



VARIABILIDAD EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y NITROGENADA A ESCALA DE LOTE Y SU EFECTO EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ (*Zea mays* L.)

Ma. del P. Muschietti Piana^{1,2}; M. Niborski³ y S. Urricariet¹

¹Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, ²Cátedra de Edafología, ³Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417DSE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, muschiet@agro.uba.ar, urricari@agro.uba.ar

Recibido: 04-03-13

Aceptado 02-10-13

RESUMEN

En los suelos de la Pampa Arenosa, la variabilidad de rendimientos frecuentemente se asocia a la heterogeneidad en la oferta hídrica y nitrogenada. En la tecnología de fertilización según manejo sitio-específico (MSE), se requiere discriminar ambientes contrastantes que tengan en común atributos de suelo y rendimientos semejantes. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar la variabilidad en la oferta hídrica y de nitrógeno (N) y su relación entre el aporte de N por mineralización y el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) a escala de lote según posiciones topográficas. En una parcela de 10,5 ha se discriminaron tres ambientes asociados a posiciones topográficas de loma, media-loma y bajo. En cada ambiente, se recogieron muestras compuestas de suelo a la siembra y a cosecha del cultivo de maíz para determinar el contenido hídrico y de nitratos (N-NO_3^-) en el perfil hasta los 180 cm de profundidad. Mediante funciones de edafo-transferencia se estimó la capacidad de agua disponible (CAD) con el contenido de carbono fácilmente oxidable (Cox) y la composición textural. Además, se determinó la biomasa de maíz en grano y rastrojo, la concentración de N acumulado, y se estimó la eficiencia en el uso del agua para grano (EUAg) y biomasa total (EUA_{BT}) por ambientes. Los ambientes de lomas y bajos presentaron características edáficas contrastantes. Los menores rendimientos del maíz se encontraron en las posiciones de loma, y resultaron en promedio de $4,5 \text{ t ha}^{-1}$; mientras que los mayores se obtuvieron en la media-loma, alcanzando en promedio 10 t ha^{-1} . La variabilidad en los rendimientos del maíz a escala de lote resultó asociada al N disponible y la tasa de mineralización. En los ambientes de loma, la menor CAD (25,2 mm) y tasa de mineralización (1,1%) se tradujo en menores rendimientos y menor EUAg ($5,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), que en el resto de los ambientes ($p < 0,05$). Estos resultados tienen implicancias para el MSE de N y deben ser consideradas al momento de caracterizar patrones espaciales a escala de lote para la implementación de ésta tecnología.

Palabras clave. Nitrógeno disponible, tasa de mineralización, posición topográfica, rendimiento del maíz, Pampa Arenosa, manejo sitio-específico.

VARIABILITY IN WATER AND NITROGEN AVAILABILITY AT PLOT SCALE AND ITS EFFECT ON MAIZE (*Zea Mays* L.) PRODUCTION

SUMMARY

Generally, in soils of the Sandy Pampas, yield variability is associated with the heterogeneity in water and nitrogen (N) supply. Site-specific nutrient management (SSNM) technology requires discriminating yields and soil attributes within management zones. The objectives of this study were to assess the variability in water and N supply, and the relationship between the N mineralization and maize (*Zea mays* L.) yield at plot scale within topographic positions. Three management zones were delineated according to upland, mid-slope and lowland landscape positions on a plot of 10.5 ha. Composite soil samples were collected at sowing and after harvest to determine the water and nitrate ($\text{NO}_3^- \text{N}$) content in the profile up to 180 cm depth within topographic positions. Water holding capacity (WHC) was estimated by pedotransfer functions from soil organic carbon (SOC) content and textural composition. The aerial biomass of corn crop (stover and kernel) and the N uptake were also determined. Water use efficiency in kernel (WUEk) and in total biomass (WUETB) were estimated among the topographic positions. Upland and lowland positions showed contrasting results in soil characteristics. Lower maize yields were found in the uplands, 4.5 t ha^{-1} on average; while higher yields were found in the mid-slope, averaging 10 t ha^{-1} . Maize yield variability at plot scale was associated with the N supply and the N mineralization rate. Lower WHC (25.2 mm) and mineralization rate (1.1%) in the upland positions resulted in lower yields and WUEk ($5.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), than in the other positions ($p < 0.05$). These results are promising for the SSNM and should be considered when characterizing spatial patterns at plot scale for the implementation of this technology.

Key words. Nitrogen availability, mineralization rate, topographic position, maize yield, Sandy Pampas, site-specific management.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad en los rendimientos a escala de lote puede atribuirse a diversos factores tales como la heterogeneidad de suelos, la posición en el paisaje, la disponibilidad de nutrientes, y la variabilidad microclimática, entre otras. La relación entre la topografía y los rendimientos es explicada por diversas causas. La posición en el paisaje influye en la redistribución de partículas de suelo y, por ende, condiciona el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes (Pennock y De Jong, 1990). Como consecuencia, la variabilidad en las propiedades físicas y químicas asociadas a la posición topográfica se evidencia a escala de lote (Kravchenko y Bullock, 2000). De igual modo, la disponibilidad hídrica puede verse afectada debido a su redistribución horizontal y vertical a lo largo del paisaje. En consecuencia, siendo el agua disponible para el cultivo el factor más crítico en los rendimientos (Afyuni *et al.*, 1993), la relación entre redistribución hídrica y topografía puede resultar significativa (Nosetto *et al.*, 2009).

