

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**APLICACIÓN DE YESO AGRÍCOLA EN SUELOS
CON ALTA CONCENTRACIÓN DE SODIO**

por

Johana Roxana BALLESTERO AVILA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias del Suelo

MONTEVIDEO
URUGUAY
(Julio, 2019)

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dr. Ing. Agr. Jorge Hernández, Dra. Ing. Agr. Amabelia del Pino, Dr. Ing. Agr. Juan Andrés Quincke, e Ing. Agr. Marcelo Ferrando, el 17 de Julio del 2019. Autora: Lic. En Geoquímica Johana Ballesterio. Directora Dra. Ing. Agr. Mónica Bárbazan.

*a mis Padres,
Guida y Tony*

AGRADECIMIENTOS

A mi Directora de Tesis Dra. Mónica Barbazán por su orientación, enseñanza y apoyo en todo momento y en cada ocurrencia que tuve durante el desarrollo de este trabajo.

A Jorge Hernández, Amabelia del Pino, Andrés Quincke y Marcelo Ferrando, por aceptar formar parte del tribunal.

Un especial agradecimiento a Lucia Rocha, Verónica Piñeiro y Virginia Takata por sus consejos, su guía, su ayuda y por su amistad.

A mis queridas compañeras en la Cátedra de Química Gimena, Laura, Mercedes, Verónica, Patricia, que me han escuchado, aconsejado y guiado por este camino científico que apenas empieza.

A todos los demás que forman parte importante de mí día a día en el Laboratorio de Suelos y Agua y en las Cátedras de Fertilidad, Edafología y Geología. No los enumero porque no me alcanzaría una página para escribir las palabras que cada uno de ustedes se merecen.

Gracias mil.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VIII
SUMMARY	IX
 1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	 1
1.1. SUELOS CON EXCESO DE SALES	1
1.2. SUELOS CON EXCESO DE SALES DE SODIO	4
1.3. ALTERNATIVAS PARA LA ELIMINACIÓN DEL SODIO	 6
1.4. ANTECEDENTES DE LA APLICACIÓN DEL YESO SOBRE SUELOS CON EXCESO DE SODIO	 8
1.5. LISÍMETROS COMO TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN EL SUELO	 11
1.6. ÁREA DE ESTUDIO	12
1.7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	 15
 2. <u>YESO AGRÍCOLA APLICADO EN SUELOS CON EXCESO EN SODIO: ESTUDIO EN MICROLISÍMETROS</u>	 16
2.1. RESUMEN	16
2.2. SUMMARY	17
2.3. INTRODUCCIÓN	18

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.4.1. <u>Lugar de muestreo</u>	20
2.4.2. <u>Elaboración de los microlisímetros</u>	21
2.4.3. <u>Tratamientos aplicados</u>	22
2.4.4. <u>Procesamiento de las muestras</u>	23
2.4.5. <u>Análisis estadístico</u>	23
2.5. RESULTADOS	24
2.6. DISCUSIÓN	28
2.7. CONCLUSIONES	32
2.8. REFERENCIAS	33
 3. <u>YESO AGRÍCOLA APLICADO EN SUELOS CON EXCESO EN SODIO: ESTUDIO A CAMPO</u>	37
3.1. RESUMEN	37
3.2. SUMMARY	38
3.3. INTRODUCCIÓN.....	38
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.4.1. <u>Sitio de estudio</u>	40
3.4.2. <u>Diseño experimental</u>	43
3.4.3. <u>Tratamientos aplicados</u>	44
3.4.4. <u>Muestreo de suelo y biomasa aérea de la pastura</u>	45
3.4.5. <u>Procesamiento y análisis de muestras</u>	46
3.4.6. <u>Análisis estadístico</u>	47
3.5. RESULTADOS	47
3.6. DISCUSIÓN.....	55
3.7. CONCLUSIONES.....	59

3.8. REFERENCIAS.....	61
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	66
5. <u>CONCLUSIONES</u>	70
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	71

RESUMEN

La acumulación de sodio (Na) en el complejo de intercambio afecta el rendimiento de los cultivos. En Uruguay, existen suelos con alta concentración de Na intercambiable de origen genético, los cuales permanecen como áreas improductivas. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se emplea como fuente de iones calcio (Ca^{+2}) para desplazar a los iones Na^+ del complejo de intercambio catiónico. El objetivo de este trabajo fue evaluar la efectividad de dos fuentes de yeso agrícola para mejorar las condiciones de un suelo con alta concentración de Na intercambiable. En el laboratorio (usando microlisímetros) se empleó el horizonte Ap de un suelo con 1,53 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Na intercambiable y 14% de porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Se emplearon dosis equivalentes a 3 y 6 Mg ha^{-1} de cada fuente de yeso agrícola, más un testigo. Después de 360 días de aplicados los tratamientos, se observó la disminución del PSI a 6 % y del Na intercambiable a 0,99 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. En condiciones a campo (con pastura implantada) se aplicaron tres dosis: 1, 2 y 3 Mg ha^{-1} más un testigo. La aplicación fue realizada en forma manual, sobre una pastura implantada de *Festuca arundinacea*. Luego de 420 días, en los primeros 20 cm del perfil del suelo con yeso, se observó una disminución del Na en paralelo al aumento del Ca en el complejo de intercambio. La pastura que recibió el yeso rindió 50 % más que la pastura testigo. Las dos fuentes de yeso agrícola empleadas fueron igualmente efectivas en el desplazamiento del ion Na del complejo de intercambio catiónico. Para realizar una recomendación a nivel comercial es necesario continuar la investigación a todo lo largo del perfil, con un estudio prolongado a campo, que involucre la eliminación del Na en exceso.

Palabras claves: sulfato de calcio, microlisímetro, pastura, sódico.

APPLICATION OF AGRICULTURAL GYPSUM ON SOIL WITH HIGH SODIUM CONCENTRATION. SUMMARY

The accumulation of sodium (Na) in the exchange complex affects the yield of the crops. In Uruguay, there are soils naturally high in exchangeable Na, which remain as unproductive areas. Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is used as a source of calcium ions (Ca^{+2}) to displace Na^+ ions from the cation exchange complex. The objective of this work was to evaluate the effectiveness of two agricultural gypsums sources to improve the conditions of a soil with high exchangeable Na concentration. In the laboratory (using microlysimeters), was used the Ap horizon of a soil with $1.53 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ of interchangeable Na and 14% interchangeable sodium percentage (PSI). Doses equivalent to 3 and 6 Mg ha^{-1} of each source of agricultural gypsum were used, plus a control. After 360 days of applying the treatments, PSI decreased to 6% and exchangeable Na to $0.99 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Under field conditions (with implanted pasture), application rates were 1, 2 and 3 Mg ha^{-1} plus a control. The application was made manually, on an implanted pasture of *Festuca arundinacea*. After 420 days, in the first 20 cm of the soil profile with gypsum treatments, a decrease in Na and an increase in exchangeable Ca were observed. The pasture that had received gypsum yielded in average 50% more than the control pasture. The two agricultural gypsum sources employed were equally effective in displacing the Na ion from the cation exchange complex. To make a commercial recommendation, it is necessary to continue the research throughout the profile, with a long-term study at the field, which involves the elimination of excess Na.

