

Recibido 27 de diciembre de 2018 // Aceptado 23 de abril de 2019 // Publicado online 14 de abril de 2021

Rendimiento del maíz ante el agregado de zeolita y yeso a la fertilización nitrogenada en un Argiudol típico de San Antonio de Areco

BELTRÁN, M.J.¹; HERRMANN, C.²; ROMANIUK, R.I.¹; FERNANDEZ, A.²; JECKE, F.³; MOUSEGNE, F.³

RESUMEN

Los objetivos del presente trabajo fueron evaluar los efectos de la aplicación de yeso y zeolitas acompañando la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo de maíz y estimar los costos en relación con el beneficio (rendimiento) de los tratamientos ensayados. Durante la campaña 2017/18 en un Argiudol típico de la localidad de San Antonio de Areco se establecieron 18 parcelas, a las que se les aplicó como fertilización base 100 kg de fosfato mono amónico (FMA) a la siembra. Los tratamientos ensayados fueron (1) maíz fertilizado con 200 kg ha⁻¹ de urea (U), (2) 200 kg ha⁻¹ de urea y 90 kg ha⁻¹ de yeso (U+Y), (3) 150 kg ha⁻¹ de urea y (4) 50 kg ha⁻¹ de zeolita granulada (U+Z); y 150 kg ha⁻¹ de urea, 90 kg ha⁻¹ de yeso y 50 kg ha⁻¹ de zeolita granulada (U+Y+Z) y (5) situación testigo sin fertilización nitrogenada (T). En los tratamientos (U + Z) y (U + Y + Z) se reemplazó un 25% de urea con zeolitas. La fertilización con urea (U) y urea + yeso (U+Y) produjeron incrementos del 18% y 16%, respectivamente respecto al testigo, mientras que cuando se aplicó la urea junto con el yeso y la zeolita (U+Y+Z) el incremento en rendimiento estuvo en el orden del 25% (p<0,05). El tratamiento (U+Z) no difirió estadísticamente del testigo, pero tampoco del tratamiento fertilizado con urea solamente. De acuerdo a los datos obtenidos en este ensayo en particular, los tratamientos de reemplazo de 25% de urea por zeolita, sola o con adición de yeso, representarían una alternativa interesante para disminuir los costos sin afectar los rendimientos del cultivo de maíz.

Palabras clave: *Zea mays* L., siembra directa, agrominerales, costo/beneficio.

ABSTRACT

The objectives of the present work were to evaluate the effects of the application of gypsum and zeolites accompanying the nitrogen fertilization over the grain yield of corn as well as to estimate the costs in relation to the benefit of the treatments. During the 2017/18, campaign 18 plots were established in a typical Argiudol soil of San Antonio de Areco, Buenos Aires. As base fertilization, there was applied 100 kg ha⁻¹ of mono ammonium phosphate (MAP) as fertilizer to all the plots at sowing. Treatments were: (1) 200 kg ha⁻¹ of urea (U); (2) 200 kg ha⁻¹ of urea with 90 kg ha⁻¹ of gypsum (U+Y); 150 kg ha⁻¹ of urea with 50 kg ha⁻¹ of granulated zeolite (U+Z); 150 kg ha⁻¹ of urea, 90 kg ha⁻¹ of gypsum and 50 kg ha⁻¹ of granulated zeolite (U+Y+Z) and a control treatment with none nitrogen fertilization. (T). At the U+Z and U+Z+Y treatment, 25% of the urea rate was replaced with

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Suelos, Nicolás Repetto y De los Reseros s/n (1686) Hurlingham, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: beltran.marcelo@inta.gov.ar

²Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

³Instituto Nacional de Tecnología Agrícola (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Pergamino, Agencia de Extensión Rural (AER) San Antonio de Areco, Zapiola 237 (2760), San Antonio de Areco, Buenos Aires, Argentina.

zeolites. Fertilization with U and U+Y rose grain yield by 18 and 16%, respectively, over the control treatment, whereas urea was applied together with gypsum and zeolites (i.e. U+Y+Z) yield increase reached about 25% ($p < 0,05$). There was not detected difference in terms of grain yield between U + Z treatment and control or the treatment fertilized with urea alone. Based on the experimental results, replacement of 25% of urea with zeolite, alone or in combination with gypsum represents an interesting alternative to reduce costs without affecting corn yields. Nevertheless, more experiments are need, in order to prove it in different situation.

Keywords: *Zea mays L., no-tillage, agrominerals, cost/benefit.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso agotable y su uso intensivo requiere la incorporación de micro y macronutrientes para preservar su calidad. La evolución de producción agrícola-ganadera en la Argentina hacia una agricultura continua y el desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente mixtas o ganaderas produjo una elevada extracción de nutrientes que no fueron repuestos en igual magnitud, poniendo en peligro la sustentabilidad de los sistemas productivos (Cruzate y Casas, 2003; Cruzate y Casas 2012). Es así que existe un balance negativo de los nutrientes del suelo debido a las bajas tasas de reposición a través de la fertilización, lo cual determina un creciente empobrecimiento en nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y boro (B), entre otros elementos esenciales. (García, 2003; García y González Sanjuán 2010).