Los suelos de la Pampa Arenosa se caracterizan por poseer una gran heterogeneidad espacial a escala de lote de producción (INTA, 1989), resultando en posiciones contrastantes en el paisaje. Estas posiciones se asocian a la variabilidad en el rendimiento de los cultivos, tanto por efectos directos como indirectos, al incidir sobre algunas propiedades edáficas (Urricariet *et al.*, 2004; Barraco, 2009). Dicha variabilidad se correlaciona con atributos del suelo como composición textural, contenido de materia orgánica, pH y disponibilidad de nutrientes, entre otros. Algunas de estas propiedades se reflejan en la heterogeneidad a escala de lote del almacenamiento de agua y la tasa de mineralización de nitrógeno (N) (Urricariet *et al.*, 2011; Zubillaga *et al.*, 2006) diferenciando ambientes por potencial de producción. En la Pampa Arenosa, las posiciones elevadas del terreno se caracterizan por presentar clases texturales más gruesas con una mayor infiltración y menor retención de agua en el perfil, en contraposición a las áreas más deprimidas (Barraco, 2009; Niborski *et*

al., 2006). De manera indirecta, la redistribución del agua en el perfil modifica la respuesta a la fertilización nitrogenada del maíz (Álvarez *et al.*, 2012).

La fertilización y las prácticas agronómicas según la tecnología manejo sitio-específico (MSE) se realizan considerando la variabilidad en la fertilidad de los suelos y requerimiento de los cultivos, para lo cual, es necesario discriminar ambientes. Los mapas de rendimiento de varias campañas permiten estimar rendimientos relativos potenciales de un mismo lote de producción y, en función del ajuste logrado, se pueden discriminar los ambientes. Estos ambientes contrastantes que tienen en común atributos de suelo y rendimientos semejantes facilitan el muestreo dirigido de suelos para estimar la dosis de fertilización. El desarrollo de la tecnología MSE requiere del entendimiento de los patrones de variabilidad a escala de lote de las transformaciones de N del suelo y la eficiencia de uso de agua y N por el cultivo, que inciden en la variabilidad en rendimientos por ambientes (Urricariet y Zubillaga, 2007). La incorporación de esta tecnología a los sistemas productivos requiere del conocimiento de la metodología de mayor respuesta al definir la dosis, momento y forma de aplicación de fertilizantes, con el fin de disminuir su impacto sobre el medio ambiente (Melchiori, 2007). La implementación de la tecnología de MSE de N dependerá de la posibilidad de predecir o controlar la demanda de N por el cultivo y la disponibilidad de N de los suelos (Egelkraut *et al.*, 2003). Los objetivos de este trabajo fueron evaluar la variabilidad en la disponibilidad de agua y de N y su relación entre el aporte de N por mineralización y el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) a escala de lote en ambientes asociados a la posición topográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del sitio de estudio

El experimento fue realizado en un establecimiento de la sub-región de la Pampa Interior (INTA, 1989), comúnmente denominada "Pampa Arenosa", ubicado

en la localidad de San Enrique, provincia de Buenos Aires (35°49'35''S, 60°26'W). En un lote de producción representativo de los sistemas de producción de la zona, y sobre la base de mapas de suelos elaborados a escala 1:6000 se situó una parcela experimental con una superficie de 10,5 ha. El mapa de suelos permitió diferenciar series y fases de los suelos predominantes, Hapludoles típicos y Hapludoles énticos (NRCS, 2003) asociados a las posiciones topográficas de bajo y loma, respectivamente. Los Hapludoles énticos, de escaso desarrollo pedogenético y algo excesivamente drenados, se distribuyen ocupando lomadas altas y cordones medianosos de orientación predominante norte-sur dentro de los ambientes ondulados. Los Hapludoles típicos, originados a partir de sedimentos eólicos medianamente gruesos, ricos en bases y de textura franco-arenosa ocupan posiciones más deprimidas, con drenaje moderadamente bueno. Las posiciones topográficas intermedias (media-loma), fueron caracterizadas como Hapludoles énticos, de cordones arenosos bajos y medias-lomas de cordones altos. Estos suelos, con mayor pendiente respecto de las lomas y los bajos, con moderadas a severas limitaciones por peligro de erosión eólica (aptitud de suelos clase Iles), tienen permeabilidad moderadamente rápida, escurrimiento lento y drenaje algo excesivo.

Diseño del experimento y muestreo de suelo y cultivo

En la parcela experimental se sembró el híbrido de maíz DK682MG el 08 de septiembre de 2006 bajo sistema de siembra directa y distancia entre hileras de 52,5 cm siendo soja (*Glycine max* L.) el cultivo antecesor. A la siembra del cultivo se fertilizó con 120 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (MAP) (11-52-0). Se realizó un levantamiento altimétrico mediante estación total (Kolida R455) sobre una grilla georreferenciada de 6 x 7 (pixelado de 50 m x 50 m) que permitió identificar tres posiciones en el paisaje (ambientes): loma (L), media loma (ML) y bajo (B). Para cada ambiente se contó con 3 repeticiones. Los bajos presentaron en promedio una cota relativa de 0,58 m inferior a la cota promedio del lote, y las lomas una cota relativa de 1,3 m superior a la cota promedio del lote. De cada sitio de muestreo (ambientes) se extrajeron muestras compuestas con barrenos hasta 180 cm (intervalos de 0-30 cm) previo a la siembra/fertilización y a cosecha del cultivo, con el fin de determinar contenido hídrico y de nitratos (N-NO₃⁻) en el

perfil del suelo. A madurez fisiológica del maíz (R6) (Ritchie y Hanway, 1982), se recolectaron plantas en una superficie equivalente a 1 m² para estimar la producción de biomasa aérea (rastrajo y grano) en cada ambiente. Dichas muestras fueron secadas en estufa a 60 °C hasta alcanzar constancia de peso y molidas (1 mm de malla) para realizar las determinaciones correspondientes.

