

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE YESO SOBRE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE UN SUELO SÓDICO DE ALTA VARIABILIDAD ESPACIAL

CECILIA MILÁN^{1*} & ELENA BONADEO¹⁻²

Recibido: 28-04-17

Recibido con revisiones: 10-07-17

Aceptado: 18-07-17

RESUMEN

En suelos sódicos de la provincia de Córdoba, los cultivos o pasturas suelen presentar un crecimiento desigual en "parches" o "manchones", siendo una de las causas relevantes, la profundidad en que aparece el sodio y las sales, en niveles que afectan negativamente a los cultivos. Como alternativa de rehabilitación se utilizan enmiendas cálcicas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de yeso en dosis única o fraccionada sobre propiedades de suelo y planta en sectores "manchoneados" en un ensayo de larga duración. La investigación se llevó a cabo en un lote de 25 ha, representativo del fenómeno de "manchoneo" en la zona de Villa María, Córdoba. El suelo, de textura franco limosa, es un Haplustol típico, con fases por salinidad y sodicidad. El agua de la napa freática contiene principalmente bicarbonatos sódicos y oscila en los 2,5 m. El diseño utilizado fue en bloques al azar con tres repeticiones, en parcelas de 7x7m ubicadas en sectores manchoneados. Los tratamientos fueron: T: sin agregado de yeso, DU: con aplicación única de 6000 kg ha⁻¹ en 2005, DF: aplicando 2000 kg ha⁻¹ de yeso en tres momentos (2005, 2008 y 2010). La enmienda se aplicó en superficie y al voleo. Las evaluaciones fueron a partir del último reenesado en DF (2010). Se determinó pH_{1,2,5}, CE_{1,1}, RAS, Infiltración, Conductividad hidráulica, Densidad aparente, Resistencia mecánica, rendimiento de soja y alfalfa (incluyendo situación «normal» de referencia). El agregado de yeso tendió a mejorar las propiedades de suelo y rendimiento de cultivos, especialmente en el tratamiento DU, aunque el rendimiento de granos y forraje no llegó a aproximarse al rendimiento de la situación «normal». Se estima que el régimen de precipitaciones y el deficiente drenaje de estos suelos es insuficiente para que la enmienda actúe en forma satisfactoria.

Palabras clave. Enmienda cálcica; recuperación; alfalfa; soja.

GYPSUM APPLICATION EFFECT ON THE PRODUCTIVE CAPACITY OF A SODIC SOIL WITH HIGH SPATIAL VARIABILITY

ABSTRACT

In sodic soils of Córdoba, crops tend to present an uneven growth called "patches". One of the main causes of this phenomenon is the shallow depth at which sodium and salts appear that negatively affects crops. Calcium amendments are used as a rehabilitation alternative. The objective of this study was to evaluate the effect of gypsum application, in single and fractional doses, on soil and plant properties in "patched" sectors during the last stage of a long-term experiment. The research was carried out in a plot of 25 ha, representative of the phenomenon of "patching" in the area of Villa María, Córdoba. The soil was classified to typical Haplustoll from silty loam, with salinity and sodicity phases. Water table water contains mainly sodium bicarbonates and oscillates around 2.5 m. The design used was random blocks with three repetitions, in 7x7m plots gypsum sectors were located. The treatments were T: without gypsum addition, DU: with a single application of 6000 kg ha⁻¹ in the year 2005 and DF: applying 2000 kg ha⁻¹ of gypsum on three occasions (2005, 2008 and 2010). The amendment was applied to the surface and by broadcasting. The evaluations took place after the last re-casting (2010). pH_{1,2,5}, CE_{1,1}, SAR, Infiltration, hydraulic conductivity, apparent density, mechanical resistance, soybean and alfalfa production (including normal reference situation) were determined. Gypsum addition tended to improve soil properties and crop yield, especially in DU treatment, although grain yields and forage did not come close to the normal situation production. It is estimated that the rainfall regime and the soil low drainage is insufficient for the amendment to work satisfactorily.

Key words. Calcium amendment; recovery; alfalfa; soybean.

1. Universidad Nacional de Villa María, Córdoba

2. Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba

* Autor de contacto: cecimilan21@yahoo.com.ar

INTRODUCCIÓN

Una característica de los suelos sódicos de la provincia de Córdoba es la acumulación del sodio (Na) en valores que producen disminuciones de rendimiento en los cultivos, esta acumulación de Na ocurre en un 64% de los casos en horizontes subsuperficiales. En el departamento San Martín, 93.000 ha poseen esta afectación, de las cuales en 55.000 ha la acumulación de Na se produce entre los 25 y 50 cm (INTA, 1993). Es inherente de estos suelos sódicos, la presencia de una gran variabilidad espacial con desigual crecimiento de cultivos o pasturas, denominado en "parches" o "manchones". Patrones similares de crecimiento fueron citados por Rengasamy (1998) para suelos de Australia. La mayoría de estas situaciones poseen deficiente drenaje superficial, debido a un relieve muy suave, con gradientes de pendientes regionales menores al 0,3%, de orientación O-E. Es común encontrar áreas donde las vías se organizan en forma radial, siendo los puntos de convergencia charcas permanentes o semipermanentes, conformando un tipo de drenaje denominado "araña", que funcionan como aportantes hídricos a la napa freática (INTA, 1993). Las precipitaciones cercanas a los 800 mm anuales, permitirían realizar cultivos en secano con adecuados rendimientos en suelos no afectados, cobrando entonces esta problemática una especial relevancia.