En este contexto, la utilización de minerales disponibles en yacimientos existentes en la Argentina surge como una alternativa sustentable para reabastecer los suelos agrícolas con elementos deficientes y críticos para la productividad de los cultivos, permitiendo a su vez sustituir insumos que actualmente deben ser importados o disminuir su importación. A nivel mundial, se observa un creciente interés por la utilización de fertilizantes y fitosanitarios biológicos o naturales que permitan optimizar la producción agrícola y al mismo tiempo coadyuven a la conservación, a la recuperación y al mejoramiento de los recursos naturales (Cruzate y Casas, 2009).

En términos generales, los recursos minerales aplicados al agro pueden agruparse en los que son utilizados como fertilizantes (macro y micronutrientes); y en aquellos utilizados como enmiendas (correctores de suelos). Se considera enmienda a cualquier material inorgánico u orgánico, con capacidad para modificar las características físicas, la acción microbiana, y cambiar la reacción del suelo (Ramos *et al.*, 2006). Entre las enmiendas de origen mineral se destacan el yeso, las rocas carbonáticas (calizas y dolomías), zeolita, perlita, turba, vermiculita y determinadas arcillas, entre otros. Un desarrollo sectorial sustentable debe recurrir al uso de fertilizantes y enmiendas elaboradas a partir de materias primas minerales, para mejorar la producción y disminuir la degradación de los suelos (Ramesh y Reddy, 2011).

La fertilización azufrada es una práctica en expansión en diversos países alrededor del mundo. Para América del

Sur, la Argentina y Brasil son los países con mayor demanda de fertilizantes azufrados. En Argentina la mayor parte de la demanda de S con destino a la fertilización de cultivos se origina en la región Pampeana, principal zona de producción de granos del país (trigo, cebada, maíz, sorgo, soja, girasol). Actualmente la fertilización azufrada es una práctica muy instalada en los sistemas de producción, siendo el S el tercer nutriente limitante del rendimiento de los cultivos luego del N y del P (Torres Duggan *et al.*, 2012).

Como alternativa a los fertilizantes azufrados comúnmente utilizados, surge la utilización del yeso. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un mineral común en ambientes sedimentarios (Casby-Horton *et al.*, 2015). Si bien su uso tradicional a escala mundial es la de mejorar suelos sódicos, tiene otros múltiples usos. Así, el yeso es una excelente fuente de Ca y S, dos macroelementos esenciales necesarios para la nutrición de las plantas (Dontsova *et al.*, 2005); su contenido teórico alcanza 18,6% S y 23% Ca aunque el "yeso agrícola" que es la roca que se comercializa en el ámbito agropecuario contiene diversos grados de pureza. Asimismo, el yeso ha sido utilizado como una enmienda en los suelos agrícolas por más de 200 años (Anikwe *et al.*, 2016) debido a su potencial para mejorar la calidad del suelo y la productividad agrícola (Favaretto *et al.*, 2006). Se considera una alternativa económicamente viable para ser utilizada como fertilizante para suplementar los requerimientos de S y remediar los suelos con deficiencia de este nutriente. Los resultados derivados de la aplicación de yeso a campo son consistente en los incrementos en Ca^{2+} y SO_4^{2-} derivados de su uso, incluso en capas subsuperficiales, variando la respuesta en función de la dosis, condiciones edáficas locales, clima y manejo. Sin embargo, los efectos del yeso en el rendimiento de los cultivos han demostrado ser más variables generalmente dependiendo de las condiciones climáticas y el tipo de suelo donde fueron aplicados (Caires *et al.*, 2003; Rampim *et al.*, 2011).

Otro aspecto que debe considerarse es el relacionado con la eficiencia de la fertilización nitrogenada (Ferraris *et al.*, 2009). Son ampliamente conocidas las pérdidas derivadas de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en suelos (lixiviación, volatilización, etc.), con pérdidas de hasta el 70% del nitrógeno aplicado, con la consecuente pérdida de rendimiento de los cultivos, además de la contaminación del suelo y agua por los nitratos (Sainz Rozas *et al.*, 1997). En relación con ello el uso de fertilizantes de libe-

ración lenta da solución parcial a estas pérdidas, liberando el N de forma gradual y de esta manera incrementando la eficiencia en su uso. En este contexto, el uso de zeolitas aplicadas junto con los fertilizantes nitrogenados constituye una alternativa al uso de fertilizantes de liberación gradual (Barbieri *et al.*, 2010; Van Straaten, 2014).

