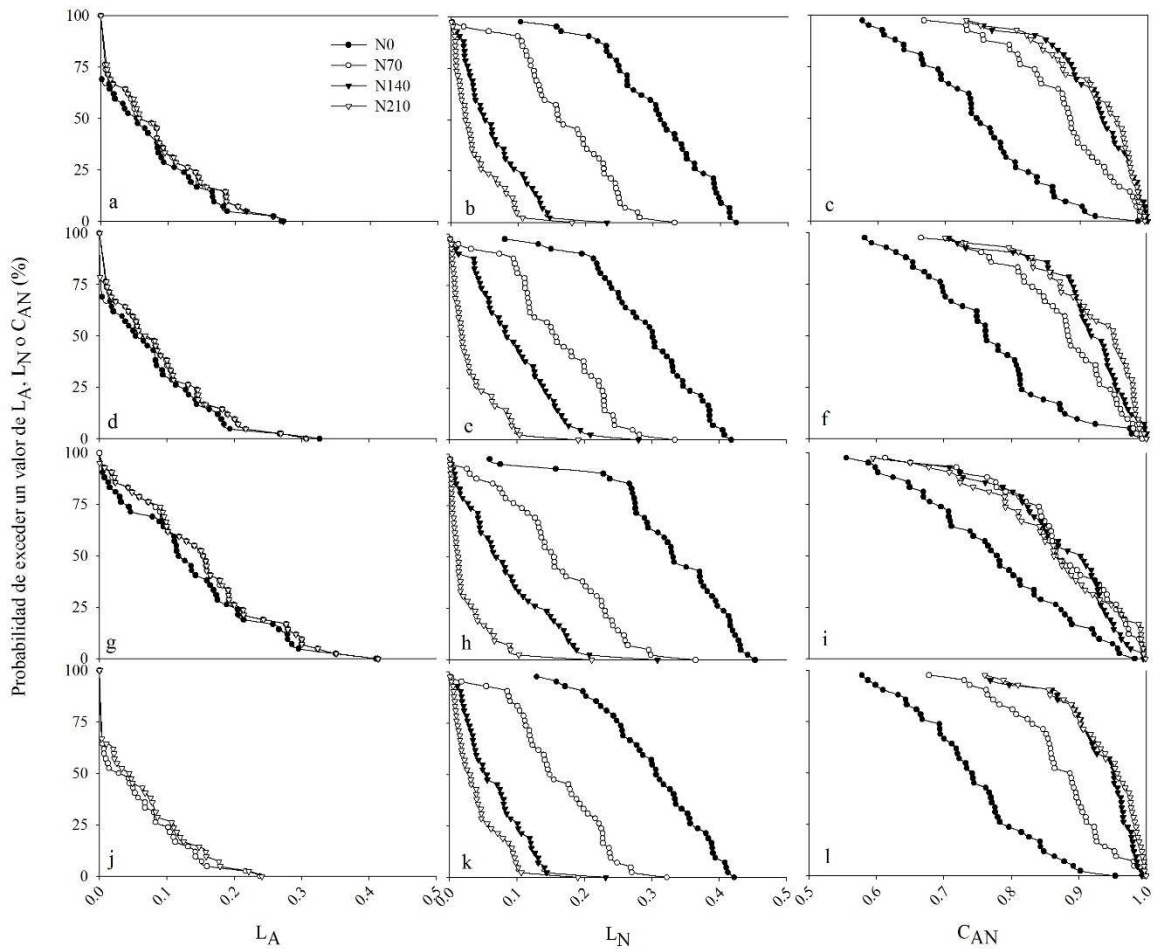
La  $L_N$  generó un mayor impacto que la  $L_A$  sobre la  $C_{AN}$  (Figura 2), y en general una menor  $L_N$  se asoció con una mayor  $C_{AN}$ , indicando que por medio de la fertilización nitrogenada podrían generarse variaciones en los niveles de co-limitación.

En condiciones de secano, es fácil y económicamente viable manejar la disponibilidad de N a través de la fertilización. De acuerdo a los resultados obtenidos (Fig2) el recurso que mayor impacto produjo sobre la co-limitación fue el N, existiendo diferencias entre ZM en las dosis de N con las que se produjo mayor efecto sobre la  $C_{AN}$ . Respecto a esto Cossani et al. (2010) sugirieron que un aumento del grado de co-limitación mediante el ajuste de las dosis de N a la disponibilidad de agua, permitiría aumentar el rendimiento.