Los suelos sódicos están sujetos a una degradación estructural severa en condiciones de alto pH, presentando exceso de Na intercambiable y baja concentración de electrolitos, con arcillas que tienden a dispersarse. El nivel crítico de Na intercambiable que separa suelos con tendencia a la dispersión no está aún bien precisado y depende del tipo de suelo (Shainberg & Letely, 1984). Un suelo se considera sódico desde el punto de vista taxonómico (Soil Survey Staff, 2003) cuando el porcentaje de Na intercambiable (PSI) es superior al 15% respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Sin embargo, menores umbrales de sodicidad, como por ejemplo 6% de PSI, son citados como umbrales para suelos australianos (Rengasamy, 1997), como así también, para la región de Villa María y Río Cuarto, Pcia. de Córdoba (Milán *et al.*, 2016a). Este umbral más bajo se debe a la menor cantidad de sales solubles en algunos suelos que conducen a un menor estado de floculación (Northcote & Skene, 1972) o a un efecto de mayor dispersión en suelos de baja estabilidad estructural (Milán *et al.*, 2016a).

Existen diferentes técnicas de manejo para la rehabilitación de este tipo de suelos. Entre las más usadas están las enmiendas cálcicas que mejoran la condición química y física de los mismos. La adición de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

es una práctica generalizada en algunos países, sobre todo en aquellos en los que la superficie afectada por este problema es significativa. Su empleo en la Argentina se enfrentó a la dificultad de establecer posibles beneficios, como formas y dosis de aplicación, entre otros aspectos técnicos (Cisneros *et al.*, 2007; Taboada & Lavado, 2009). Investigaciones realizadas por Quintero *et al.* (2003) en un Argiudol vértico de la provincia de Entre Ríos demuestran que la adición de yeso, disminuye el Na intercambiable, recuperando las condiciones físicas del suelo, repercutiendo en un incremento de la productividad de forraje. Asimismo, Costa & Godz (1999) observaron que el yeso aumenta la concentración de electrolitos a un nivel que permite la floculación del coloide, manteniendo una adecuada infiltración del agua. La reacción de dilución-intercambio hace que el calcio (Ca) de la solución externa pase a la interna, conduciendo a una disolución adicional de la enmienda. Esto puede ser corroborado por la asociación lineal entre la conductividad eléctrica (CE) de la solución externa y el contenido de Na, sin embargo, con el paso del tiempo este efecto tiende a revertirse.

Se plantea como hipótesis que el agregado de yeso aumenta la capacidad productiva por períodos prolongados en forma diferencial según la oportunidad de aplicación, a través de mejoras de las condiciones del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de aplicaciones únicas o fraccionadas de yeso sobre la capacidad productiva de suelos sódicos "manchoneados" de alta variabilidad espacial en un ensayo de larga duración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del área de investigación

El ensayo se ubicó a 18 km al O de la ciudad de Villa María, Pcia. de Córdoba, Argentina (Lat. S 32°29' 16"; Long O 63°17' 31"). El clima del área es templado subhúmedo, con temperatura media anual de 16,05 °C. El régimen pluviométrico es monzónico, con una precipitación media anual de 799 mm, con meses más lluviosos en verano y más secos en invierno (INTA, 1987). El suelo está clasificado como Haplustol éntico y pertenece a la unidad cartográfica Ot (Consociación serie Oncativo) (INTA, 1987). Posteriormente fue reclasificado como Haplustol típico, con fases por salinidad y sodicidad (Hampp *et al.*, 2004), de textura franco limosa cuyas características constan en la Tabla 1. En el agua de la napa freática predominan los HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$ frente a los Cl^- y $\text{SO}_4^{=}$, de salinidad alta, con pH en valores normales, aunque con valores muy altos de relación de adsorción de Na (RAS), oscilando en los 2-2,5 m de profundidad (Milán, 2016b).

Tabla 1. Propiedades químicas del perfil de suelo en las situaciones "normal" y "manchón" (Adaptado de Bonadeo *et al.*, 2006).

Table 1. Soil profile chemical properties under "normal" and "patch" situations (Adapted from Bonadeo *et al.*, 2006).

Horiz.	Prof. (cm)	pH	CE (dS m ⁻¹)	CIC (cmol kg ⁻¹)	PSI
Situación "normal"					
A	0 – 26	6,88	0,95	12,6	2,4
Bw1	26 – 37	7,80	0,51	14,3	12,4
Bwk2	37 – 55	8,62	1,03	14,3	14,2
BcK	55 – 90	9,33	0,86	13,0	23,4
Ck	> 90	9,56	1,24	10,9	39,7
Situación "manchón"					
A	0 – 24	7,26	0,95	11,70	12,4
Bwk1	24 – 43	9,14	1,92	13,36	33,0
Bwk2	43 – 66	9,83	3,62	12,60	42,0
BcK	66 – 96	9,85	7,55	13,00	43,9
Ck	> 96	9,90	—	10,2	45,1

Ensayo experimental

El ensayo de larga duración se inició en 2005, en un lote de 25 ha. En ese momento el lote tenía instalado un cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) de 3 años, invadido por malezas, especialmente gramíneas. El desarrollo del cultivo era de alta variabilidad espacial en respuesta a la condición de sodicidad edáfica irregular del terreno. En esa condición se seleccionaron sectores "manchoneados" y se ubicaron los bloques del ensayo experimental. La superficie de cada unidad experimental fue de 7 x 7m. Se siguió un diseño en bloques completos al azar con 3 repeticiones. Los tratamientos fueron: testigo (T), dosis fraccionada (DF) y dosis única (DM). En 2005, se aplicaron 2000 kg ha⁻¹ de yeso en DF y 6000 kg ha⁻¹ en DM. Se reenesó en 2008 y en 2010, solamente en el tratamiento DF, aplicando 2000 kg ha⁻¹ cada vez. De esta manera DF se igualó a DU en 2010 (Tabla 2). El yeso empleado poseía una pureza del 67 % y se aplicó en forma manual, superficial y al voleo. En este trabajo se presentan los datos de la última etapa del ensayo de larga duración, a partir del último reenesado en DF en 2010.