Keywords: calcium sulfate, microlysimeter, pasture, sodic.

1. INTRODUCCIÓN

El valor de la tierra en Uruguay ha tenido un aumento sostenido en el mercado en los últimos años. Debido, entre otros factores, a la rentabilidad de la exportación de granos como la soja, lo que ha conducido a cambios en las actividades del agro en el país (Grille, 2015). Por lo tanto, es necesario aumentar la productividad de los cultivos con un uso más eficiente del suelo.

En el país hay suelos con altos niveles de sodio (Na), que son relegados agronómicamente dada su improductividad y considerados de poca importancia para la agroindustria. La presencia de Na en exceso influye negativamente sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, principalmente conlleva a la pérdida de estructura por dispersión de los coloides.

Dado la necesidad actual de aumentar la productividad por superficie, es predominante desarrollar una estrategia para recuperar o mejorar las condiciones para los cultivos en esos suelos que presenten altos niveles de Na.

1.1 SUELOS CON EXCESO DE SALES

En los sistemas naturales de aguas y suelos hay cantidades variables de sales solubles. Pero la acumulación de estas sales puede generar sistemas adversos para el desarrollo de la mayoría de las plantas.

La presencia de un exceso de sales en un suelo puede producirse por la combinación de diversos factores, que incluyen la presencia de una fuente de sales solubles y un proceso de acumulación continua mayor que el proceso de lavado. Por ejemplo, el uso de aguas salobres para el riego es una de las causas antrópicas más comunes de la generación de suelos salinos.

También pueden tener origen natural, por ejemplo por efecto de la intrusión del agua de mar o el afloramiento de aguas subsuperficiales con altos contenidos de Na (Fassbender, 1987).

El exceso de sales en los suelos puede afectar el desarrollo de las plantas a través de tres vías: (1) por el incremento del potencial osmótico que conlleva a la disminución de la disponibilidad del agua; (2) debido al efecto del ion específico que afecta el metabolismo biológico; y (3) indirectamente a causa de la disminución de la permeabilidad y aireación en el suelo porque se produce un efecto adverso sobre su estructura. Bajo estas condiciones, la mayoría de las plantas son pequeñas y crecen lentamente; incluso pueden llegar a marchitarse y morir cuando el contenido de sales es muy alto (Evangelou, 1998; Provin y Pitt, 2012).

El United States Department of Agriculture (USDA) ha clasificado a los suelos con exceso de sales solubles como suelos salinos, salinos – sódicos y sódicos, según la relación entre el valor de conductividad y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), como se muestra en la Tabla 1 (Richards, 1954). Estos se definen como los suelos que presentan concentraciones excesivas de sales solubles, Na intercambiable o ambos, de tal manera que afectan o alteran la productividad de los suelos.

Tabla 1. Clasificación de suelos salino – sódico USDA (Richards, 1954).

Suelos	pH	Na CIC	CE dS/m
Salinos	< 8.5	< 15%	> 4
Sódico - Salino	< 8.5	> 15%	> 4
Sódico	> 8.5 - 11	> 15% - 90%	< 4

Dicha clasificación fue establecida a partir de suelos halomórficos en zonas áridas, principalmente para suelos que fueron generados por el uso de aguas de riego ricas en sales solubles. Para zonas húmedas y subhúmedas los criterios recomendados son los valores de PSI y de Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Szabolcs, 1994; Bandera, 2013); dado que suelos con PSI inferiores a 15 % pueden presentar problemas físicos asociados al exceso de Na en el suelo, como disminución de la permeabilidad y encostramiento en superficie (Taboada y Lavado, 2009).

Un suelo es considerado como salino cuando contiene un nivel tal de sales solubles que interfiere en el crecimiento normal de las plantas. Comúnmente se localizan en zonas de bajo relieve que, al combinarse con un pobre drenaje, dan lugar al proceso de acumulación. En la superficie se forman costras blanquecinas producto de la cristalización de cloruros y sulfatos y por lo que se denominan “suelos salinos blancos”. En algunos casos, la costra puede ser de color marrón a causa de la dispersión de la materia orgánica presente en el suelo (Fassbender, 1987).

La salinización en combinación con el proceso de sodificación genera los suelos clasificados como salinos – sódicos, los cuales presentan características similares a los suelos salinos con la dificultad de una alta concentración de sales de Na. El agua puede moverse sin gran dificultad a través de los suelos salinos y de los suelos salinos – sódicos, por lo que hay que tener especial atención en estos últimos con la aplicación de riego para eliminar el exceso de sales del perfil, ya que puede generarse un suelo principalmente sódico (Fassbender, 1987; Provin y Pitt, 2012).

Cuando un suelo contiene un exceso de Na intercambiable que afecta el crecimiento de las plantas es denominado suelo sódico. En este tipo de

suelo existe una alta predominancia del Na en el complejo de intercambio catiónico, presentando una alta proporción de dicho catión en comparación con el resto de los cationes del complejo de intercambio. El exceso del Na intercambiable afecta las propiedades químicas de los suelos pero en especial las propiedades físicas, llegando a alterarlas por completo e impidiendo que sea posible el desarrollo óptimo de cualquier cultivo (Black, 1975; Fassbender, 1987).

1.2 SUELOS CON EXCESO DE SALES DE SODIO

En un sistema saturado con iones calcio (Ca^{+2}) existe una buena estructura del suelo. La presencia de un ion divalente como el Ca^{+2} produce una doble capa difusa¹ comprimida, lo que evita la dispersión de las arcillas. En contraposición, el carácter monovalente del ion Na (Na^{+}) genera una doble capa difusa expandida. Por esto, cuando hay exceso de Na en el suelo, se presentan altas presiones expansivas entre las arcillas que impiden que los coloides estén lo suficientemente cerca para la floculación.

Además, los iones Na^{+} en el suelo están fuertemente hidratados con una capa de moléculas de agua, lo que contribuye a la dispersión porque aumenta la distancia entre las partículas del suelo (García, 2009; Davis *et al.*, 2013). La Figura 1 ejemplifica la diferencia de la atracción entre las partículas del suelo dependiendo del catión presente.