# kairós

El tiempo de los nativos sustentables



**Figura 2.** Probabilidad acumulada de exceder un valor de limitación de agua ( $L_A$ ; a, d, g), limitación de N ( $L_N$ ; b, e, h) o co-limitación de agua y N ( $C_{AN}$ ; c, f, i) en simulaciones realizadas para un periodo de 41 años (1971-2012) para 4 tratamientos de disponibilidad de nitrógeno N0, N70, N140 y N210 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y 4 ZM. a, b, c) ZM1, d, e, f) ZM2 y g, h, i) ZM3 y j, k, l) ZM4.

El éxito de las prácticas de manejo sitio específico dependen de determinar relaciones que describan la respuesta del rendimiento a diferentes factores y del impacto ambiental que esto tenga, así como del uso de estas relaciones para definir prescripciones óptimas en una determinada escala de manejo (Link, 2005). De acuerdo con esto, el uso de modelos de simulación permite explorar las relaciones espacio-temporales de la EUA y EUN con la  $C_{AN}$ .

### **Varibilidad temporal de las relaciones de la $C_{AN}$ con la EUA y EUN**

La relación hallada entre la EUA y la  $C_{AN}$ , a partir de datos observados resultó lineal y negativa, en los resultados de la simulación de largo plazo sólo se verificó esta relación en menos del 5% de los años (2 de 41), la relación entre estas variables se explicó mejor utilizando un modelo por cada ZM. Por el contrario, en el 51% de los años la EUA se asoció positivamente

con la  $C_{AN}$ , siendo el modelo que mejor explicó la relación el que incluyó a todas las ZM. En el 44% de los años no se verificó una relación significativa entre la EUA y la  $C_{AN}$ .

La EUN se relacionó lineal y positivamente en el 32% de los años simulados (13 de 41 años), mientras que en el 2% (1 de 41) la relación fue lineal y negativa. En el 66% de los casos la relación entre EUN y  $C_{AN}$  no fue significativa.

## CONCLUSIONES

La EUN y la EUA mostraron variación espacial, representadas en este trabajo por 4 ZM y ambas eficiencias se relacionaron con el grado de  $C_{AN}$ . Se identificaron diferentes niveles de Nd que equilibran el incremento en la EUN y la disminución en la EUA dentro de cada una de las zonas de manejo, optimizando ambas eficiencias.

La  $L_A$  tuvo mayor variabilidad espacial y temporal que la  $L_N$ , aunque ambas variabilidades de  $L_A$  disminuyeron con el aumento de la dosis de N. Por otro lado, la  $L_N$  disminuyó por efecto de N mientras su variabilidad temporal y espacial aumentó. Los niveles de  $C_{AN}$  variaron espacial y temporalmente, aunque disminuyeron con el aumento de la dosis de N. De los resultados se desprende que la  $C_{AN}$  puede manejarse a través de la fertilización.

La relación encontrada entre EUA y  $C_{AN}$  resultó más estable en el tiempo que la relación de la EUN con la  $C_{AN}$ , esta relación podría utilizarse para realizar prescripciones de N por ZM de acuerdo con la disponibilidad de agua al inicio del cultivo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Albarenque S. M., Basso B., Caviglia O. P., Melchiori R. J.M. 2016. Spatio-temporal nitrogen fertilizer response in maize: field study and modeling approach. *Agronomy Journal*. 108 (6): 1-13.
- Basso, B., Ritchie, J.T., Pierce, F.J., Braga, R.P., Jones, J.W. 2001. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems*. 68:97-112.
- Basso, B.; Ritchie, J.T.; Grace, P.R.; L. Sartori. 2006. Simulating tillage impacts on soil biophysical properties using the SALuS model. *Italian Journal of Agronomy*, 3, 1-10.
- Bolton F.E. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through soil and crop management. *Plant and Soil*. 58: 231-247
- Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy*. 18:141-158.
- Blackmore, B.S. 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*. 26(1): 37-51.
- Bolton, F. E. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through soil and crop management. Chapter 9. Soil water and nitrogen in Mediterranean-type environments. Pages 231-247 in J. Monteith and C. Webb, eds. *Developments in plant and soil sciences*. Vol. 1. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, The Hague, the Netherlands.