Determinaciones analíticas

En las muestras de suelo del horizonte superficial (0-30 cm) se determinó la composición textural por el método de la pipeta (Gee y Or, 2002) y el carbono fácilmente oxidable (Cox) por el método de Walkley-Black modificado (Page *et al.*, 1982). La capacidad de agua disponible (CAD) fue estimada mediante funciones de edafo-transferencia correspondientes al contenido hídrico a potenciales mátricos de -33 kPa (CAD=0,2576-0,002*arena + 0,0036*arcilla + 0,0299*materia orgánica) y de -1500 kPa (CAD=0,026 + 0,005*arcilla + 0,0158*materia orgánica) (Rawls *et al.*, 1991). El contenido de N-NO₃⁻ inicial (siembra) y residual (cosecha) en el perfil del suelo fue determinado mediante la técnica de diazotación de SNEDD (Marbán, 2005). Todas las muestras de suelo fueron desmenuzadas a un tamaño inferior a 8 mm, homogeneizadas y acondicionadas en freezer a -4 °C, para su posterior determinación en laboratorio. La concentración de N en rastrajo y grano fue determinada por el método Kjeldhal (Bremner y Mulvaney, 1982). El N acumulado fue calculado como el producto de la concentración de N y la biomasa acumulada en rastrajo y grano.

La eficiencia en el uso del agua para grano (EUA_g) fue calculada como el cociente del rendimiento en grano (kg MS ha⁻¹) y la lámina total (mm). La eficiencia en el uso del agua para biomasa total (EUA_{BT}) resultó de la relación entre la biomasa aérea acumulada (kg MS ha⁻¹) por el cultivo y la lámina total (mm) en cada posición topográfica. La lámina de agua total fue obtenida por la ecuación de balance hídrico, calculado como la diferencia entre la lámina de agua del suelo al momento de la siembra y a cosecha más las precipitaciones totales ocurridas durante el ciclo del cultivo (Dardanelli *et al.*, 2002). La lámina de agua del suelo (mm) fue calculada como el producto de la humedad gravimétrica, la densidad aparente (g cm⁻³) y la profundidad de cada espesor. La tasa de mineralización se calculó como la proporción (%) del total de N orgánico mineralizado (N_{min}) durante el ciclo del cultivo. La cantidad aparente de N minera-

lizado en cada posición topográfica fue estimado según la Ecuación 1, propuesta por Schepers y Meisinger (1994):

$$N_{min} = N-NO_3^- \text{ residual} + N \text{ acumulado en planta (grano + rastrojo)} - N-NO_3^- \text{ inicial} - N \text{ (MAP)} \quad (1)$$

Registros meteorológicos

Las precipitaciones y temperaturas durante el ciclo del cultivo fueron registradas en el establecimiento de estudio. Las temperaturas medias resultaron similares al promedio histórico durante los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y marzo. En cambio, las temperaturas medias se ubicaron 10,7 °C por encima del promedio histórico durante los meses de enero, febrero y abril (Fig. 1a). Las precipitaciones totales acumuladas durante el ciclo del cultivo fueron de 945 mm, un 3% por encima del promedio histórico (Fig. 1 b). Las precipitaciones ocurridas durante el período de definición del rendimiento (15 días ± floración) se encontraron 32 mm por debajo del promedio histórico (diciembre). Las precipitaciones ocurridas durante el mes de enero superaron ampliamente al promedio histórico, mientras que en el mes de abril éstas resultaron un 40% por debajo del promedio histórico (Fig. 1 b).

Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA). Para detectar las diferencias

significativas entre medias se utilizó la prueba de LSD ($p < 0,05$). Dada la dependencia entre las observaciones del suelo muestreados en profundidad (intervalos de 0,30 m), el contenido de $N-NO_3^-$ y la humedad fueron analizados a partir de un ANOVA para un modelo lineal general con medidas repetidas, en donde la repetición fue anidada dentro de la profundidad. Además, se realizó una prueba Post-Hoc mediante el test de Tukey HSD para detectar diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) (Statistica, 2007). Se realizaron análisis de correlación lineal entre las variables analizadas (R environment, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características edáficas de los ambientes según posiciones del paisaje

Los ambientes L y B presentaron características edáficas contrastantes (Cuadro 1). El contenido de arenas de los ambientes de L fue 10% mayor al de B; mientras que las fracciones más finas (arcilla+limo) resultaron un 28% menores en L que en B. Los ambientes de B presentaron la mayor CAD ($p < 0,05$) de todas las posiciones del paisaje (Cuadro 1). En los B, los niveles de Cox oscilaron entre 41,6 y 57,8 t C ha⁻¹; y en las posiciones más elevadas entre 32,6 y 48,2 t C ha⁻¹, aunque no se evidenciaron diferencias significativas entre ambientes (Cuadro 1).