Evaluaciones en el suelo

• Químicas

Se realizaron muestreos de suelo en los primeros horizontes (A y Bwk1) (Tabla 1) con barreno helicoidal, con un mínimo de dos piques por cada unidad experimental. Las muestras de suelo fueron secadas al aire para los análisis de laboratorio.

Se determinó conductividad eléctrica CE_{1:1} (en relación suelo:agua 1:1) (Richards, 1954) y pH_{1:2,5} (pH actual en relación suelo:agua 1:2,5) (Page *et al.*, 1982) antes del reenesado de DF en 2010, al año en 2011 y a los dos años en 2012.

Se evaluó relación de adsorción de Na (RAS) (Richards, 1954) antes del reenesado de DF en 2010 y al año en 2011.

• Físicas

Se determinó resistencia mecánica a la penetración (RM) con tres mediciones por parcela, hasta los 50 cm de profundidad con penetrómetro tipo Villegas® con cono de 30° y diámetro de base 12 mm, a la vez se midió contenido de humedad desde la superficie y cada 10 cm hasta los 50 cm de profundidad, en 2012.

Conductividad hidráulica saturada (K), a los 24 cm, tope del horizonte Bwk1, donde comienza a diferenciarse la problemática entre las situaciones "manchoneadas" (M) y "normales" (N); para ello se utilizó permeámetro de disco de 120 mm, registrando lecturas hasta que las últimas cuatro no tuvieron una desviación mayor al 10% (Gil, 2006), en 2013.

Densidad aparente (DAP) en los horizontes A y Bwk1, extrayendo las muestras con un cilindro de acero de 7,8 cm de diámetro interior y 8,5 cm de altura (Klute, 1986), en el mismo momento que se determinó RM.

Tabla 2. Dosis de yeso (kg ha⁻¹) según año de aplicación y tratamiento. Table 2. Gypsum rate (kg ha⁻¹) according to application year and treatment.

Tratamientos	Dosis por año			Dosis total
	2005	2008	2010	2010
Testigo (T)	0	0	0	0
Dosis fraccionada (DF)	2.000	2.000	2.000	6.000
Dosis única (DU)	6.000	0	0	6.000

Evaluaciones en cultivos

• Soja

En diciembre de 2010, momento en que se realizó el último reenyesado, se sembró soja (*Glycine max*) var. *Don Mario* 5.5i, a 52,5 cm entre surcos, con densidad de 25 semillas.m⁻¹. En abril de 2011 se cosecharon plantas en 1,92 m lineal (2 repeticiones) en todas las unidades experimentales y como referencia en tres sitios N, cercanos a los bloques. Se realizó conteo y altura de plantas. Se secó material vegetativo y reproductivo en estufa a 60 °C hasta peso constante para obtener datos de rendimiento y sus componentes. Se calculó el Índice de cosecha (IC).

• Alfalfa

En mayo del 2011, se sembró en alfalfa (*Medicago sativa*) cultivar Bar 9242 en doble labor a razón de 16 kg ha⁻¹ de semilla. Se realizaron 6 cortes en noviembre de 2011 y marzo 2012 (épocas de precipitaciones similares a las históricas), en octubre y noviembre de 2012 (épocas húmedas) y en diciembre de 2012 y marzo de 2013 (épocas secas). El procedimiento constó de dos muestreos de parte aérea por unidad experimental con un aro de 0,25 m². A partir del 5° corte se observó heterogeneidad en cada parcela debido a la visualización de la problemática del "manchoneo" con pérdidas de alfalfa y se tomó como criterio muestrear en sectores donde aún permanecía el cultivo y se descartaron malezas. En el último corte (6°) con manifestación aún más importante del "manchoneo" en todo el lote, además de las unidades experimentales se muestrearon 6 sitios N como referencia. No se pudieron realizar más cortes a partir del 2° ciclo del cultivo debido al advenimiento de un invierno muy seco, que provocó grandes pérdidas de plantas en todos los tratamientos. Las muestras se llevaron a estufa a 60 °C hasta peso constante para obtener el dato de materia seca (MS) (kg m⁻²).

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de la varianza, separando las medias mediante el test LSD de Fisher ($p = 0,05$) para comparar el efecto de los tratamientos sobre propiedades del suelo (pH, CE, RAS, RM, DAP, K), rendimiento de materia seca vegetativa y de granos de los cultivos. Se utilizó el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluaciones en suelo

• Químicas

La CE_{1:1} en el horizonte A (Tabla 3) fue más baja en DM en todos los momentos, aunque sin diferencias significativas entre tratamientos. DF presentó los valores mayores en el horizonte Bwk 1 debido a que fue el tratamiento que recibió la aplicación de yeso nuevamente en 2010, produ-

ciéndose una disolución de la enmienda, evidenciada al aumentar la CE_{1:1} con respecto al T. Según Bonadeo *et al.* (2009b), el aumento de CE está directamente relacionada con la disolución del yeso. Posiblemente, el tratamiento DF al aplicarse en dosis fraccionada no logró flocular el coloide y por lo tanto la lixiviación de sales no fue importante. La aplicación de una única dosis de yeso en 2005 en DU podría haber mejorado la estructura y la porosidad, contribuyendo a la lixiviación de sales del suelo en el tiempo y con una mayor intensidad en el primer horizonte. Costa & Godz (1999) en un trabajo de similares características explica que el mejoramiento de la infiltración pudo ser la causa que permitió el lavado de sales generadas por la aplicación de la enmienda. Mantener una concentración de electrolitos suficientemente alta es de crucial importancia, dado que favorece la circulación de agua de la que depende el proceso de recuperación.