Los suelos con Na intercambiable en exceso se caracterizan por la falta de una buena circulación de agua y de aire a través de su perfil, ya que presentan una estructura desfavorable, que además dificulta el crecimiento radicular. El pobre drenaje de estos suelos se debe a que la dispersión de las

¹ La *Doble Capa Difusa* es una teoría que trata de explicar la distribución de los iones alrededor de las superficies cargadas electrostáticamente de los coloides del suelo.

arcillas disminuye el diámetro de los poros y reduce la conductividad hidráulica (García, 2009).

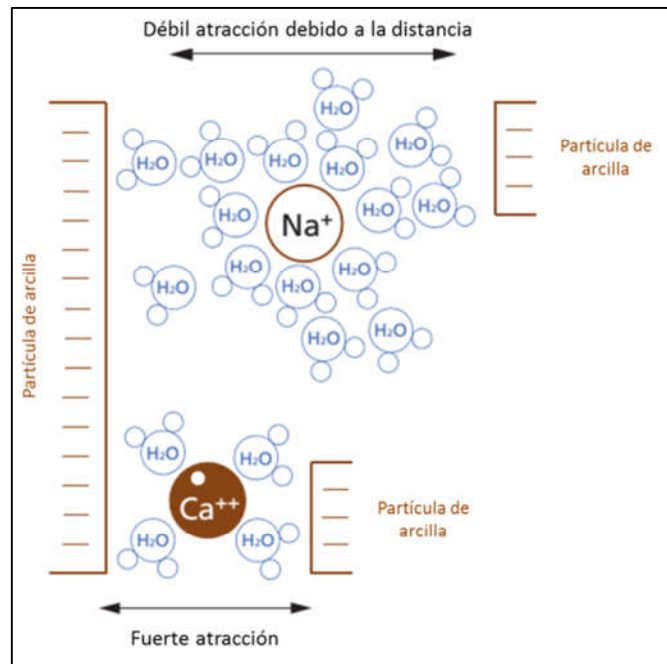


Figura 1. Diferencia en la fuerza de atracción entre las partículas según el catión presente (adaptado de Central West Catchment Management Authority, 2008).

Son suelos reconocibles en el campo debido a que forman terrones duros y una costra superficial cuando están secos. Debido a la dificultad para que ocurra el proceso de infiltración, es común encontrar en la superficie encharcamientos producidos por el riego o por el agua de lluvia (Black, 1975; Cardon *et al.*, 2003).

Debido al sellamiento superficial del suelo por las costras formadas se dificulta la germinación, emergencia y enraizamiento de las plantas. Además, se dificulta el laboreo y crecimiento de los cultivos por la falta de aireación e

infiltración del agua a través del perfil. Todo esto origina una pobre relación entre suelo – aire – planta (Costa y Godz, 1999; García, 2000).

Se resumen a los suelos con exceso de Na en: incremento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), valores muy reducidos de conductividad hidráulica y disminución de los electrólitos en la solución del suelo (Sahin y Anapali, 2005).

1.3 ALTERNATIVAS PARA LA ELIMINACIÓN DEL EXCESO DE SODIO

Para mejorar las condiciones de un suelo salino es necesario disminuir el exceso de sales solubles. Comúnmente se disminuye la salinidad a través de un proceso de lixiviación, con la aplicación de riego empleando aguas de buena calidad. Sin embargo, la recuperación de suelos sódicos y sódicos-salinos requiere tener en cuenta no solo el flujo de agua sino la interacción con las características químicas (Suárez, 2001).

La recuperación de la calidad en suelos con exceso de Na intercambiable (sódico y sódico-salino) se establece básicamente en dos pasos: la sustitución de los iones Na^+ que están en exceso con Ca^{+2} en el complejo de intercambio y la posterior eliminación del Na reemplazado fuera de la zona de enraizamiento (Ahmad *et al.*, 1988; Jaramillo, 2002).

Para disminuir el Na en exceso que se ubica en el complejo de intercambio de los suelos se aplican enmiendas químicas o una combinación de estas con enmiendas orgánicas. A partir del aporte del Ca necesario, se busca sustituir al Na y mejorar las condiciones que promueven la mejora en la estructura del suelo.

Las enmiendas químicas empleadas para reemplazar al Na se dividen en tres tipos: (a) ácidos o sustancias que forman ácidos (azufre elemental S,

ácido sulfúrico H_2SO_4 , sulfato de hierro FeSO_4 , sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, azufre calcáreo); (b) carbonatos de Ca y magnesio (carbonato de calcio CaCO_3 , carbonato de calcio y magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$); y (c) sales solubles de Ca (cloruro de calcio CaCl , sulfato de calcio $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

La enmienda empleada más frecuentemente para reducir la sodicidad de los suelos es la aplicación del sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comúnmente conocido como yeso. Existen abundantes investigaciones sobre el uso de esta enmienda para producir mejoras en las propiedades de los suelos sódicos-salinos y suelos sódicos, en especial para disminuir la dispersión y establecer una tendencia a mejorar la estructura (Makoi y Verplancke, 2010).

El yeso solubilizado aumenta la concentración de los iones Ca^{+2} en la solución del suelo, con lo que se rompe el equilibrio del sistema ya que hay más Ca en la solución que el retenido por la fase intercambiable. Al buscar un nuevo equilibrio, el sistema libera los iones Na^+ de los coloides y toma los iones Ca^{+2} de la solución. A través de este proceso es que ocurre el desplazamiento del Na por el Ca en el suelo.

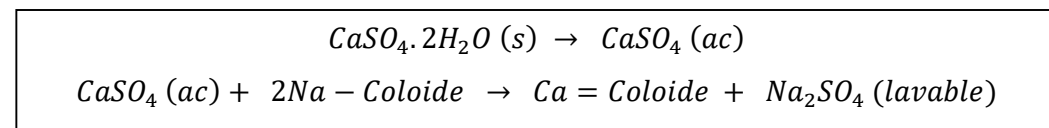


Figura 2. Desplazamiento del exceso de iones Na del coloide por los iones Ca procedente de la disolución del yeso (adaptado de Brady y Weil, 2008).

Al aumentar el contenido de Ca en los coloides, se dan las condiciones para promover la floculación de los agregados del suelo, mejorando la

permeabilidad y la aireación. Esta mejora en las condiciones estructurales, permite que se den las condiciones para el aprovechamiento del suelo.

La estrategia se complementa con la lixiviación hacia las capas más profundas del Na_2SO_4 (sal muy soluble), formado a partir del Na^+ reemplazado del suelo y el sulfato (SO_4^{2-}) proveniente de la disolución del yeso. El lavado de la sal soluble puede lograrse con la aplicación de irrigación o por el efecto de las lluvias (Ahmad *et al.*, 1988; Costa y Godz, 1999; Cardon *et al.*, 2003).