La zeolita, tal como se la utiliza en el ámbito agropecuario, forma parte de rocas que se las utiliza como fertilizantes o enmiendas (ej. tobas con diferente grado de alteración de su material precursor). Los minerales de zeolita, de los cuales hay diferentes y muy variadas especies mineralógicas, están formados por silicio en forma de silicato combinado con átomos de oxígeno y aluminio en una estructura cristalina tridimensional rígida, que deja pequeñas cavidades interconectadas llamadas microporos. Esta capacidad de retención de nutrientes y agua se debe a que el material tiene abundantes cargas negativas en la superficie y en los microtúneles internos, otorgándole una elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Chester y Derouane, 2009). Las rocas portadoras de Heulandita/clinoptilolita tiene una CIC de 150-200 m.e./100 g, la cual es hasta ocho veces más alta de aquella medida en los suelos agrícolas. Por ello, su aplicación, mezclada con los fertilizantes o directa al suelo, mejora de manera sustancial su capacidad de retención y el aprovechamiento de nutrientes por las plantas, además de mejorar las condiciones físicas y biológicas de la capa arable (Herrmann y Torres Duggan, 2016). La alta afinidad de las zeolitas por el NH_4^+ (Urquiaga y Zapata, 2000) le permite retenerlo en sus canales evitando así su mineralización a NO_3^- por bacterias nitrificantes y reduciendo al mismo tiempo las pérdidas de nitrógeno debidas a las rápidas transformaciones bioquímicas y químicas que sufren los fertilizantes nitrogenados en el suelo, principalmente en forma de NO_3^- y NH_4^+ por lixiviación y volatilización, respectivamente, pero producidas también por desnitrificación (Barbarick y Pirela, 1983; Rimski-Korsakov *et al.*, 2015). En los resultados experimentales obtenidos en diversos ensayos en Colombia y México, la mezcla de 25% de zeolita con urea o con los fertilizantes químicos aplicados ha mostrado ser la más efectiva para optimizar su eficiencia y el rendimiento de los cultivos (Soca-Nuñez y Villarreal-Nuñez, 2016; Gonzales Camarillo *et al.*, 2012).

En la Argentina existen cuantiosas reservas de yeso y solo un porcentaje minoritario de su explotación es derivado al uso agrícola. Las regiones del país con mayor potencial para la producción de yeso con destino al uso agrícola son la cuenca neuquina incluido el sur de Mendoza, el oeste y centro-oeste argentino, el sur de Mesopotamia (provincia de Entre Ríos), la región noroeste para un abastecimiento regional, y Buenos Aires y La Pampa. Los yacimientos más importantes, por reservas y leyes, son los de origen marino (en nuestro país son los ubicados en la provincia geológica cuenca neuquina), aunque los de origen lacustre situados en cuencas intermontanas de los sectores extraandinos son muy explotados por su cercanía a los principales centros de consumo (Herrmann y Torres Duggan, 2016).

Con respecto a las rocas portadoras de zeolitas, se trata de un grupo mineral de oferta más reducida. Si bien es re-

lativamente difícil de prospectar, ya que su identificación definitiva se logra mediante difracción de rayos X, organismos como el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) han llevado a cabo dicha tarea desde hace varios años con resultados satisfactorios. Las zeolitas conforman un grupo mineral de aluminosilicatos hidratados de elementos alcalinos y alcalinotérreos (Ca, Na, K), que se caracterizan por su continua (y en parte reversible) deshidratación y por sus propiedades de intercambio de cationes, principalmente de NH_4^+ y K^+ . Sus yacimientos son niveles de piroclastos alterados ("zeolitizados") originados en depósitos lagunares de antiguas cuencas intermontanas, que se presentan en forma de estratos o mantos, y dentro de ellos uno o más niveles de tobas muy zeolitizadas. Se destacan los yacimientos ubicados en la cuenca de Paganzo (La Rioja), con mineralogía de la serie Heulandita/clinoptilolita; en otras zonas del país (Mendoza) se han hallado zeolitas del grupo mordenita. Algunos de ellos han desarrollado ya su explotación y comercialización del producto (Agosto *et al.*, 2005).

Los objetivos del presente trabajo fueron i) evaluar los efectos de la aplicación de yeso y zeolitas acompañando la fertilización de urea sobre el rendimiento del cultivo de maíz en un Arguidol típico de San Antonio de Areco manejado bajo siembra directa y ii) analizar los costos en relación con el beneficio (rendimiento) de los tratamientos ensayados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló durante la campaña 2017/18 en el establecimiento La Fe, ubicado en el partido de San Antonio de Areco, provincia de Buenos Aires. La unidad cartográfica correspondiente al área de estudio presenta un 100% de la serie de suelos Capitán Sarmiento (mapas de suelo INTA). Dicha serie es por superficie y capacidad productiva, la más importante del partido de San Antonio de Areco, habiendo sido clasificada como un Arguidol, fino, illítico, muy profundo, de textura franco arcillo limosa, y 3,4% de materia orgánica en el horizonte superficial. La temperatura media es de 16,5 °C, produciéndose las temperaturas medias mensuales más bajas en junio y julio, mientras que las temperaturas medias mensuales más altas ocurren de diciembre a marzo. Por su parte, la precipitación media anual regional es de 1084 mm, el 75% de estas ocurre en primavera-verano. Durante el ciclo del cultivo la temperatura se encontró dentro de los rangos normales para el momento del año y la zona. Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron de 308 mm, aunque estas fueron insuficientes durante el período crítico del cultivo pudiendo generar períodos de estrés hídrico.