El agregado del yeso permitió que el pH disminuya en DU y DF en todos los momentos y en ambas profundidades, con diferencias significativas con respecto al testigo (T). Aunque DF, único tratamiento reenyesado en 2010, en el segundo año y en el horizonte A tuvo una tendencia de valor más alto de pH. Según Costa & Godz (1999) en los tratamientos con yeso los sulfatos (SO₄⁻²) predominan entre los aniones debido al yeso aún presente, en cambio el anión dominante en el testigo es el bicarbonato (HCO₃⁻), que explicaría las diferencias de pH entre tratamientos. De esta manera, los menores valores de pH en DU (Tabla 3) a lo largo de todo el ensayo podrían adjudicarse al mayor contenido de Ca proveniente de la elevada dosis de la enmienda y sus correspondientes sales de ácidos fuertes (SO₄⁻²) que generan un pH cercano a la neutralidad (Bonadeo *et al.*, 2014). Mientras que, la tendencia de un pH más alto en DF en superficie, con respecto a DU, se atribuirían a la completa disolución de yeso y lavado de SO₄⁻², la cual, una vez ocurrida provocaría que el HCO₃⁻ sea nuevamente el anión predominante.

Antes del reenyesado de DF en 2010 (inicio de las determinaciones), la RAS en el horizonte A, fue menor en DU y con diferencias significativas en relación a DF y a T, al año, comienza a hacer efecto la aplicación de yeso en DF y se iguala con DU y ambos tratamientos con yeso se diferencian del T. En el horizonte Bwk 1, en 2010 no se observaron diferencias significativas de RAS entre tratamientos, aunque al año, DF obtuvo los valores más bajos, diferenciándose con respecto a DU y T. Los valores de RAS en DU fueron similares a T, pudiendo inferir a un agota-

miento de la enmienda, considerando los 6 años transcurridos desde la aplicación en una única dosis de yeso en DU. Podría indicarse además, que las precipitaciones escasas o el drenaje deficiente no fueron suficientes para desalojar al Na^+ del perfil del suelo. Quintero *et al.* (2003) atribuyen la disminución del contenido de Na al desplazamiento progresivo del complejo de cambio por el Ca^{++} y su posterior lixiviación a horizontes profundos. Asimismo, Costa y Godz (1998) indican que para desplazar parte del Na^+ del horizonte nátrico hay que agregar más de 30 Mg ha^{-1} en superficie y mezclarlo con los primeros centímetros de suelo.

• Físicas

La K fue mayor en los tratamientos con yeso, DU con $8,21 \text{ mm h}^{-1}$, se diferenció significativamente de T con $2,68 \text{ mm h}^{-1}$, mientras que DF obtuvo valores intermedios de 6 mm h^{-1} y sin diferencias significativas con respecto a DU y T (Tabla 3). La menor K en T se correspondió con una menor macroporosidad, evidenciada por la mayor RM en T (Fig 1a) correspondiente al horizonte Bwk1. La mayor K en DU y DF podría explicarse por el aumento en la concentración electrolítica ($\text{CE}_{1,1}$) en Bwk1 y/o la disminución de la RAS en la misma profundidad con respecto a T (Tabla 3). La concentración electrolítica es uno de los factores que controla la K del suelo, la cual está directamente relacionada con el contenido de sales y el lavado de las mismas, independientemente del efecto de los cationes intercambiables (Torrente, 2003). Cuando la concentración de sales en el agua que

percola está por debajo del valor de floculación, la dispersión de las arcillas, el movimiento de las partículas dispersas y su acumulación en el interior de los poros causan oclusión de los mismos, siendo estos los principales mecanismos responsables de la reducción de la conductividad hidráulica (García, 1994). En síntesis, en los tratamientos con yeso la acción floculante del Ca junto con la disminución del Na intercambiable y el aumento de la concentración de electrolitos en solución, permitieron una mejora en la estabilidad del sistema poroso lo que coincide con lo planteado por Loveday (1984).

Para la densidad aparente (DAP) (Tabla 3) en ambas profundidades no se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos. En el horizonte Bwk1 hubo una tendencia de disminución de la DAP en DF luego de la última aplicación de yeso. DU se mantuvo muy similar a T, considerando nuevamente que DU a lo largo del tiempo estaría volviendo a su condición inicial. Sin embargo, la tendencia de disminución de DAP en DF podría deberse a un aumento de la macroporosidad del suelo (Greene *et al.*, 1988) por el efecto de una nueva aplicación de yeso.

En cuanto a la RM (Fig 1a) todos los tratamientos, salvo en los primeros 5 cm, superaron al umbral o nivel crítico máximo de 2 MPa, establecido para la resistencia a la penetración, por encima del cual las raíces de los principales cultivos dejan de crecer (Álvarez & Taboada, 2008). DF obtuvo los valores más altos de RM hasta los 20 cm y con

Tabla 3. Propiedades de suelo al inicio, al año y a los dos años del reenesado en DF en 2010.

Table 3. Soil properties at the beginning, after one year and after two years of re-dosing in DF in 2010.