Sin embargo, la aplicación de un simple riego puede ser poco efectiva. Muchos de los suelos con problemas de Na poseen un horizonte con textura arcillosa y estructura prismática o columnar, que forman una capa impermeable a cierta profundidad. Por tanto, se recomiendan riegos en tiempos prolongados y continuos, en combinación con la aplicación del yeso (Hussain *et al.*, 2000).

Con la aplicación de yeso se recupera la macroporosidad de los suelos, pero también se mantiene la concentración del ion Ca^{+2} en la solución para prevenir la desestabilización de los agregados y oclusión de los poros (Sahin y Anapali, 2005).

1.4 ANTECEDENTES DE LA APLICACIÓN DEL YESO SOBRE SUELOS CON EXCESO DE SODIO

A nivel mundial existen muchos trabajos mostrando los efectos del agregado de yeso en las propiedades físico-químicas del suelo y en el comportamiento de los cultivos. Por ejemplo, en Irán, Rasouli *et al.* (2013) evaluaron la aplicación de distintas dosis de yeso de diferente granulación a un suelo sódico. Estos autores obtuvieron los mejores resultados de

conductividad hidráulica donde aplicaron mayores dosis de yeso con grano grueso, asociado a un efecto físico de disolución lenta. También encontraron una relación inversa entre el valor del RAS y el rendimiento de trigo.

En la región, varios trabajos realizados en Argentina muestran el efecto del agregado de yeso tanto en producciones bajo invernáculo como en producción de forraje. Lazovich *et al.* (1985) evaluaron la eficiencia de distintas enmiendas a través del agua percolada y la producción de lechuga bajo invernáculo. Las enmiendas probadas fueron yeso, carbonato de calcio (CaCO_3) y la combinación de azufre (S) y carbonato de calcio. Los mejores resultados los obtuvieron con el yeso, debido a su mayor solubilidad respecto al carbonato de calcio. También observaron una mayor producción de materia seca del cultivo, un desplazamiento de Na en el complejo de intercambio, pero también del Mg en las dosis más altas del yeso.

Costa y Godz (1999) estudiaron el efecto de la aplicación de yeso en la producción de forraje y las propiedades químicas del suelo a un natraquel² de la Pampa Deprimida. Después de 10 años se logró una reducción del Na superficial al incorporar yeso en los primeros 10 centímetros de suelo. Con mayores dosis de yeso se lograba disminuir la concentración de Na intercambiable en profundidad. La enmienda permitió la implantación de pasturas y duplicó la producción de forraje.

Arévalo *et al.* (2009) estudiaron la aplicación de yeso como fuente de Ca y Kieserita como fuente de magnesio (Mg), con el fin de aumentar el rendimiento de la alfalfa en suelos sódicos conocidos como “manchoneados” en la provincia de Córdoba en Argentina. Luego de un año, no se observaron grandes cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, pero sí se

² Molisoles con horizonte mólico somero y un horizonte Bt muy alcalino (enriquecido en sales y en Na de intercambio, procedente de capas de agua salina).

evidenció un aumento importante en la producción de materia seca de las pasturas, en especial en aquellos tratamientos donde se aplicó la fuente de Mg.

Debido a que el proceso de recuperación de suelos con problemas de Na es lento, a los tres meses de aplicado yeso agrícola en un suelo salino-sódico, Khan *et al.* (2010) no encontraron diferencias significativas entre tratamientos. En un segundo muestreo realizado a los 10 meses de aplicada la enmienda, encontraron una reducción en la conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y pH. Estos autores determinaron una mayor eficiencia en la aplicación de yeso usando tecnología de aplicación variable según las condiciones sódicas que presentan los suelos con estas características.

Bandera (2013) evaluó la aplicación del yeso como enmienda química y efluentes del tambo como enmienda orgánica, tanto en experimentos de campo como en invernáculo. Luego de casi un año, la evaluación a campo no mostró ningún efecto sobre las características salino – sódicas del suelo, debido a una fuerte sequía durante el ensayo, lo que no permitió la lixiviación de las sales solubles en exceso. En cambio, en el invernáculo, hubo un aumento importante en la producción de materia seca de especies de forraje en conjunto con la disminución en los valores del PSI en los suelos.

En Uruguay, son pocas las investigaciones sobre los suelos con exceso de Na que estén publicadas o sean de fácil acceso. Uno de estos trabajos es el recientemente publicado por Polak (2011), donde se evaluó la mejora de las condiciones fisicoquímicas de suelos sódicos mediante la aplicación de yeso agrícola. Para delimitar las áreas problemáticas se empleó la técnica de agricultura de precisión. Luego de seis meses, se encontró una disminución

en los niveles del PSI y de la concentración de Na intercambiable, además se estableció una tendencia a la disminución en el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

1.5 LISÍMETROS COMO TÉCNICA DE EVALUACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN EL SUELO

Las estimaciones del flujo de agua y el movimiento de los iones en el perfil del suelo son mediciones difíciles de determinar dado la complejidad de la naturaleza de muchas de las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Los lisímetros son una técnica usada desde hace décadas para realizar el estudio de la percolación del agua a través del perfil de un suelo. Hoy en día es aplicada para realizar el seguimiento de la movilidad de los nutrientes, contaminantes y la bioactividad en el sistema suelo.

Un lisímetro es esencialmente un recipiente que contiene un bloque de suelo. Dependiendo de la finalidad del ensayo, el lisímetro puede variar en tamaño y/o forma de llenado. El fondo se conecta a una tubería que permite la recolección del agua que percola a través del perfil del suelo. Esto permite hacer una medición más acertada de lo que está sucediendo a través del sistema, en comparación con otras técnicas, como por ejemplo las parcelas de escurrimiento. Además, con el empleo de lisímetros se consigue un mayor grado de control sobre los factores ambientales, porque puede instalarse tanto en ambientes abiertos a campo, como en invernaderos o en el laboratorio (Bergström, 1990; Weihermüller *et al.*, 2007).

1.6 AREA DE ESTUDIO

Para realizar este estudio fue seleccionada un área ubicada dentro del campo de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Paysandú, Uruguay. Esta región corresponde a la unidad San Manuel, donde predominan los Brunosoles Éutricos Típicos y Lúvicos, con suelos asociados como Solonetz Aéricos con horizonte A muy delgado, ócrico (Durán y García, 2007).

Los suelos con alta concentración de sodio intercambiable en Uruguay son denominados por Durán y García (2007) como suelos Nátricos, e incluyen dos subgrupos que son los Solonetz (suelos sódicos) y los Solods (suelos sódicos degradados, con mejores condiciones físicas que los anteriores). Generalmente, aparecen en forma irregular como áreas de superficie reducida incluidas en áreas mayores de suelos no alcalinos.