El sitio experimental se encontraba hace diez años previos bajo agricultura continua con siembra directa; la secuencia de cultivos desde la campaña 2007/2008 fue la siguiente: maíz-barbecho-soja- maíz-verde de invierno-verde de invierno-verde de invierno/soja, observándose en la tabla 1 la características químicas del este (tabla 1).

Se instalaron 18 parcelas de 3 x 5 m bajo un diseño completamente aleatorizadas para evaluar el efecto de la mez-

ph (agua relación 1:2,5)	6.0
CE ds/ m (agua relación 1:2,5)	0.11
MO (%)	2.8
Nt. (%)	0.19
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)	49
P. ppm	10.0
S-SO ₄ ppm	11.0

Tabla 1. Análisis de suelo del sitio del ensayo a la profundidad de 0-20 cm.

CE: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica, Nt. Nitrógeno total, N-NO₃: nitrógeno en forma de nitratos; P: fósforo extractable; S-SO₄: azufre en forma de sulfatos.

Parámetro	Valor
Pérdida a 45 °C (g/100g) agua libre	0,11
Pérdida a 215-230 °C (g/100g) agua combinada	20,02
SiO ₂ (g/100g)	1,22
Al ₂ O ₃ (g/100g)	0,12
Fe ₂ O ₃ (g/100g)	0,03
TiO ₂ (g/100g)	<0,01
P ₂ O ₅ (g/100g)	<0,01
MnO (g/100g)	<0,01
CaO (g/100g)	36,62
MgO (g/100g)	<0,01
BaO (g/100g)	<0,01
SrO (g/100g)	0,13
SO ₃ (g/100g)	44,58
K ₂ O (g/100g)	0,06
Na ₂ O (g/100g)	<0,01
CaSO ₄ ·2H ₂ O (g/100g)	95,65
CaSO ₄ (g/100g)	<0,05
CaCO ₃ (g/100g)	2,62
MgCO ₃ (g/100g)	<0,01

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del yeso utilizado.

cla de yeso (Y) y zeolita granulada (Z) con urea (U) aplicado en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). A todos los tratamientos se les aplicó 100 kg de fosfato mono amónico (FMA) como fertilización de base a la siembra. Los tratamientos ensayados fueron (1) maíz fertilizado con: 200 kg ha⁻¹ de urea (U), (2) 200 kg ha⁻¹ de urea y 90 kg ha⁻¹ de yeso (U+Y), (3) 150 kg ha⁻¹ de urea y 50 kg ha⁻¹ de zeolita granulada (U+Z); (4) 150 kg ha⁻¹ de urea, 90 kg ha⁻¹ de yeso y 50 kg ha⁻¹ de zeolita granulada (U+Y+Z) y (5) situación testigo sin fertili-

Parámetro	Valor
SiO ₂ (g/100g)	66,05
Al ₂ O ₃ (g/100g)	13,20
Fe ₂ O ₃ (g/100g)	0,87
TiO ₂ (g/100g)	0,17
P ₂ O ₅ (g/100g)	0,04
MnO (g/100g)	0,01
CaO (g/100g)	2,84
MgO (g/100g)	1,00
SO ₃ (g/100g)	0,02
K ₂ O (g/100g)	1,06
Na ₂ O (g/100g)	4,00
Pérdida por calcinación a 1000 °C (g/100g)	10,73
CIC (m _{eq} 100 g ⁻¹)	161,00
pH en agua (1/10)	7,10

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la zeolita utilizada.

zación nitrogenada (T). La reducción en la cantidad de N como urea cuando esta fue aplicada junto con las zeolitas responde a que se aconseja la mezcla de 75% urea más 25% zeolita, debido al efecto de este mineral en el incremento de la eficiencia del N aplicado como ya fue explicado en la introducción. La densidad de siembra fue de 5 plantas por m. La urea y la zeolita se mezclaron manualmente y se aplicaron al voleo en el entresurco cuando el maíz se encontraba en estado V6.

Los minerales utilizados en el ensayo fueron provistos y caracterizados por el SEGEMAR a partir de proveedores nacionales. La caracterización del yeso y zeolita utilizados en el ensayo se presentan en las tablas 2 y 3, respectivamente. Las especies minerales identificadas por DRX en la muestra de la zeolita utilizada en el ensayo fueron mayoritariamente la Clinoptilolita Na₆(Al₆Si₃₀O₇₂)·24 H₂O, y la Heulandita Ca₄(Al₈Si₃₀O₇₂)·24 H₂O en menor proporción. La granulometría de la roca portadora de zeolita estuvo en un rango de 0,4-1 mm (mallas ASTM -18 +40).