- Cossani, M., Slafer, G.A., Savin, R. 2010. Co-limitation of nitrogen and water, and yield and resource-use efficiencies of wheat and barley. *Crop and Pasture Science*. 61: 844–851.
- Doerge, T. A, 1999. Management zone concepts. SSMG-2. In: Information Agriculture Conference, August 9-11, 1999, Stewart Center, Purdue, IN.
- Everett M.W. and F.J. Pierce.1996. Variability of corn yield and soil profile nitrates in relation to site-specific N management. In: Robert, P.C., et al. (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Gregory P.J., Simmonds L.P. and G.P. Warren. 1997. Interactions between plant nutrients, water and carbon dioxide as factors limiting crop yields. *Phil. Transactions of Royal Society London*.
- Hatfield J.L., T.J. Sauer, and J.H. Prueger. 2001. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency: A Review. *Agronomy Journal*. 93:271–280.
- Huggins D.R. and W.L. Pan. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agronomy Journal*. 85: 898-905.
- Kallsen C.E., Sammis T.W. and E.J.Gregory. 1984. Nitrogen and yield as related to water use of spring barley. *Agronomy Journal*. 76: 59-64.
- Khosla, R. K. Fleming, J. A. Delgado, T. M. Shaver, and D. G. Westfall. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*. 57(6):513-518.
- Lemaire G. and F.F. Gastal. 2009. Chapter 8: Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In: *Sadras V. and D. Calderini*. *Crop Physiology*. 171-211.
- Link, J. 2005. Investigation and modeling of the optimization potential of adapted nitrogen fertilization strategies in corn cropping systems with regard to minimize nitrogen losses. *Doktors der agrarwissenschaften*. 172p.
- Mamo M., Malzer G.L., Mulla D.J., Huggins D.R. and J. Strock. 2003. Spatial and Temporal Variation in Economically Optimum Nitrogen Rate for Corn. *Agronomy Journal*. 95: 958–964
- Miao, Y., Mulla, D.J., Batchelor, W.D., Paz, J.O, Robert, P.C., Wiebers, M. 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agronomy Journal*. 98: 545-553.
- Mizzou-ARS. (2000). Management zone analyst Version 1.0.1. University of Missouri-Columbia and Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture. <http://www.ars.usda.gov/services/software/software.htm>. (Julio 2011).
- Nielsen D.C. and A. D. Halvorson.1991 Nitrogen Fertility Influence on Water Stress and Yield of Winter Wheat. *Agronomy Journal*. 83:1065-1070.
- Nosetto MD, Jobbágy E, Jackson R, Sznaider G. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow groundwater in the Pampas. *Field Crop Research*, 113: 138-148.
- Oliver, Y.M., Robertson, M.J., Wong, M.T.F. 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *European Journal of Agronomy*. 32(1): 40-50.

- Pierce F. and P. Nowak. 1999. Aspects of precision agriculture. In: D. Spark (Ed) *Advance in Agronomy* 67. Academic Press. P 1-85.
- Ping, J.L., Ferguson R.B. y A. Dobermann. 2008. Site-Specific Nitrogen and Plant Density Management in Irrigated Maize. *Agronomy Journal*. 100:1193–1204.
- Rinaldi, M. 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crop Research*. 89: 27–37
- Sadler E.J., Bauer P.J., Busscher W.J. and J.A. Millen. 2000. Site-specific analysis of a droughted corn crop: II. Water use and stress. *Agronomy Journal*. 92: 403-410.
- Sadras V.O. 2005. A quantitative top-down view of interactions between stresses: theory and analysis of nitrogen-water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Australian Journal of Agricultural Research*. 56, 1151–1157R.
- Sadras, V.O. 2004. Yield and water-use efficiency of water- and nitrogen-stressed wheat crops increase with degree of co-limitation. *European Journal of Agronomy*. 21: 455–464.
- Sadras V. and D. Roget. 2004. Production and Environmental Aspects of Cropping Intensification in a Semiarid Environment of Southeastern Australia. *Agronomy Journal*. 96:236-246.
- Sinclair T.R. and W.I. Park. 1993. Inadequacy of the Liebig limiting-factor paradigm for explaining varying crop yields. *Agronomy Journal*. 85: 742-746.
- Washmon, C.N., Solie J.B., Raun W.R. and D.D. Itenfisu. 2002. Within Field Variability in Wheat Grain Yields over Nine Years in Oklahoma. *Journal of Plant Nutrition*. 25(12): 2655–2662.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B. 2000. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. *Precision Agriculture*. 2: 265-279.