La presencia del alto contenido de sodio puede deberse a las últimas transgresiones marinas, dadas las evidencias de paleocostas (Chebataroff, 1973). El material generador son lodolitas o limos arcillosos comparables, de edad pleistocénica media a holocénica (Durán, 1991). No son suelos dominantes en el paisaje, considerándose como suelos asociados, principalmente encontrados en las unidades San Manuel, La Charqueada y Río de Tacuarembó de la carta 1:1 000 000 (Durán y García, 2007).

El nivel de sodio en el horizonte A de los suelos Nátricos puede ser variable en tan solo pocos metros, debido a la irregularidad con la que se presentan en el terreno. Poseen un horizonte A eluvial generalmente delgado, por encima de un horizonte B nátrico iluvial de arcilla, muy desarrollado con alta concentración de sodio intercambiable.



Figura 3. Área de trabajo. Campo de la Estación Experimental Mario Cassinoni (EEMAC) en Paysandú, Uruguay.

Son suelos de extrema dureza cuando están secos y una consistencia plástica cuando están húmedos (Durán y García, 2007).

Los suelos Nátricos tienen la particularidad de presentar un horizonte superficial con poca vegetación y con color muy claro cuando está seco, blanquecino, que los hace reconocible a simple vista (en terminología no científica se les conoce como “blanqueales”). En general, son suelos de poca productividad dadas las pobres condiciones químicas y físicas para el crecimiento favorable de la mayoría de las plantas (Durán, 1991; Durán y García 2007).

Dado las características de la ocurrencia de los suelos Nátricos, estos suelos no tienen un uso en especial sino que están supeditados al uso de los suelos dominantes a los que están asociados. En aquellas zonas donde están más extendidos, son destinadas para el uso ganadero o arrocero. En algunos casos, donde pueden considerarse los suelos sódicos dominantes (tales como las unidades de El Ceibo o Rincón de Ramírez) es aprovechado el anegamiento natural para el cultivo de arroz (Durán, 1991; Durán y García, 2007).

Tabla 2. Análisis de la caracterización de un Solonetz Aérico de la Unidad
San Manuel / Formación Fray Bentos

(Tomado y modificado de Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Durán y García, 2007).

Horizonte	Esp (cm)	Arena (2 - 0,05)	Limo (50 - 2)	Arcilla (<2 µm)	pH (H ₂ O)	C. org %	Ca	Mg	K	Na	CIC pH 7,0	CIC pH 8,2
A1	0 - 2	40,2	43,3	16,5	7,2	1,23	7,8	1,9	0,8	1,1	12,6	14,9
A2	2 - 8	36,7	40,0	23,3	6,9	1,44	11,2	1,9	0,9	1,5	16,9	21,3
Bt1	8 - 20	34,2	38,3	27,5	7,3	1,27	13,2	2,2	0,7	2,5	20,2	22,9
Bt2	20 - 43	22,2	32,3	45,5	8,2	1,34	20,8	4,3	0,9	7,0	31,6	35,3
Bt3	43 - 56	19,2	34,4	46,4	8,4	0,89	22,2	4,5	0,9	9,0	30,5	39,9

1.7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

En Uruguay son escasos los trabajos publicados en la investigación de suelos con alta concentración de Na. Por ello, este trabajo plantea obtener información sobre la efectividad de la aplicación del yeso agrícola como mejorador de las condiciones de dichos suelos.

La estructura de la tesis se establece en dos artículos, uno con experimentos en el laboratorio y otro con ensayos a campo, los cuales están destinados a ser enviados a la revista Agrociencia Uruguay:

- 1) Artículo Nº 1. Yeso agrícola aplicado en suelos con alta concentración de sodio: estudio en microlisímetros. El objetivo de este trabajo fue evaluar en el laboratorio, bajo condiciones controladas, la aplicación de dos yesos agrícolas a distintas dosis mediante el uso de microlisímetros.
- 2) Artículo Nº 2. Yeso agrícola aplicado en suelos con alta concentración de sodio: estudio a campo. Este estudio se planteó como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de dos yesos agrícolas sobre un suelo con alta concentración de Na intercambiable en condiciones a campo.

2. YESO AGRÍCOLA APLICADO EN SUELOS CON ALTA CONCENTRACIÓN DE SODIO: ESTUDIO EN MICROLISÍMETROS

2.1. RESUMEN

Altos niveles de concentración de sodio (Na) en suelos, afectan el rendimiento de los cultivos. En Uruguay existen zonas donde los suelos que presentan este problema, tienen un origen natural. La técnica más recomendada para disminuir la concentración de Na del suelo es el agregado de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esta enmienda actúa como fuente de iones Ca que desplazan el exceso de Na del complejo de intercambio catiónico. El objetivo de este trabajo fue evaluar, mediante el uso de microlisímetros, el efecto de la aplicación de yeso agrícola sobre las propiedades químicas del horizonte Ap de un suelo con $1,53 \text{ cmolc kg}^{-1}$ de Na intercambiable y 14% de porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Se emplearon dos tipos de yeso agrícola a dosis equivalentes a 3 y 6 Mg ha^{-1} , más un tratamiento testigo (sin yeso). Luego de 360 días de aplicados los tratamientos, se observó una tendencia a la disminución del Na intercambiable en paralelo con un aumento del Ca intercambiable, con respecto al suelo testigo. Ocurrió la disminución del PSI a 6 % y del Na intercambiable a $0,99 \text{ cmolc kg}^{-1}$. Los dos tipos de yesos agrícolas empleados no mostraron diferencias en su comportamiento y fueron igualmente efectivos en el desplazamiento del ion Na del complejo de intercambio catiónico. El intercambio de Ca por Na es un proceso complejo y la efectividad del yeso está relacionada con el tiempo. Es necesario complementar con estudios de campo para desarrollar recomendaciones del uso del yeso en suelos con exceso de Na, bajo condiciones edafológicas y climáticas de Uruguay.

Palabras claves: lisímetros, sulfato de calcio, sódico.

2.2. SUMMARY

High levels of sodium concentration (Na) in soils affect the yield of crops and in Uruguay there are areas of natural origin with this problem. The most recommended technique for reducing soil Na is the addition of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). This amendment acts as a source of Ca ions that displace the excess Na from the cation exchange complex. The objective of this work was to evaluate, through the use of microlysimeters, the effect of application of agricultural gypsum on the chemical properties of Ap horizon of a soil with $1.53 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ of exchangeable Na and 14% Exchangeable Sodium Percentage (ESP). Two types of agricultural gypsum were used at doses equivalent to 3 and 6 Mg ha^{-1} , plus a control treatment (without gypsum). After 360 days of applying the treatments, it was observed a tendency to decrease the exchangeable Na and to increase the exchangeable Ca, when compared to the control soil. The PSI decreased to 6% and the exchangeable Na to $0.99 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. The two type agricultural gypsums did not show differences in their behavior and were equally effective in displacing the Na ion from the cation exchange complex. The exchange of Ca by Na is a complex process and the effectiveness of the gypsum is related to time. It is necessary to complement with field studies develop recommendations on the sue gypsum in soils with excess Na, under edaphological and climatic conditions of Uruguay.