En cada unidad experimental se midió el rendimiento de grano. Para ello se recolectaron las espigas de las dos hileras centrales de cada parcela a humedad de cosecha (14%). Luego las espigas se desgranaron con una desgranadora estática y se pesaron los granos para calcular el rendimiento por hectárea.

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANVA) y test de comparación de medias por LSD Fischer (Infostat, 2008) considerando 5% como nivel de significación estadística.

RESULTADOS

Efecto de la adición de yeso y zeolitas sobre el rendimiento del maíz

La fertilización con urea (U), urea con yeso (U+Y) y urea con yeso y zeolita (U+Y+Z) incrementaron significativamente el rendimiento del maíz respecto al tratamiento con fertilización base (T). La fertilización con urea (U) y urea + yeso (U+Y) produjeron incrementos del 18% y 16%, respectivamente respecto al testigo, mientras que cuando se aplicó la urea junto con el yeso y la zeolita (U+Y+Z) el incremento en rendimiento estuvo en el orden del 25% ($p < 0,05$) (figura 1).

En cuanto a la fertilización con urea más zeolita (U+Z) aunque pudo observarse una tendencia a incrementos del rendimiento (10% de incremento respecto al testigo), esta no fue estadísticamente significativa al 5%. Esto significa que si bien la sustitución de 25% p/p en la dosis de fertilización de urea por zeolita no causó descensos significativos en rendimiento de grano en relación con el tratamiento U, a diferencia de lo reportado por John *et al.* (2002), tampoco propició incrementos de rendimiento que resultaran significativamente superiores. Esto podría indicar que bajo las condiciones del presente estudio no se verificaron efectos positivos debido al uso de la zeolita, posiblemente debido a que las condiciones climáticas durante el ensayo no generaron un ambiente de pérdidas de N importantes.

Resultados similares fueron reportados por Camarillo *et al.* (2012) en Regosoles de textura media y fina en México, ante la sustitución de 15% del fertilizante químico por zeolita clinoptilolita granulada y en polvo, sin hallar incrementos significativos en el rendimiento de maíz respecto al testigo con fertilización con urea.

La aplicación de yeso junto con la urea (ej. tratamiento U+Y) no mejoró la productividad del maíz, reflejando que la oferta de S habría permitido satisfacer la demanda del cultivo, ya que la concentración de S en la siembra del cultivo fue superior al umbral de respuesta de 10 ppm (Espósito *et al.*, 2012).

Cabe destacar que el mayor incremento en rendimientos se logró cuando la urea fue aplicada junto con el yeso y la zeolita (U+Y+Z), aspecto que resulta llamativo teniendo en cuenta que tanto el yeso como la zeolita aplicados por separado en combinación con la urea no generaron cambios estadísticamente significativos ($p < 0,05$) sobre el rendimiento en grano del maíz. Para poder profundizar sobre los posibles mecanismos que expliquen estos resultados, es necesario replicar este estudio en un mayor gradiente ambiental (ej. sitios y años de experimentos) para poder determinar si se trata de una sinergia basada en un mecanismo o bien forma parte de un resultado atípico.

Lo esperable cuando se aplica yeso sobre la superficie del suelo es que se mejore la disponibilidad de cationes divalentes intercambiables que tienden a flocular los suelos (Ngwu, 2006) a la vez que proporciona Ca y S al complejo de intercambio (Dontsova y Norton, 2002). De esta manera, las enmiendas de yeso promueven la floculación, reduciendo el sellado de la superficie y aumentando las tasas de infiltración del agua. Debido a su alta solubilidad en comparación con la cal, posee movilidad en el perfil del suelo (Caires *et al.*, 2003), mejorando la fertilidad del subsuelo lo que permite un mayor desarrollo de raíces, favoreciendo la captación y reciclaje de nutrientes (Rampim *et al.*, 2011). En consecuencia, el yeso mejora el enraizamiento profundo y la capacidad de las plantas para acceder a suministros adecuados de agua y nutrientes durante la sequía (Ritchey