	INICIO			1 AÑO			2 AÑOS		
	T	DF	DU	T	DF	DU	T	DF	DU
$\text{CE}_{1,1}$ (A)	0,35AB	0,39B	0,25A	0,38AB	0,44B	0,30A	0,36A	0,45A	0,27A
$\text{CE}_{1,1}$ (Bwk1)	0,86B	0,77AB	0,51A	1,14B	0,93AB	0,62A	1,31A	1,52A	1,14A
$\text{pH}_{1,2,5}$ (A)	7,17B	6,79A	6,59A	7,48B	6,72A	6,80A	7,22B	7,12B	6,72A
$\text{pH}_{1,2,5}$ (Bwk1)	8,46A	8,14A	8,12A	8,41B	7,29A	7,18A	8,06B	7,23A	7,08A
RAS (A)	7,12B	5,32AB	2,25A	6,63B	2,05A	2,63A	—	—	—
RAS (Bwk1)	24,16A	18,45A	16,46A	19,49B	8,97A	14,79B	—	—	—
DAP (A)	—	—	—	—	—	—	1,34A	1,35A	1,38A
DAP (Bwk1)	—	—	—	—	—	—	1,40A	1,35A	1,40A
K(Bwk1)	—	—	—	—	—	—	2,68A	6,00AB	8,21B

Medias con letra común en la misma propiedad, profundidad y momento no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). T: testigo; DF: dosis fraccionada de yeso; DU: dosis única de yeso; DAP: densidad aparente (Mg m^{-3}); K: conductividad hidráulica saturada (mm h^{-1}).

Same letter in the same property, depth and moment indicates no significant difference between the mean values ($p > 0,05$). T: without gypsum aggregation; DF: fractionated rate; DU: single application;

DAP: bulk density (Mg m^{-3}); K: saturated hydraulic conductivity (mm h^{-1}).

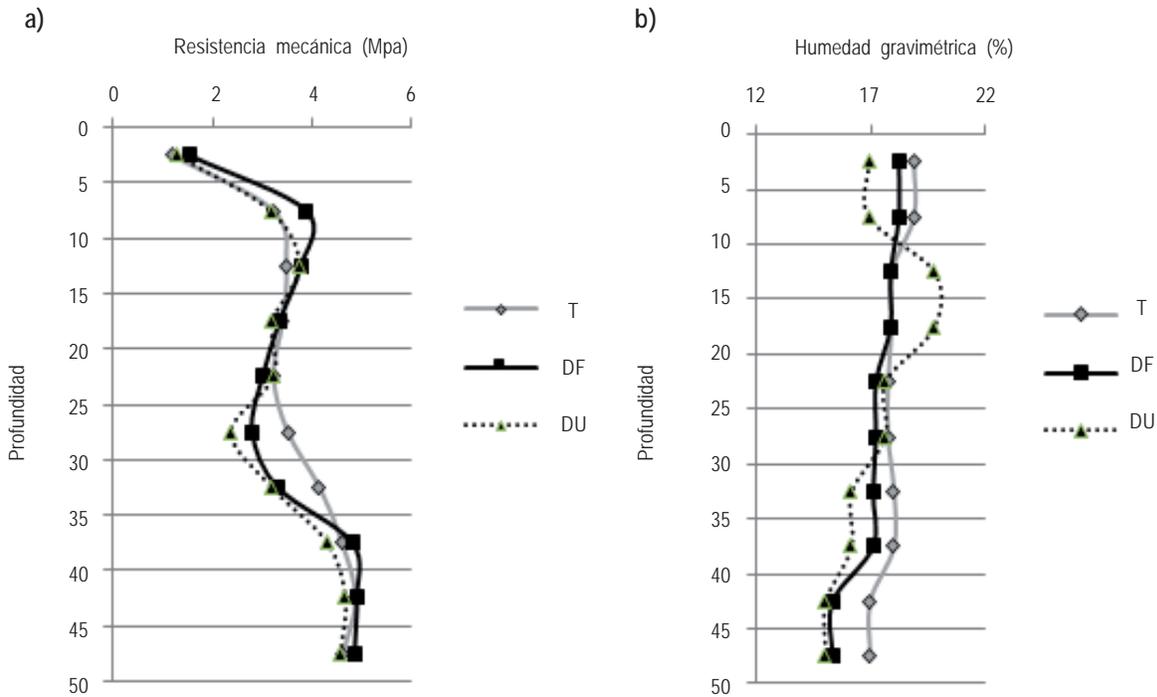


Figura 1. Resistencia mecánica en los tratamientos Testigo (T), Dosis fraccionada de yeso (DF) y Dosis única de yeso (DU). a) Determinación hasta los 50 cm de profundidad, b) Porcentaje (%) de humedad en el momento de la determinación de la resistencia mecánica.

Figure 1. Mechanical resistance in the treatments, without gypsum aggregation (T), fractionated rate (DF) and single application (DU). a) Determination up to 50 cm depth, b) Humidity percentage (%) at the moment of the determination of the mechanical resistance.

diferencias significativas (Milán, 2016b) con respecto a T y DU hasta los primeros 10 cm. A partir de los 25 cm se revierte la situación mostrando disminuciones en los tratamientos con yeso, con diferencias significativas en esta profundidad con respecto al testigo. El mayor valor de RM en DA entre los 5 y 15 cm, si bien no se corresponde con el menor contenido de humedad, podría atribuirse a que dada la menor permeabilidad de estos suelos, el Na^+ que ha sido sustituido por el Ca^{++} , no se lixivia o se mueve muy poco, provocando una mayor dispersión del coloide y por lo tanto una mayor resistencia (Bonadeo *et al.*, 2009a). Los menores valores de RM de DF y DU respecto de T, a partir de los 25 cm tampoco se corresponden con mayores contenidos hídricos y podrían explicarse por un menor grado de dispersión del coloide por efecto del agregado de yeso en los dos primeros tratamientos mencionados. El menor contenido de humedad superficial en DU podría deberse a que en esa época, el cultivo de alfalfa produjo mayor cantidad de materia seca (ver Evaluaciones de cultivos) y por lo tanto absorbió mayor cantidad de agua.