Keywords: lysimeters, calcium sulfate, sodium.

2.3. INTRODUCCIÓN

El exceso de iones sodio (Na) en el complejo de intercambio catiónico de un suelo incide negativamente en el desarrollo de los cultivos. Entre otros efectos, se produce deficiencia de potasio (K) con disminución de la actividad enzimática (Chinnusamy, Jagendorf y Zhu, 2005; Wu, 2018).

Por otra parte, hay dificultad para la germinación y enraizamiento de la planta por las malas condiciones estructurales del suelo. La naturaleza altamente hidratada del ion Na impide la floculación de los coloides del suelo para formar los agregados, debido a que el espacio entre las partículas se hace tan grande que no hay atracción entre ellas y provoca una alta dispersión de los coloides del suelo. Esto genera baja permeabilidad y porosidad, con un comportamiento físico diferencial según el contenido de agua: plástico en húmedo y duro en seco. (Black, 1975; Evangelou, 1998; Upadhyay, Tripathi y Pandey, 2012; Tirado *et al.*, 2013; Luo *et al.*, 2015).

En Uruguay, los suelos con altos niveles de Na en el complejo de intercambio, denominados como suelos Nátricos, pueden ocurrir como suelos asociados ya que ocupan áreas reducidas, en forma irregular y no predominan en el paisaje. Son reconocibles por presentar un horizonte con poca vegetación y de color blanquecino cuando están secos (Durán, 1991; Durán y García, 2007). La alta concentración del ion Na en este tipo de suelo es de origen natural, probablemente producto de las últimas transgresiones marinas (Chebataroff, 1973).

El agregado de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es una de las técnicas comúnmente recomendadas para eliminar el exceso de Na. Esta enmienda aporta iones calcio (Ca) que desplazan al Na del complejo de intercambio y promueven la floculación de los coloides que forman los agregados. Con ello se logra

mejorar las condiciones del suelo, principalmente su estructura (Rengasamy y Olsson, 1985; Wilson *et al.*, 2004; Makoi y Verplancke, 2010).

Qadir, Quareshi y Ahmad (1996) aplicaron yeso y sembraron *Leptochloa fusca* (una especie monocotiledónea de alta tolerancia a sales) en lisímetros, para la recuperación de un suelo salino – sódico. El tratamiento con la dosis de 100 % de requerimiento de yeso fue donde se removió mayor cantidad de Na, lo que produjo la disminución en la sodicidad del suelo. El siguiente tratamiento con el mejor efecto fue el tratamiento biológico (*Leptochloa fusca*) con disminución en salinidad y sodicidad, siendo más eficiente en la remoción del Na durante el verano.

Lazovich, Costa y Godz (1985) emplearon el horizonte A de un Natracuol típico, para un ensayo en invernáculo con enmiendas de yeso, azufre (S) y carbonato de calcio (CaCO_3). Las dosis fueron aplicadas según el requerimiento para desplazar el Na intercambiable. El yeso fue la enmienda con más eficiencia al desplazar el Na intercambiable y disminuir el pH, aunque en la mayor dosis fue desplazado también el magnesio (Mg). La mezcla de S y CaCO_3 produjo efectos positivos y sin desplazamiento de Mg, pero con aumento en el pH.

En Uruguay, los suelos con exceso en Na han sido poco estudiados. Una de las pocas investigaciones fue la de Polak (2011), donde el autor aplicó dosis diferenciales de yeso según las necesidades del suelo. Luego de seis meses de aplicado el yeso, en los primeros 20 cm del perfil observó una disminución del 77 % en el Na intercambiable, con la tendencia a disminuir el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Una complicación adicional es que la mayoría de la bibliografía internacional sobre suelos sódicos está referida a regiones áridas o

semiáridas, con suelos mayoritariamente de origen antrópico. En cambio, Uruguay se encuentra en una región húmeda y templada con suelos de alta concentración de Na de origen pedogenético.

Una solución para los suelos con problemas con exceso de Na en el complejo de intercambio podría estar basada en la aplicación de yeso. El objetivo de este trabajo fue evaluar, mediante microlisímetros, el efecto de la aplicación de yeso agrícola en los primeros 15 cm del perfil de un suelo con una alta concentración de Na, bajo condiciones de humedad y temperatura controladas.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Lugar de muestreo

Para realizar esta investigación fueron tomados aproximadamente 30 kg del horizonte Ap de un suelo con alta concentración de Na intercambiable ubicado dentro del campo de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (Paysandú, Uruguay).

El punto de muestreo (32° 22' 38'' S 58° 2' 52'' W) corresponde a la unidad San Manuel de la carta 1:1 000 000, donde predominan los Brunosoles Éutricos Típicos y Lúvicos, con suelos asociados como Solonetz Aérico con horizonte A muy delgado, ócrico (Durán y García, 2007).

La caracterización de las propiedades físico – químicas de este suelo se presenta en el Cuadro 1, donde se promediaron los valores para cada variable analizada por triplicado.

Cuadro 1. Caracterización de las propiedades físico – químicas del horizonte

Ap del suelo seleccionado para el estudio.

Parámetro	Promedio [♦]	Unidades	Metodología
pH - Agua	6,23 ± 0,01	-	Potenciometría (1:2,5 en agua)
CE [•]	0,31 ± 0,00	dS m ⁻¹	Potenciometría (1:1 en agua)
K	0,70 ± 0,03	cmol kg ⁻¹	Acetato de Amonio – pH 7
Mg	1,54 ± 0,07	cmol kg ⁻¹	Acetato de Amonio – pH 7
Ca	7,24 ± 0,35	cmol kg ⁻¹	Acetato de Amonio – pH 7
Na	1,53 ± 0,01	cmol kg ⁻¹	Acetato de Amonio – pH 7
P	6 ± 0,15	mg kg ⁻¹	Bray - 1
MO	2,46 ± 0,06	%	Walkley - Black
Arena	41	%	Bouyoucos
Limo	44	%	Bouyoucos
Arcilla	15	%	Bouyoucos
PSI ^A	14	%	$PSI = \frac{[Na^+]}{[Na^+] + [Ca^{+2}] + [Mg^{+2}] + [K^+]}$

[♦] Promedio del análisis por triplicado de la muestra de suelo

^A Porcentaje de Na intercambiable

[•] Conductividad eléctrica

2.4.2. Elaboración de los microlisímetros

Para la elaboración de los microlisímetros se emplearon botellas de plástico de polipropileno de 30 cm de alto. A éstas se les cortó la base a 10 cm de altura, para ser empleada como recolector del lixiviado. La pérdida de suelo por gravedad fue evitada con el empleo de fibra de vidrio (guata), que fue colocada cubriendo el hombro y cuello de las botellas. El suelo se introdujo por la parte superior de la botella invertida que quedó descubierta

luego de cortar la base de las botellas, donde posteriormente se le agregó agua desionizada para hacer las lixiviaciones (Figura 1).