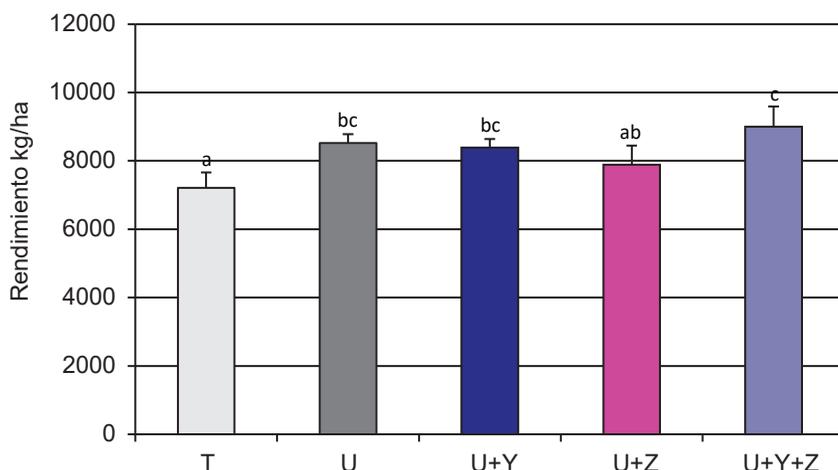


Figura 1. Rendimiento (kg ha^{-1}) promedio y error estándar del cultivo de maíz para los diferentes tratamientos. Los tratamientos son T: testigo sin N. U: 200 kg ha^{-1} de Urea. U+Y 200 kg ha^{-1} de urea y 90 kg ha^{-1} de yeso. U+Z 150 kg ha^{-1} de urea y 50 kg ha^{-1} de zeolita granulada. U+Y+Z 150 kg ha^{-1} de urea, 90 kg ha^{-1} de yeso y 50 kg ha^{-1} de zeolita granulada. (5 Todos los tratamientos recibieron 100 kg ha^{-1} de FMA como fertilización de base.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos al 5% de significación estadística.

et al., 1980; Tirado-Corbalá *et al.*, 2017). De esta manera, a los beneficios derivados de la aplicación de yeso, debe sumarse la capacidad de las zeolitas para retener nutrientes con carga positiva (cationes), como el nitrógeno amoniacal, potasio, calcio y magnesio, que luego pueden ser liberados lenta y gradualmente a medida que se agotan en la solución del suelo, reduciendo así las pérdidas de nutrientes por lavado, arrastre y lixiviación, e incrementando las posibilidades de un mayor aprovechamiento por parte de las plantas (Torres Duggan *et al.*, 2017).

Varios autores han observado respuestas positivas en el rendimiento de gramíneas (ej. maíz, trigo y la cebada) ante la aplicación de yeso (Caires *et al.*, 2001, 2011). También se han observado incrementos en los niveles foliares de Ca y S, y una disminución en los niveles de Mg (Caires *et al.*, 2003) ante el agregado de yeso. Cruzate y Casas (2017) sostienen que se debe prestar especial atención a nutrientes como Ca y Mg, no solo por el rol que desempeñan en la estructuración y actividad biológica del suelo, sino también por su importancia para la nutrición de los cultivos.

Costo/beneficio de la aplicación de yeso y zeolitas

En la tabla 4 se presentan los valores estimados de costo por hectárea de la fertilización aplicada en cada tratamiento y los rendimientos promedio obtenidos en cada caso.

Para el caso de la aplicación de urea + yeso (U+Y) no hubo diferencias estadísticas en el rendimiento respecto a la fertilización tradicional con fosfato mono amónico y urea (U), y en este caso el costo extra de aplicar yeso fue de 9 USD ha⁻¹. Sin embargo debe considerarse que en el presente trabajo no se midieron variables edáficas sobre las cuales pudo haber influenciado el yeso en términos de los contenidos de Ca y S disponibles, inclusive pudiendo generar efectos residuales sobre cultivos subsiguientes en las rotaciones.

En cuanto a la sustitución de 25% de urea por zeolitas (U+Z), puede observarse que el rendimiento tampoco difirió estadísticamente del alcanzado con la fertilización tradicional (U), y el costo fue 14,5 USD ha⁻¹ menor. Sin embargo, debe considerarse que aunque en términos estadísticos el rendimiento no difirió, en valores absolutos puede observarse una disminución en términos relativos del 8,5%. Esto podría ser atribuido a la variabilidad de las mediciones. Sin embargo, esta diferencia sugiere que deberían realizarse futuras investigaciones que permitan ampliar la comprensión sobre el funcionamiento de la zeolita en combinación con la urea en un amplio gradiente ambiental (diferentes tipos de suelos, condiciones climáticas, temperatura, etc.). Asimismo, esta información básica es central para generar recomendaciones de manejo en diferentes subregiones de la región Pampeana.

Por último, el rendimiento del tratamiento con reemplazo de 25% de urea por zeolita más aplicación de yeso (U+Y+Z) no difirió estadísticamente del tratamiento con fertilización tradicional (U), con un incremento de este no significativo (6% respecto a U), siendo el ahorro por hectárea de 5,5 USD. Basado en estos resultados este tratamiento presentaría el mayor beneficio en relación con el costo, ya que el rendimiento promedio estuvo por encima del obtenido con la fertilización tradicional (U), y a su vez presentó un menor costo por hectárea.

Como se mencionó anteriormente, es necesaria más investigación para validar los resultados que surgen de este primer estudio, considerando los efectos sobre la condición de fertilidad de suelos, posibles efectos residuales, como así también un análisis económico más exhaustivo para definir de mejor forma la rentabilidad del uso de estos minerales, entre otros aspectos.