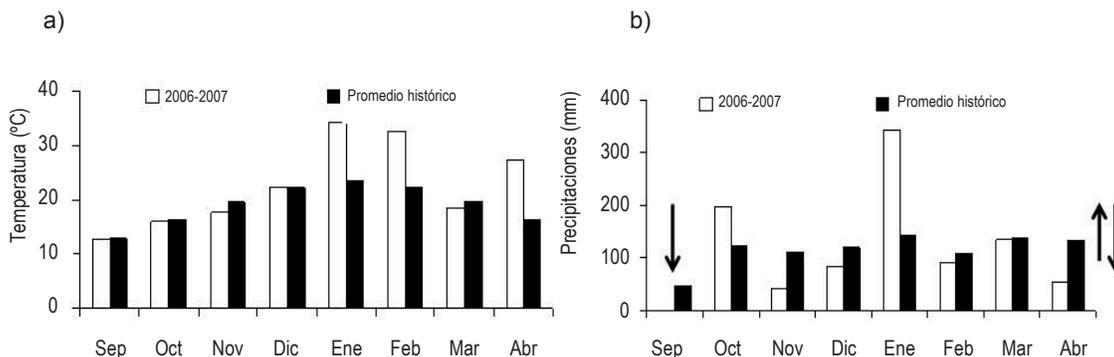


Figura 1. Temperaturas (a) y precipitaciones mensuales (b) durante el ciclo de crecimiento del cultivo de maíz. Registro histórico de temperaturas y de precipitaciones (series de 1980-2005). Flechas hacia abajo indican momentos de muestreo de suelos. Flechas hacia arriba indican momento de muestreo de cultivo.

Cuadro 1. Contenido promedio de arenas, arcilla+limo, carbono oxidable (Cox) y capacidad de agua disponible (CAD) del suelo (0-30 cm) según ambientes de loma (L), media-loma (ML) y bajos (B).

| Posición topográfica | Arenas g kg ⁻¹ | Arcilla+Limo g kg ⁻¹ | Cox t ha ⁻¹ | CAD mm |
|----------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------|
| L | 80,6 a | 19,4 b | 38,2 a | 25,2 b |
| ML | 78,6 ab | 21,4 ab | 39,4 a | 28,5 b |
| B | 73,0 b | 27,0 a | 48,8 a | 31,9 a |
| DS | 4,4 | 4,4 | 8,8 | 3,7 |

Letras diferentes indican diferencias significativas entre ambientes ($p < 0,05$). DS: desvío estándar.

Disponibilidad de agua y nitrógeno por ambientes

La concentración de NO₃⁻ al momento de la siembra del cultivo presentó un patrón de distribución decreciente a lo largo del perfil del suelo (Fig. 2 a), con mayor concentración de NO₃⁻ ($p < 0,05$) en el espesor superficial. En dicho espesor, las L presentaron en promedio una concentración de 26 mg kg⁻¹ de NO₃⁻ menor que el promedio de los otros ambientes (Fig. 2 a). El contenido hídrico presentó una tendencia decreciente en el perfil del suelo hasta los 90 cm de profundidad en todos los ambientes (Fig. 2 b). Las posiciones topográficas más bajas evidenciaron una distribución más homogénea en los perfiles hídricos, siendo que el contenido de humedad promedio fue 17% en el espe-

sor superficial, y 19% en el espesor de 150-180 cm (Fig. 2 b). Patrones similares de los perfiles hídricos y de NO₃⁻ iniciales fueron observados en estudios recientes realizados en Pampa Arenosa (Muschietti Piana, 2012).

Los contenidos de N-NO₃⁻ iniciales (Ni) del perfil de suelo presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambientes (Cuadro 2). A la siembra del cultivo, el Ni del perfil de suelo en L fue en promedio 49 kg N ha⁻¹ menor que en B ($p < 0,05$). Esto coincidió con lo observado en estudios realizados en Pampa Arenosa con diferencias semejantes entre ambientes (Muschietti Piana, 2012). Las estimaciones de Nmin oscilaron entre un valor mínimo de 20 kg ha⁻¹ en L y un máximo de 153 kg

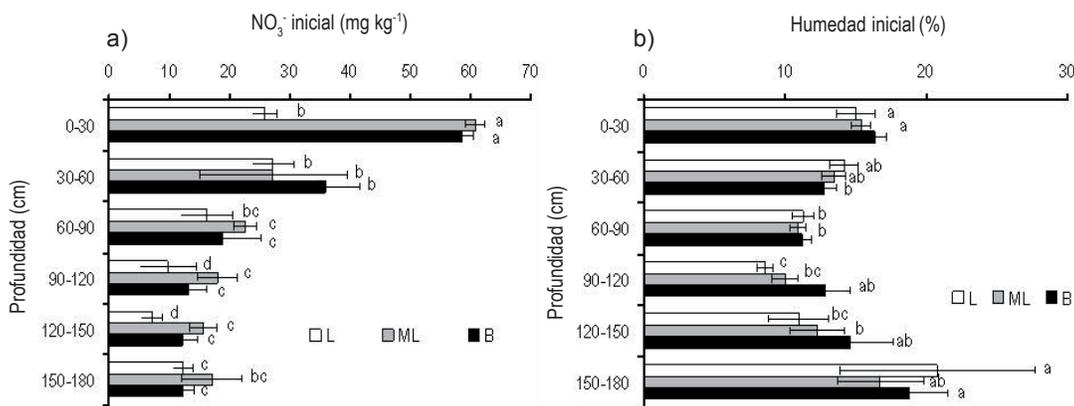


Figura 2. Contenido promedio de nitratos (a) y humedad inicial (b) del perfil del suelo por espesor (0-30 cm) según ambientes de loma (L), media-loma (ML) y bajo (B). Barras horizontales indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