Se estima que el Ca aportado por el yeso fraccionado no fue suficiente, Lebron *et al.* (2002) sostienen que al agregarse mayores cantidades de yeso, la dispersión o ruptura de los agregados disminuye. Según Mon (2007) esto se podría corregir por medio de la aplicación de yeso a una profundidad de 15 a 35 cm y mediante descompactación con subsolador.

Evaluaciones en cultivos

• Soja

En el cultivo de soja se observaron diferencias significativas en todos los parámetros evaluados entre la situación N o de referencia con respecto a los tratamientos de la situación M (T, DF y DU), salvo en el número de plantas que fueron similares en N, DU y DF (Tabla 4). Los efectos del yeso sobre el suelo podrían haber contribuido a mantener el stand de plantas, que comúnmente sufren pérdidas en los sectores M, demostrado por el menor número de plantas en T. En M, la altura de plantas se diferenció significativamente en los tratamientos con yeso con

respecto al T y DU superó a DF, aunque no llegó a igualar a la altura de plantas de la situación N. A su vez, estas diferencias fueron recurrentes en la variable peso de tallo. Con respecto a todos los componentes de rendimiento no se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos, aunque si una tendencia de mayores valores en el tratamiento DU seguido por DF. El peso de semillas y el rendimiento se redujeron un 59% en T, un 54,5% en DA y un 52% en DU con respecto a N de referencia. El IC también decayó en la situación M, con tendencia de menor valor en los tratamientos con yeso, que promovió el crecimiento vegetativo.

Según FAO (2006), la soja es un cultivo medianamente tolerante a la salinidad (5 dS m^{-1} en extracto de saturación del suelo o de $2,8 - 3,6 \text{ dS m}^{-1}$ en extracto 1:1), por lo tanto se presume que el rendimiento no fue afectado por esta causa, porque el suelo donde estuvo implantado no superó estos umbrales de salinidad. No obstante, la soja tiene un intervalo mínimo óptimo de pH 6 a 7 y de rendimiento satisfactorio con pH entre 4,5 y 7,5 (Azcarate & Kloster, 2012), lo que podría haber afectado el rendimiento especialmente en T, con pH mayores al umbral 7,5 (Tabla 3). Aún en sectores N el pH supera este valor umbral luego de los 26 cm (Tabla 1). El elevado pH conjuntamente con

las escasas precipitaciones con respecto a la media histórica acaecida (Milán, 2016b) podrían justificar los bajos rendimientos promedios del lote durante la campaña 2010-2011 (1270 kg ha^{-1} , datos proporcionados por el productor). De este modo, el yeso sería adecuado para la producción de la parte vegetativa (n° de plantas, altura de plantas, peso de tallos), sin embargo no contribuiría en el rendimiento de soja en este tipo de suelos y en épocas secas.

•Alfalfa

La materia seca (MS) acumulada de alfalfa (Tabla 5) se diferenció estadísticamente en DU con respecto a T, mientras que DF obtuvo valores intermedios. En el 1° y 2° corte, la MS en los tres tratamientos fue semejante, infiriendo a que las raíces aún no habían profundizado, explorando el horizonte superficial de condiciones apropiadas y similares propiedades entre tratamientos (Tablas 1 y 3). Luego, durante el 3° y 4° corte se observaron mejoras en el rendimiento de la alfalfa en todos los tratamientos, debido a una época con mayores precipitaciones. En el 4° corte, DU y T produjeron más forraje y con diferencias significativas con respecto a DF, esto se atribuye a que las lluvias abundantes de esa época (Milán, 2016b) colaboraron en disolver al yeso que se aplicó en DF un año antes, provocando

Tabla 4. Rendimiento de soja y sus componentes según tratamientos y situaciones.
Table 4. Soybean yield and its components according to treatments and situations.

	T		Situación M		DU		Situación N	
			DF				Referencia	
N° plantas m^{-2}	37	A a	43	B b	42	B b	42	b
Altura planta prom. (cm)	62,17	A a	66,17	B a	70,50	C b	79,50	c
Peso tallos (g m^{-2})	108,02	A a	128,58	AB ab	141,82	B b	172,45	c
N° vainas m^{-2}	360,50	B a	372,67	AB a	422,00	A a	534,50	b
Peso vainas (g m^{-2})	97,57	A a	109,00	A a	113,78	A a	214,75	b
N° semillas/vaina	1,22	A a	1,35	A a	1,22	A a	1,70	b
N° semillas m^{-2}	444,57	A a	505,50	A a	505,58	A a	911,3	b
Peso semillas (g m^{-2})	65,73	A a	72,87	A a	76,73	A a	160,25	b
Rendimiento (kg ha^{-1}) *	742,7	A a	823,4	A a	867	A a	1818,8	b
Peso 100 semillas (g)	14,53	A a	14,30	A a	15,00	A a	17,50	b
Índice de cosecha (IC)	0,31	A a	0,30	A a	0,29	A a	0,41	b

M: "manchón"; N: "normal"; T: testigo; DF: dosis fraccionada de yeso; DU: dosis única de yeso. En la misma fila o variable las medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Letras en mayúsculas Test LSD Fisher entre T, DF y DU. Letras en minúsculas Test LSD Fisher entre T, DF, DU y N. *El rendimiento de soja en todos los tratamientos se estimó al 13% de humedad de las semillas.