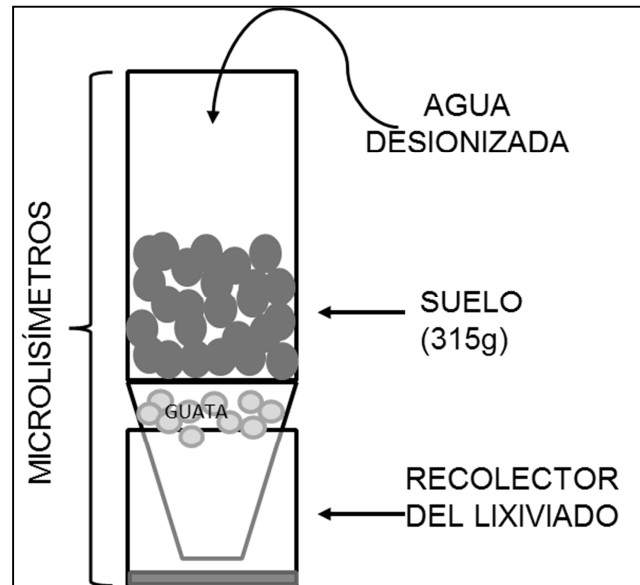


Figura 1. Esquema detallado del ensamblaje de los microlisímetros, la ubicación del suelo y la recolección del lixiviado mediante la aplicación de agua desionizada.

2.4.3. Tratamientos aplicados

En cada microlisímetro se agregaron 315 g del suelo sin tamizar ni secar. El suelo fue mezclado con dos dosis de 1,5 y 3 g (equivalentes a 3 y 6 Mg ha^{-1}) de dos yesos agrícolas comerciales (Fuente A, yeso molido con impurezas; y Fuente B, yeso peleteado) y se dejó un tratamiento testigo (sin yeso). Cada uno de los tratamientos fue realizado con tres repeticiones. El número total de microlisímetros fue de 45, con la finalidad de realizar muestreos destructivos de suelo a los 90, 180 y 360 días, después de la aplicación del yeso.

Mediante el uso de un difusor se realizaron lixiviados periódicos, donde se agregaron de forma paulatina y homogénea 100 ml de agua desionizada cada 15 días, equivalente a 12,7 mm de lluvia.

Después de la lixiviación se tomaba el peso de cada microlisímetro. Para mantener el suelo a capacidad de campo, cada 15 días se realizaba un nuevo pesado, y la diferencia en el peso era completada con el agregado del agua desionizada necesaria.

2.4.4. Procesamiento y análisis de las muestras

Las muestras de suelo se secaron en estufa a 40 °C y se molieron hasta un tamaño < 2 mm. En cada muestreo se determinó la concentración de bases intercambiables a partir de la extracción con acetato de amonio 1N a pH 7, empleando un Espectrómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer 3300 (Ca y Mg por absorción atómica; y Na y K por emisión atómica). A partir de estos datos, se calculó el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), el cual es un factor que permite mostrar el contenido de Na en los suelos, en relación con el contenido de bases presentes.

El líquido lixiviado de los microlisímetros fue recogido y filtrado. Para estandarizar el volumen, todas las muestras fueron evaporadas en plancha hasta alcanzar los 20 mL. En el agua lixiviada se determinó el Na a través de emisión atómica usando un Perkin Elmer 3300.

2.4.5. Análisis estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Los factores fijos fueron: (a) las dosis (0; 3 y 6 Mg ha⁻¹), y

(b) las dos fuentes comerciales de yeso agrícola (Fuente A, yeso molido con impurezas; y Fuente B, yeso peleteado).

Para la evaluación estadística se empleó el programa estadístico Rstudio, Se realizó análisis de varianza (ANOVA) y comparación de las medias de los tratamientos (dosis x fuente) con la prueba de Tukey. El índice de correlación empleado fue el índice de Pearson.

2.5. RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra cómo varió en las distintas fechas de muestreo la concentración de Na y Ca intercambiable en el suelo. En cada muestreo destructivo, se determinaron diferencias estadísticas significativas entre el suelo testigo (sin yeso) y los suelos con la aplicación de yeso.

Al final del experimento, como efecto del tiempo, se observó una tendencia de disminución en la concentración de Na intercambiable en las muestras con yeso y, en menor proporción, en las muestras testigo. Paralelamente, se observó un aumento de la concentración de Ca intercambiable sólo en los suelos en que se había aplicado el yeso.

En la Figura 3 se muestra la concentración de Na intercambiable al final del experimento (a los 360 días). No se encontraron diferencias significativas entre las dosis aplicadas ni entre los yesos agrícolas, pero sí entre los tratamientos con yeso y el testigo (22% menos de Na intercambiable en los suelos con yeso en promedio en comparación con el testigo).