ha⁻¹ en B. En L, Nmin resultó en promedio un 56% menor que lo encontrado en B ($p < 0,1$), mientras que valores intermedios fueron encontrados en ML (Cuadro 2). En otro estudio realizado en el NO de la provincia de Buenos Aires, el Nmin estimado con la misma metodología fue de 160-180 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ en un Hapludol típico, ubicado en las posiciones de menor cota relativa, y de 60-80 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ en un Hapludol éntico, situado en las posiciones de mayor cota relativa (Zubillaga *et al.*, 2006). En consecuencia, bajo las condiciones experimentales estudiadas, el N disponible (Ni + Nf (MAP) + Nmin) resultó menor en L ($p < 0,05$), que en el resto de las posiciones topográficas.

Las tasas de mineralización oscilaron entre valores de 0,97 y 2,2%, resultando menores ($p < 0,06$) en L que en ML (Cuadro 2). Estos resultados son coincidentes con los obtenidos en otros experimentos realizados en suelos de la Pampa Arenosa, cuyas tasas de mineralización resultaron en promedio del 0,9% en las posiciones topográficas de lomas y 1,9% en los bajos (Zubillaga *et al.*, 2009). La variabilidad encontrada en las tasas de mineralización y en el Ni puede justificar la aplicación de dosis variables de N en las condiciones estudiadas. La aplicación uniforme de N en suelos de las características referidas resulta en ambientes sub-fertilizados y sobre-fertilizados en un mismo lote. En estos últimos casos, existe mayor susceptibilidad de lixiviación de N-NO₃⁻ (Rimski-Korsakov *et al.*, 2004). Por otra parte, no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la lámina de agua total a la siembra del cultivo entre ambientes (Cuadro 2) debido a precipitaciones abundantes

ocurridas al momento de la siembra (20% del total acumulado durante el ciclo de cultivo).

La concentración de NO₃⁻ residuales mostró una tendencia decreciente en profundidad (Fig. 3 a), coincidiendo con el comportamiento frecuente del nutriente. En general, el contenido de NO₃⁻ del suelo suele presentar gran variabilidad (Diez *et al.*, 1994). De manera general, la mayor variabilidad resultó en el espesor superior, decreciendo en profundidad a lo largo del perfil, contrariamente a lo observado por Rimski-Korsakov *et al.* (2004) en experimentos realizados en Argiudoles y Hapludoles de la Región Pampeana. En el espesor de 120-150 cm y de 150-180 cm, la posición de L presentó una concentración promedio de NO₃⁻ de 3,2 y 4,5 mg kg⁻¹ respectivamente, y fue menor a lo hallado en ML y B (Fig. 3a).

Los perfiles hídricos a cosecha presentaron una tendencia decreciente hasta los 90 cm en todas las posiciones del paisaje. A partir de los 90 cm, la humedad se mantuvo relativamente homogénea en profundidad hasta los 180 cm (Fig. 3 b), a excepción del B, cuyo contenido hídrico a 180 cm de profundidad resultó en promedio un 23% mayor que en los dos espesores suprayacentes (Fig. 3 b). Se podría inferir que en las posiciones más bajas, la capa freática se alojó entre los 150-180 cm de profundidad al momento del muestreo. Sin embargo, al realizar el mapa de suelos, en condiciones extremas de humedad se observó en suelos de la zona oscilaciones de la capa freática entre 120-150 cm.

Cuadro 2. Contenido promedio de N inicial (Ni), N mineralizado durante el ciclo del cultivo (Nmin), tasa de mineralización y lámina de agua del suelo (0-180 cm) a la siembra del maíz por ambientes de loma (L), media-loma (ML) y bajo (B).

| Posición topográfica | Ni — kg N-NO ₃ ⁻ ha ⁻¹ — | Nmin | Tasa de mineralización % | Lámina mm |
|----------------------|--|---------|-----------------------------|--------------|
| L | 97,6 b | 47,0 b | 1,1 b | 360 a |
| ML | 167,3 a | 61,9 ab | 2,2 a | 353 a |
| B | 146,1 a | 107,3 a | 1,9 ab | 388 a |
| DS | 34,7 | 28,3 | 0,4 | 55 |

Letras diferentes indican diferencias significativas entre ambientes ($p < 0,05$). DS: desvío estándar.