Corte	T	DF	DU	N
1°	0,12 CD	0,12 BCD	0,14 D	—

M: "patch"; N: "normal"; T: without gypsum aggregation; DF: fractionated rate; DU: single application. Same letter in the same row or properties indicates no significant difference between the mean values ($p > 0,05$). Capital letters, Test LSD Fisher between T, DF y DU. Lowercase letters, Test LSD Fisher between T, DF, DU and N. *To estimate soybean yield 13% moisture weight by treatment was added of seeds at harvest.

la liberación de Na^+ de las micelas coloidales, que por la baja permeabilidad de estos suelos, no pudo drenar. La disolución de yeso, además provocó en DF una mayor $\text{CE}_{1,1}$ (Tabla 3) superando el umbral de tolerancia de la alfalfa (CEe de $2 \text{ dS m}^{-1} = \text{CE}_{1,1}$ de $1,1 - 1,4 \text{ dS m}^{-1}$) que la clasifica como un cultivo moderadamente sensible a la salinidad (FAO, 2006). Luego del 4° corte, decayó abruptamente la MS de alfalfa en todos los tratamientos, por transcurrir una época de déficit hídrico. En el 5° corte produjo más MS el tratamiento DF seguido por DU y ambos se diferenciaron de T. Esta modificación podría deberse a que las plantas en DF estaban más adaptadas a condiciones desfavorables por lo que no fueron tan afectadas. En cambio, el tratamiento DU con plantas más desarrolladas y demandantes de agua, fue más sensible a las condiciones del estrés hídrico, disminuyendo su rendimiento, especialmente por muerte de plantas (observado en los muestreos). Esto fue corroborado por Nilsen & Ocurtt (1996) quienes explican que las plantas capaces de hacer un uso más eficiente del agua podrán tener mayor resistencia al estrés por sequía pues poseen mecanismos de aclimatación que se activan en respuesta al estrés hídrico. No obstante, resistencia a la sequía de la alfalfa es deficiente tiene la estrategia de acceder al agua a través de su profundo sistema radicular (Sheaffer *et al.*, 1988). En el 6° corte se mantienen estables DF y T y se recupera DU a causa de las precipitaciones de esa época, aunque no hubo diferencias significativas entre tratamientos en ese momento. En este corte, la situación N se diferenció significativamente con aproximadamente el doble de rendimiento ($0,18 \text{ kg m}^{-2}$) con respecto a la situación M ($0,09$ en DU y $0,10 \text{ kg m}^{-2}$ en T y DF) (Tabla 5).

Corte	T	DF	DU	N
1°	0,12 CD	0,12 BCD	0,14 D	—
2°	0,11 BCD	0,12 CD	0,12 BCD	—
3°	0,11 BCD	0,12 CD	0,14 D	—
4°	0,17 E	0,14 D	0,18 E	—
5°	0,08 A	0,12 BCD	0,10 ABC	—
6°	0,10 ABC	0,10 ABC	0,09 AB	0,18*
MS Ac.	0,70 a	0,71 ab	0,76 b	—

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Letras en mayúsculas indican diferencias entre cortes y tratamientos, en minúscula diferencias entre tratamientos en la MS Ac y * diferencias significativas de la situación «normal» (N) con respecto a los tratamientos en «manchón» (M) en el 6° corte. Means with a common letter are not significantly different ($p > 0,05$). Capital letters indicate differences between cuts and treatments and lowercase letters indicate differences between treatments in MS Ac (dry matter accumulated). N: «normal» and * in 6° cut significant difference between «normal» (N) and «patch» (M) situations.

Costa & Godz (1999) en un Natracuol de la República Argentina, mencionan que el agregado de altas dosis de yeso duplicó el rendimiento de raygrass y trébol en los primeros años. Luego de 10 años de la aplicación del yeso, en pastura de agropiro y alfalfa no encontraron diferencias significativas con el testigo y se lo atribuyen a que esa fecha coincide con el comienzo de la reversión del proceso de recuperación y a que en su composición esa pastura contiene agropiro, especie adaptada a condiciones de sodicidad.

CONCLUSIONES

Se logró mejorar la capacidad productiva de sectores «manchoneados» a partir de la incorporación de yeso, provocando cambios en las propiedades del suelo. Siendo más significativos la disminución de pH y RAS y el aumento de K, especialmente en DU. Además, en DF se obtuvieron efectos adversos debido a aumentos en la RM de los primeros 15 cm y en la CE que superó los valores de tolerancia a la salinidad de alfalfa.

En cultivos de soja y alfalfa hubo tendencias y algunas diferencias significativas en la mejora de los rendimientos, siendo mayores estos incrementos en dosis única con respecto a la fraccionada. Esta respuesta al agregado de yeso en alfalfa fue mayor en épocas húmedas.

No obstante las mejoras obtenidas, el agregado de la enmienda en forma superficial en «manchones» no fue suficiente para alcanzar el rendimiento de los sectores «normales» en los cultivos y épocas estudiados.

Tabla 5.

Rendimiento de materia seca (MS) (kg m^{-2}) de alfalfa según corte y materia seca acumulada (MS Ac.) en testigo (T), dosis fraccionada de yeso (DF) y dosis completa o única de yeso (DU).

Table 5.

Dry matter yield of treatments for different cuttings for without gypsum aggregation (T), fractionated rate (DF), single application (DU).