CONCLUSIONES

Se observó respuesta a la aplicación de nitrógeno en forma de fertilizante por parte del cultivo.

		T	U	U+Y	U+Z	U+Y+Z
	USD Tn ⁻¹	USD ha ⁻¹				
MAP	500	50	50	50	50	50
UREA	420	0	84	84	63	63
YESO	100	0	0	9	0	9
ZEOLITA	130	0	0	0	6,5	6,5
TOTAL (USD ha⁻¹)		50	134	143	119,5	128,5
Rendimiento (Mgha⁻¹)		7,3 a	8,7 bc	8,6 bc	8,0 ab	9,2 c

Tabla 4. Costo por hectárea de la fertilización aplicada y rendimiento promedio de cada tratamiento.

T: testigo sin N. U: 200 kg ha⁻¹ de Urea. U+Y 200 kg ha⁻¹ de urea y 90 kg ha⁻¹ de yeso. U+Z 150 kg ha⁻¹ de urea y 50 kg ha⁻¹ de zeolita granulada U+Y+Z 150 kg ha⁻¹ de urea, 90 kg ha⁻¹ de yeso y 50 kg ha⁻¹ de zeolita granulada. (5 Todos los tratamientos recibieron 100 kg ha⁻¹ de FMA como fertilización de base. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos al 5% de significación estadística. Dentro del costo de los minerales se encuentra el gasto de aplicación de estos.

La combinación de urea en conjunto con la zeolita no incrementó el rendimiento, que podría reflejar que no se presentaron pérdidas de N o bien que si se presentaron, no implicaron una menor disponibilidad de N para el cultivo

La aplicación conjunta de urea más yeso agrícola no incrementó el rendimiento, evidenciando la ausencia de respuesta a S.

La combinación de urea, zeolita y yeso agrícola en conjunto maximizó el rendimiento en grano, aunque no fue posible asociarlo con mecanismos o procesos estudiados en el presente estudio.