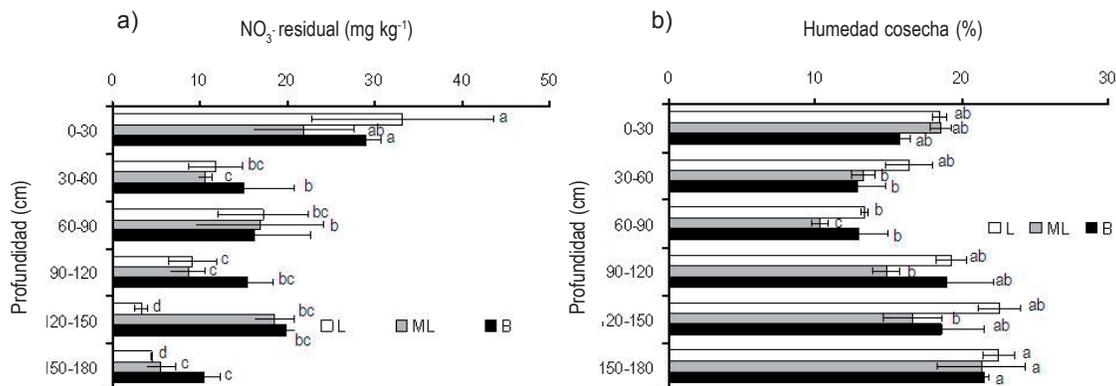


Figura 3. Contenido promedio de nitratos (a) y humedad a cosecha (b) del perfil del suelo por espesor (0-30 cm) según ambientes de loma (L), media-loma (ML) y bajo (B). Barras horizontales indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Rendimiento y nitrógeno acumulado por el maíz

Los menores rendimientos de maíz se encontraron en ambientes de L ($p < 0,05$), con un promedio de $4,5 \text{ t ha}^{-1}$; mientras que B y ML alcanzaron en promedio $7,2$ y 10 t ha^{-1} , respectivamente (Fig. 4 a). La biomasa acumulada en rastrojo del maíz resultó mayor en ML que en L ($p < 0,05$), y dicha diferencia resultó en promedio de $2,7 \text{ t MS ha}^{-1}$ (Fig. 4 a). En lotes con marcados gradientes topográficos, comunes en los paisajes medanosos del oeste de la Región Pampeana, la producción de granos en las posiciones bajas ha superado de 2

a 10 veces a lo producido en las lomas. Estas diferencias podrían atribuirse al aporte de agua por ascenso freático que puede resultar en un aporte de agua adicional a los cultivos de raíces profundas, especialmente en años secos (Nosetto *et al.*, 2009). Por el contrario, bajo las condiciones experimentales (Fig. 1) se asume que las lluvias ocurridas durante el mes de enero generaron probablemente condiciones de anoxia en las posiciones de B para el cultivo de maíz que explicarían las ligeras diferencias con las posiciones de ML (Fig. 4 a).

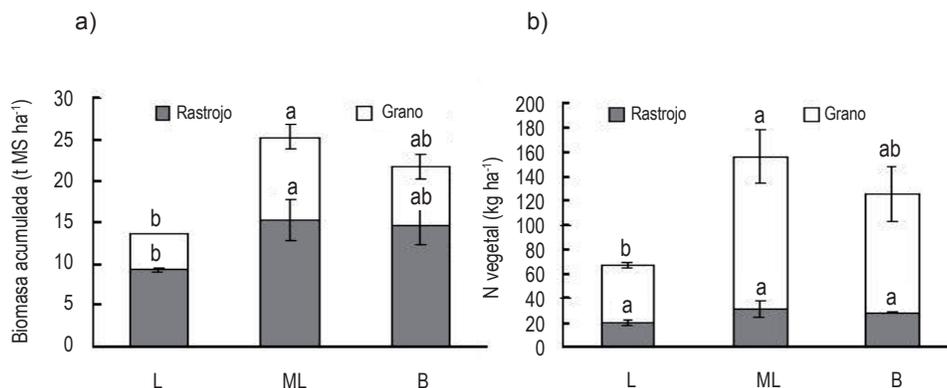


Figura 4. Biomasa acumulada en rastrojo y grano (kg MS ha^{-1}) (a) y N acumulado en rastrojo y grano (b) del cultivo de maíz por ambientes. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas ($p < 0,05$).

De manera similar, el N acumulado en grano resultó 82 kg N ha^{-1} mayor en ML que en L. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en cuanto al N acumulado en rastrojo del maíz entre ambientes (Fig. 4b). La mayor proporción de N acumulado fue exportada del sistema por el grano en todas las posiciones topográficas (Fig. 4b). Todos los tratamientos presentaron una relación de N acumulado en grano y rendimiento del maíz entre $10,7\text{-}14,5 \text{ g N kg}^{-1}$ grano, siendo 12 g N kg^{-1} el límite validado en la Región Pampeana por Uhart y Andrade (1995), por debajo del cual el rendimiento se encuentra afectado por deficiencias de N. Más recientemente, otros estudios reportaron valores cercanos a 10 g N kg^{-1} grano de maíz en aquellos tratamientos con adecuada provisión de N (Barbieri *et al.*, 2008).

Eficiencia en el uso del agua y nitrógeno por el maíz

La EUA para grano resultó mayor en ML que en L ($p < 0,05$) con valores promedio de $5,5$; $11,6$ y $8,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ en los ambientes de L, ML y B, respectivamente. Los resultados del presente estudio concuerdan con lo observado por Katerji *et al.* (2010), dado que la EUA resultó menor en los suelos de menor CAD (L) que en aquellos de ma-

yor CAD (ML y B). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la EUA para biomasa total entre ambientes ($p < 0,05$).