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, CR & MA Taboada. 2008. Indicadores de la fertilidad física del suelo. Capítulo 6. *Err: M. A. Taboada, C.R. Álvarez (eds) Condición física del suelo y su relación con la fertilidad*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires.
- Azcarate, P & N Kloster. 2012. Acidez y alcalinidad del suelo. Capítulo II en Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Editores: Alberto Quiroga y Alfredo Bono. INTA Anguil.
- Bonado, E; I Moreno; R Marzari; C Milán & M Irastorza. 2009a. Influencia del agregado de yeso sobre el pH de un suelo con horizontes salino-sódicos subsuperficiales. *Rev. Universidad Nacional de Río Cuarto* 29(1-2): 37-46.
- Bonado, E; C Milán; I Moreno; M Basanta & J. Viola. 2009b. Efecto del agregado de enmiendas cálcicas y magnésicas a un Natrustalf típico de la República Argentina en condiciones de secano. Actas del XVIII Congreso latinoamericano de la Ciencia del suelo. Noviembre 2009. San José de Costa Rica.
- Bonado, E; I Moreno; A Baranda; & C Milán. 2014. Changes in a sodic soil after gypsum application under dryland conditions. *European Scientific Journal* 10(27): 367-377.
- Cisneros, JM; A Degionnni; JJ Cantero & A. Cantero. 2007. Caracterización de suelos salinos en el Área pampeana central. *Err: E. Taleisnik, K. Grunberg y G. Santa María (eds) La Salinización de suelos en la Argentina: su impacto en la rendimiento agropecuaria*. Editorial Universidad Católica de Córdoba Pp 17-46.
- Costa JL & P Godz. 1998. The effects of gypsum applied to a Natraquoll of the Flooding Pampas of Argentina. *Soil Use and Management* 14: 246-247.
- Costa JL & P Godz. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sudoeste de la Pampa Deprimida. *Ciencia del Suelo* 17(2): 21-27. Argentina.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L González; M Tablada M & CW Robledo. 2014. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje/56. 299 pp.
- García, O. 1994. Diagnóstico y control de la fertilidad en suelos afectados por sales y Na. Fertilidad de suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santa Fe de Bogotá. Pp 469-505.
- Gil, R. 2006. Infiltrómetro-Permeámetro de disco. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo en CD. Salta-Jujuy.
- Greene, RSB; P Rengasamy; GW Ford; CJ Chartres & JJ Miller. 1988. The effect of sodium and calcium on the physical properties and micro-morphology of two red-brown earth soils. *Soil Sci.* 39: 639-648.
- Hampp, E; E Bonadeo; M Bongiovanni & I Moreno. 2004. Aspectos genéticos de suelos con manchoneo de cultivos. XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Cartagena. Colombia.
- INTA. 1987. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-9 Villa María. Plan Mapa de Suelos Córdoba. Argentina.
- INTA. 1993. Panorama Edafológico de Córdoba. Inventario de los Suelos y de Algunos Caracteres Edáficos de la Provincia por Departamentos y Pedanías. Plan Mapa de Suelos de Córdoba.
- Klute, A. (ed) 1986. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. *gron. Monograph N° 9 ASA, SSSA, Madison, Wisconsin USA.*
- Lebron, I; DL Suarez & T Yoshida. 2002. Gypsum Effect on the Aggregate Size and Geometry of Three Sodic Soils Under Reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 92-98.
- Loveday, J. 1984. Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a clay soil. *Aust. J. Soil Res.* 14: 361-372.
- Milán, C; E Bonadeo; M Manzotti & A Dell'Oso. 2016a. Técnica del índice de dispersión para el reconocimiento de suelos sódicos. Libro digital, PDF de Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto. Junio de 2016. 367 pp.
- Milán, C. 2016b. Variabilidad espacial de suelos sódicos "manchoneados" y su mejora. Tesis para acceder al Título de Magister en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Río Cuarto. Facultad de Agronomía y Veterinaria.
- Mon R. 2007. Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolador con enmienda cálcica profunda. Tesis Doctoral Universidade da Coruña. Área de Edafología y Química Agrícola.
- Nilsen, ET & DM Orcutt. 1996. Physiology of plants under stress. Abiotic factors. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Northcote, KH and JKM Skene. 1972. Australian soils with saline and sodic properties. CSIRO Soil Publication 27.
- Page, AL; RI Miller & DR Keeney (ed) 1982. Methods of soil analysis. Part II. Chemical and Microbiological Properties. Second edition. Agron. Monograph N° 9 ASA, SSSA, Madison, Wisconsin USA.
- Quintero, C; N Boschetti; A Durand Morat & S Fettoloni. 2003. Recuperación de suelos dispersivos por medio de enmiendas. <http://www.fertilizando.com/articulos/RecuperaciondeSuelosDispersivosporMediodeEnmiendas.pdf>.
- Rengasamy, P. 1997. Sodic soils. *In: Rengasamy Lal, R.; Blum, W.H. ; Valentine, C. and A. Stewart (1997) Methods for assessment of soil degradation, R. Lal et al. (eds) Advances in Soil Science (USA).* 558 pp.
- Rengasamy, P. 1998. Sodic soils. *In: Lal, R, WH. Blum, C Valentine & BA Stewart. Methods for assessment of soil degradation.* CRC Press. Boca Raton. London. New York. Washington. 269 pp.
- Richards, LA. (ed) 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Handbook No.60. Washington, DC. Sonnnewekd, C. and Van Den Ende, J. 1971. Soil analysis by means of a 7:2 volume extract. *Plant Soil* 35: 505-516.
- Shainberg, I & J Letetey. 1984. Response of soils to sodic and saline conditions, *Hilgardia* 52(2): 1-57.
- Sheaffer, CC; CB Tanner & MB Kirkham. 1988. Alfalfa water relations and irrigation. *In: Hanson, A.A., Barnes, D.K. y Hill, R.R., Jr. eds. Alfalfa and alfalfa improvement.* Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Vol. 29, 373-409.
- Soil Survey Staff. 2003. Keys to Soil Taxonomy. Ninth Edition. USDA-Natural Resources Conservation Service, 232 p.
- Taboada, M & R.S. Lavado. 2009. Alteración de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. 1ra ed. Ed. Literaria, Universidad de Buenos Aires.
- Torrente, A. 2003. Características físicas e hidrodinámicas en suelos con alta saturación de magnesio en el Valle del Río Cauca-Colombia. Tesis doctorado en Ciencias Agropecuarias con énfasis en Suelos, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 234 pp.