Se requiere de mayor investigación fundamental y aplicada para poder generar recomendaciones de dosis de zeolitas para maximizar la EUN en maíz y otros cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- AGOSTO, F.; CANAFOGLIA, M.E.; BARRIO, R.; CABELLO, C.; SCHALAMUK, I.; MINELLI, G.; BOTTO, I.L. 2005. Depósitos tobáceos terciarios zeolitados del área de Paganzo (Provincia de La Rioja). Su potencialidad tecnológica. Acta del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata.
- ANIKWE, M.A.N.; EZE, J.C.; IBUDIALO, A.N. 2016. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. *Soil Till. Res.* 158, 32-38.
- BARBARICK, K.A.; PIRELA, H.J. 1983. Agronomic and horticultural uses of zeolites: a review. en: POUND, W.G.; MUMPTON, F.A. (Eds.). *Zeo-agriculture: use of natural zeolites in agriculture and aquaculture*. Westview Press. Boulder, Colorado. 93-103 p.
- BARBIERI, P.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS H.R.; MARINGOLO M. 2010. Fertilización del maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia del uso del nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 28 (1).
- CAIRES, E.F.; FELDBAUS, I.C.; BLUM, J. 2001. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. *Bragantia*, 60:213-223.
- CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. 2003. Alterações químicas no solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:275-286.
- CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; JORIS, H.A.W. 2011. Use of gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. *Agronomy Journal*, 103, 1804-1814.
- CAMARILLO, M.G.; GÓMEZ MONTIEL, N.O.; MUÑOZ ESPÍRITU, J.; VALENCIA ESPINOSA, F.; GUTIÉRREZ G.D.; FIGUEROA LÓPEZ, H.O. 2012. Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizante en el estado de Guerrero. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3, 6.
- CASBY-HORTON, S.; HERRERO, J.; ROLONG, N.A. 2015. Gypsum soils: Their morphology, classification, function, and landscapes. *Adv. Agron.*, 130, 231-290.
- CRUZATE, G.A.; CASAS, R. 2017. Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina en la campaña 2015/16. *Informaciones agrónomicas de Hispanoamérica*, IPNI. 1-23 pp.
- CRUZATE, G.A.; CASAS, R. 2003. Balance de nutrientes. *Revista Fertilizar*. INTA. Año 8. Número Especial "Sostenibilidad" 7-13 pp.
- CRUZATE, G.A.; CASAS, R. 2009. Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N.º 44 IPNI. 21-26 pp.
- CRUZATE, G.A.; CASAS, R. 2012. Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* N.º 6 IPNI, 7-14 pp.
- CHESTER, W.A.; DEROUANE, E.G. 2009. *Zeolite characterization and catalysis*. Springer. 373 p.
- DONTSOVA, K.M.; NORTON, L.D. 2002. Clay dispersion, infiltration and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci.*, 163, 184-193.
- DONTSOVA, K.; LEE, Y.B.; SLATER, B.K.; BIGHAM, J.M. 2005. Gypsum for agricultural use in Ohio-sources and quality of available products. The Ohio State University Extension: Columbus, OH, EUA. (Disponible: <http://ohioline.osu.edu/factsheet/anr-20> verificado: febrero de 2019).
- ESPOSITO, G.P.; CASTILLO, C.A.; BALBOA, G.R.; BALBOA, R.E. 2009. Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos de sur de Córdoba para el cultivo de soja. *Informaciones Agronómicas* N.º 43 16-21.
- FAVARETTO, N.; NORTON, L.D.; JOERN, B.C.; BROUDER, S.M. 2006. Gypsum amendment and exchangeable Calcium and Magnesium affecting Phosphorous and Nitrogen Runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 1788-1796.
- FERRARIS, G.N.; COURETOT L.A.; TORIBIO M. 2009. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: efecto de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Informaciones agrónomicas* N.º 43, 19-22 pp.
- GARCIA, F. 2003. Balance y manejo de nutrientes en rotaciones agrícolas. *Trigo-Actualización 2003*. Ediciones INTA.
- GARCÍA, F.; GONZALEZ SANJUÁN, M.F. 2010. Balance de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? IPNI. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N.º 48, 1-5C.
- GONZALEZ CAMARILLO, M.; GÓMEZ MONTIEL, M.O.; ESPÍRITU, J.M.; ESPINOSA, F.E.; GUTIÉRREZ, D.; FIGUEROA LOPEZ, H.O. 2012. Rendimiento del maíz con riego tratado con zeolitas más fertilizantes en el estado de Guerrero. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* Vol 3 (6).
- HERRMANN, C.; TORRES DUGGAN, M. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. En: PEREYRA, F.; TORRES DUGGAN, M. (Eds). *Suelos y Geología Argentina*. Capítulo 13. Coedición de la Asociación Geológica Argentina y Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 329-355 pp.
- JOHN, C.M. 2002. La zeolita natural y su papel en el manejo ecológico del nitrógeno para el cultivo del tomate. Tesis de Maestría en Ciencias en Nutrición de Plantas y Biofertilizantes. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas San José de las Lajas. La Habana, Cuba. 95 p.
- NGWU, E.O. 2006. *Fundamentals of Soil Science for Colleges and University*. Fidgina Global Service Ltd., Enugu.
- RAMESH, K.; REDDY, D.D. 2011. Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*, 113, 219-241.
- RAMOS, L.A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. 2006. Reatividade de corretivos de acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:849 857.
- RAMPIM, L.; LANA, M.C.; FRANDOLOSO, J.F.; FONTANIVA, S. 2011. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1687-1698.
- RIMSKI-KORSAKOV, H.; ZUBILLAGA, M.S.; LANDRISCINI M.R.; LAVADO R.S. 2015. ¿A dónde va el nitrógeno de la fertilización del maíz cuando hay estrés hídrico? *Información Agronómica Hispanoamericana* 19.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; COSTA, U.F. 1980. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savanna Oxisol. *Agron. J.*, 72, 40-44.

SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT, G.A.; ANDRADE F.H. 1997. Volatilización de amoníaco desde urea aplicada al cultivo de maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 15: 12-16.

SOCA-NUÑEZ, M.; VILLARREAL-NUÑEZ, J.E. 2016. Dosis de zeolitas y fracciones granulométricas para cultivos de plátanos y caña de azúcar. *Ciencia Agropecuaria* 25: 131-146.

TIRADO-CORBALÁ, R.; SLATER, B.K.; DICK, W.A.; BARKER, D. 2017. Alfalfa Responses to Gypsum Application Measured Using Undisturbed Soil Columns. *Plants*, 6, 29.

TORRES DUGGAN, M.; MELGAR, R.; RODRIGUEZ, M.B.; LAVADO, R.S.; CIAMPITTI, I.A. 2012. Sulfur fertilization in the argentine Pampas region: a review. *Agronomia & Ambiente*, 32, 61-73.

TORRES DUGGAN, M.; RODRIGUEZ, M.B.; BEHRENDTS KRAEMER, F.; FERNÁNDEZ, P.L.; CASTRO, L.; LEAL, P. 2017. Condición hidrofísica y química de un suelo Haplustol éntico tratado con zeolita y residuos de feed lot. Simposio de Fertilidad 2017. IPNI Cono Sur y Fertilizar Asociación Civil Rosario, Argentina. 240-248 pp.

URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. 2000. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. Editorial Génesis. Porto Alegre Rio Grande do Sul, Brasil. 110 p.

VAN STRAATEN, P. 2014. Rocks for crops: the use of locally available minerales and rocks to enhance soil productivity. Proceedings of the 16th World Fertilizer Congress of CIEC. Technological innovations for a sustainable tropical agriculture. October 20-24. Río de Janeiro. Brasil. 55-58 pp.