En términos generales, la variabilidad en los rendimientos del maíz a escala de lote se asoció a componentes que regulan la dinámica del N, tales como el N disponible ($\text{Ni} + \text{Nmin}$), la tasa de mineralización y la oferta hídrica. El rendimiento del maíz presentó una relación lineal positiva con el N disponible ($\text{Ni} + \text{Nmin}$) ($r^2 = 0,52$ y $p = 0,02$) (Fig. 5a) y con el Ni ($r^2 = 0,40$ y $p = 0,007$) (Fig. 5b). El aporte de N por mineralización resulta un factor importante para explicar la variabilidad en los rendimientos del maíz entre ambientes a escala de lote bajo las condiciones experimentales estudiadas.

En los ambientes evaluados, las L presentaron elevados contenidos de arenas, respecto de las otras posiciones topográficas (Cuadro 1), guardando relación con una menor CAD y EUA. Esto concuerda con los resultados de Niborski *et al.* (2006) y Urricariet *et al.* (2011) en estudios conducidos en la Pampa Arenosa, cuyos ambientes de lomas con altos contenidos de arenas se correspondieron con menores niveles de Cox, CAD y rendimiento de maíz. Es de esperar que en suelos de un amplio rango textural, propio de la región semiárida pampeana (INTA, 1989) que se puede

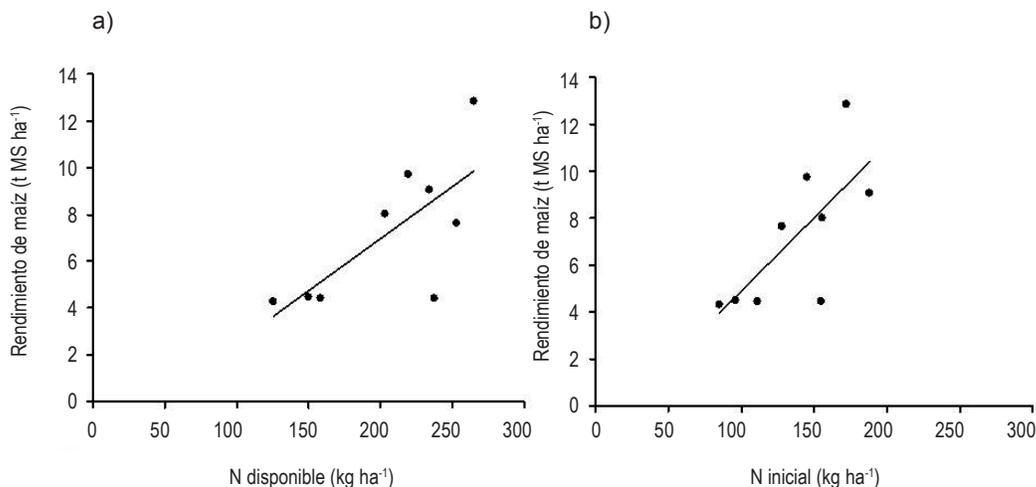


Figura 5. Relación entre el rendimiento de maíz y el N disponible ($\text{Ni} + \text{Nmin}$) (a) y el N inicial (b) para todos los ambientes.

observar aún a la escala analizada, los rendimientos del maíz decrezcan bajo el predominio de texturas más gruesas que condicionan la oferta hídrica, sumado al menor N disponible para el cultivo. En experimentos realizados sobre suelos similares, el contenido de arenas explicó el 64% de la variabilidad de los rendimientos del maíz (Urricariet *et al.*, 2011). Siendo la composición textural del suelo un aspecto propio de la génesis del suelo que no es posible modificar (Porta *et al.*, 1994), y un parámetro que define la capacidad de retención de agua útil del suelo, resulta imprescindible su caracterización a escala de lote, especialmente al implementar recomendaciones de fertilización según MSE de N.

CONCLUSIONES

La variabilidad en la oferta inicial de N a escala de lote guardó relación con la posición en el paisaje y la composición textural del suelo. En tér-

minos generales, la variabilidad en los rendimientos del maíz se asoció a los atributos que regulan la dinámica del N, tales como el N disponible y la tasa de mineralización.

El menor contenido inicial de N en las posiciones más elevadas del paisaje se correspondió con los Hapludoles énticos. Esto podría explicar los menores rendimientos obtenidos en estas posiciones que se correspondieron, además, con bajas tasas de mineralización y capacidad de agua disponible y una menor eficiencia en el uso del agua en grano por el cultivo de maíz.

Resulta de interés tener en cuenta el N mineralizado durante el ciclo del cultivo de maíz para discriminar ambientes a escala de lote en las condiciones experimentales estudiadas. Estos resultados tienen implicancias para la tecnología de fertilización sitio-específica de N y deben ser consideradas al momento de caracterizar e identificar patrones espaciales a escala de lote, que resultan de gran utilidad para su implementación.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R.; P. Prystupa; M.B. Rodríguez y C.R. Álvarez. 2012. Fertilización de Cultivos y Pasturas. Diagnóstico y Recomendación en la Región Pampeana, Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires. 656 p.
- Afyuni, M.M.; D.K. Cassel and W.P. Robarge. 1993. Effect of landscape position on soil water and corn silage yield. *Soil Science Society of America Journal* 57: 1573-1580.
- Barbieri, P.A.; H.E. Echeverría; H.R. Saínz Rozas and F.H. Andrade. 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. Journal* 100: 1094-1100.
- Barraco, M. 2009. Productividad de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] según propiedades edáficas de Hapludoles de la región de la Pampa Arenosa. Tesis de Magister en Ciencias del Suelo, Escuela para Graduados Alberto Soriano, Facultad de Agronomía. UBA. 113pp.
- Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen Total. In: Page A.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Wisconsin. USA. pp. 595-622.
- Dardanelli, J.; D.J. Collino; M.E. Otegui y V.O. Sadras. 2002. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción. En: Satorre, E.H.; R.L. Vence; G.A. Slafer; E.B. De la Fuente; D.J. Miralles; M.E. Otegui y R. Savin. Producción de cultivos de grano: bases funcionales para su manejo. FAUBA. Pp. 375-440.
- Diez, J.A.; R. Roman; M.C. Cartagena; A. Vallejo; A. Bustos and R. Caballero. 1994. Controlling nitrate pollution of aquifers by using different nitrogenous controlled release fertilizers in maize crop. *Agricultural Ecosystem Environment* 48: 49-56.
- Egelkraut, T.; D. Kissel; M. Cabrera and W. Adkins. 2003. Predicting N mineralization in a Georgia Coastal Plain field. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 1-12.
- Gee, G.W. and D. Or. 2002. Particle-Size Analysis. In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part 4: Physical Methods. Soil Sci. Soc. of Amer. Inc. Madison, Wisconsin, USA. Pp. 255-293.

- INTA. 1989. Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. INTA. 525 p.
- Katerji, N.; M. Mastrorilli and E.C. Houssem. 2010. Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency. 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. *European Journal of Agronomy* 32: 177-185.
- Kravchenko, A.N. and D. Bullock. 2000. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91: 393-400.
- Marbán L. 2005. Metodologías de extracción y determinación de nitratos en suelos. Parte II. *En: L. Marbán y S. Ratto (eds.). Tecnología en análisis de suelos. Grancharoff Impresores, Buenos Aires. Pp. 131-138.*
- Melchiori, R. 2007. Estado actual del manejo sitio-específico de nitrógeno en Argentina. *En: 8º Curso de Agricultura de Precisión y 2ª Expo de Máquinas Precisas. INTA Manfredi, Córdoba. Argentina. Pp.77-84.*
- Muschietti Piana, M.P. 2012. Riesgo de pérdida de nitratos por lixiviación en fertilizaciones nitrogenadas uniforme y sitio-específico en cultivo de maíz. Tesis de maestría, Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 108 pp.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2003. Keys to Soil Taxonomy. *In: United States Department of Agriculture. Washington. 332 p.*
- Niborski, M.J.; S. Urricariet y C. Kvolek. 2006. Distribución de la oferta hídrica y su impacto en el rendimiento de maíz a escala superdetallada. *En: Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, 4p.*
- Nosetto, M.D.; E.G. Jobbágy; R. Jackson and G. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113: 138-148.
- Page A.L.; R.H. Miller and D.R. Keeney. 1982. Methods of Soil Analysis. Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin. 1159 p.
- Pennock, D.J. and E. de Jong. 1990. Spatial pattern of soil redistribution in boroll landscapes, southern Saskatchewan, Canada. *Soil Science* 50: 867-873.
- Porta, J.; M. Lopez Acevedo y C. Roquero. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi Prensa, Madrid, España. 803 p.
- R Development Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria.
- Rawls, W.J.; T.J. Gish and D.L. Brakensiek. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristic. *Advances in Soil Science* 16: 213-234.
- Rimski-Korsakov, H.; G. Rubio and R.S. Lavado. 2004. Potential nitrate losses under different agricultural practices in the pampas region, Argentina. *Agricultural Water Management* 65: 83-94.
- Ritchie, S. and J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology.
- Schepers, J.S. and J.J. Meisinger. 1994. Field indicators of nitrogen mineralization. *In: Havlin, J. and J. Jacobsen (ed). Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations. SSSA Spec. Pub. N° 40 SSSA-ASA. Madison, Wisconsin USA.*
- Statistica, 2007. Statistica versión 7. StatSoft. Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos.
- Uhart, S.A. and F.H. Andrade. 1995. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. *Crop Science* 35: 183-190.
- Urricariet, S.; M. Niborski y C.M. Kvolek. 2011. Atributos de suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la Pampa arenosa. *Ciencia del Suelo* 29: 49-59.
- Urricariet, S.; M. Presutti; H. Rosatto; M. Amado; M. Niborski y G. Botta. 2004. Uso del modelo digital de elevación y mapa de suelos para un manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en maíz. *En: Navone S.M.; H. Rosatto y F. Vilella. (eds.). Teledetección aplicada a la problemática ambiental argentina. CIATE-FAUBA. EFA, Buenos Aires, Argentina. Pp 85-95.*
- Urricariet, S. y M.M. Zubillaga. 2007. Alcances y perspectivas del manejo sitio-específico de la fertilización. *En: Prystupa, P. (ed.). Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. EFA, Buenos Aires, Argentina. Pp 161-181.*
- Zubillaga, M.M.; M.L. Cabrera and N. Vaio. 2009. Spatial variation of potentially mineralizable nitrogen within a field. *In: 16th Nitrogen Workshop. Turín, Italia. Pp.85-86.*
- Zubillaga, M.M.; P.A. Cipriotti y M.J. Barros. 2006. Asociaciones espaciales entre el N mineralizado y otras variables edáficas a nivel de lote. *En: Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, 5 p.*