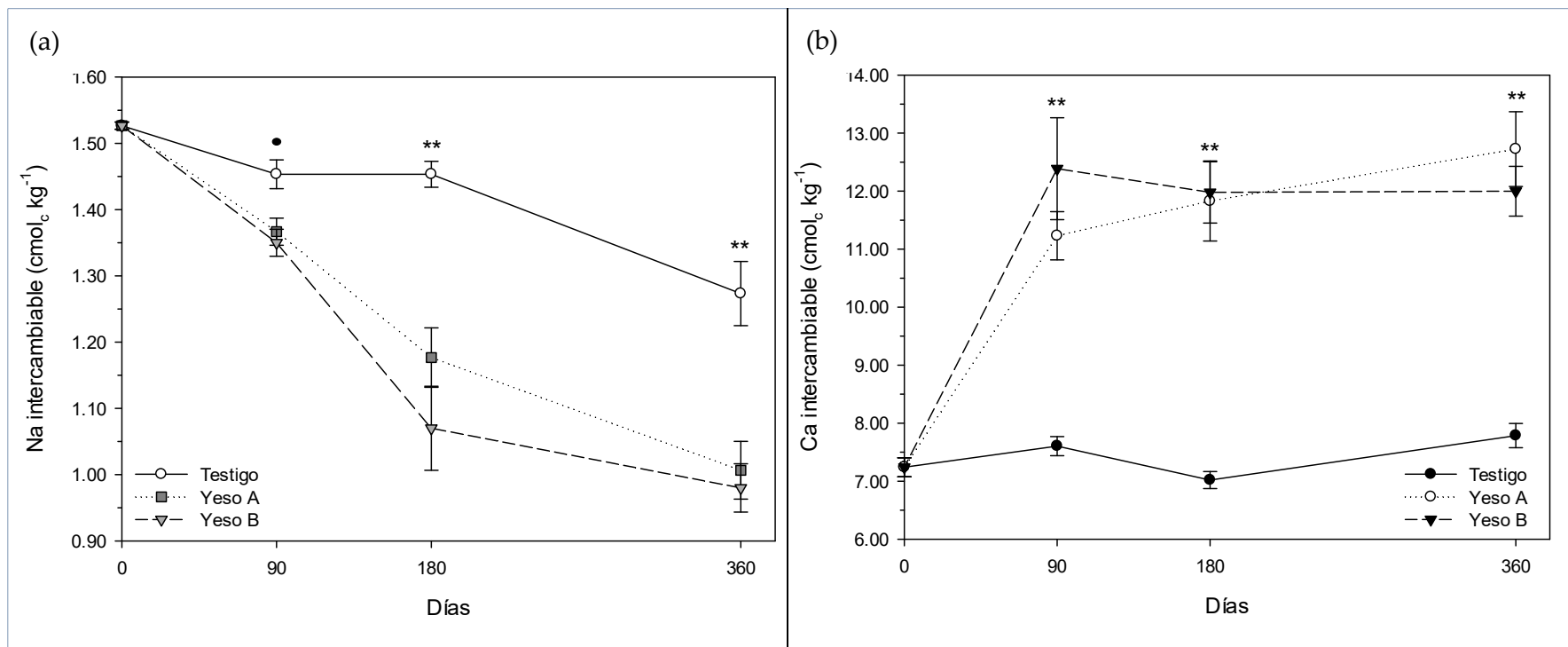


Figura 2. Evolución de la concentración de (a) Na intercambiable y (b) Ca intercambiable, ambos en función del tiempo. Los tratamientos: promedio de las dosis con la fuente de yeso A, promedio de las dosis con la fuente de yeso B y testigo (sin yeso) • $P < 0,10$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

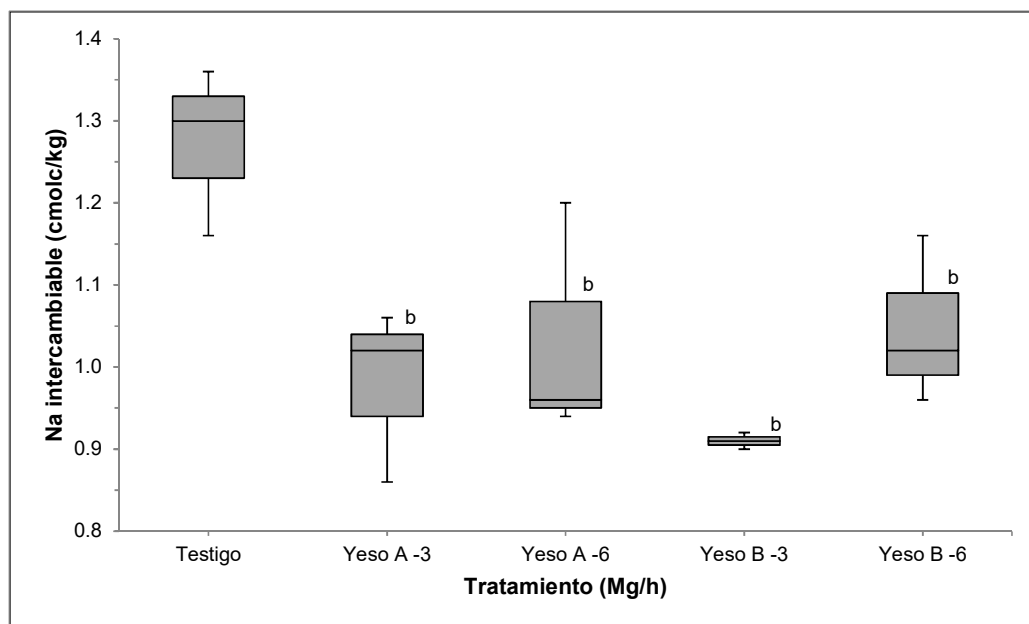


Figura 3. Concentración de Na intercambiable en el suelo de los microlisímetros, luego de 360 días de aplicado el yeso. Tratamientos: Testigo (sin yeso), dosis equivalentes del Yeso A y dosis equivalentes del Yeso B. Las líneas finas representan las medianas del grupo y las líneas gruesas representan las medias del grupo. Letras diferentes (a y b) significan diferencia significativa (test Tukey para medias a $P < 0,10$).

Los valores de Na intercambiable y de PSI en cada fecha de muestreo de los suelos se presentan en el Cuadro 2. En promedio se determinó una disminución de 35% en el Na intercambiable y de 53% en el PSI en los suelos tratados con yeso al compararlo con el suelo inicial (antes de aplicar los tratamientos).

El mayor desplazamiento medido como contenido de Na en el lixiviado se observó durante las primeras lixiviaciones (Figura 4). Hay una relación entre las variables planteadas, de donde se establece un modelo

logarítmico que permite estimar el desplazamiento del Na en función del tiempo, después de la aplicación del yeso.

Cuadro 2. Concentración de Na intercambiable y Porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en el suelo de los microlisímetros con el tratamiento de yeso, sin distinción entre dosis ni tipos de yesos (excluyendo al testigo – sin yeso). Letras diferentes (a, b o c) significan diferencia significativa (test Tukey para medias a $P < 0,05$).

Días después de la aplicación	Na (cmol _c kg ⁻¹)	PSI (%)
0	1,53a ± 0,28	14a ± 0,3
90	1,36a ± 0,05	9b ± 1,1
180	1,12b ± 0,15	7c ± 1,1
360	0,99c ± 0,10	6c ± 0,7

La Figura 5 muestra la relación lineal del contenido de Na en el agua lixiviada con (a) Na y (b) Ca intercambiable del suelo, después de 360 días de la aplicación del yeso. Para la Figura 5a, se determinó una correlación lineal y negativa (índice de Pearson 0,87) entre el total del contenido de Na lixiviado y el Na intercambiable; mientras que para la Figura 5b, se determinó una correlación lineal y positiva (índice de Pearson 0,74) entre el total del Na lixiviado y el Ca intercambiable.

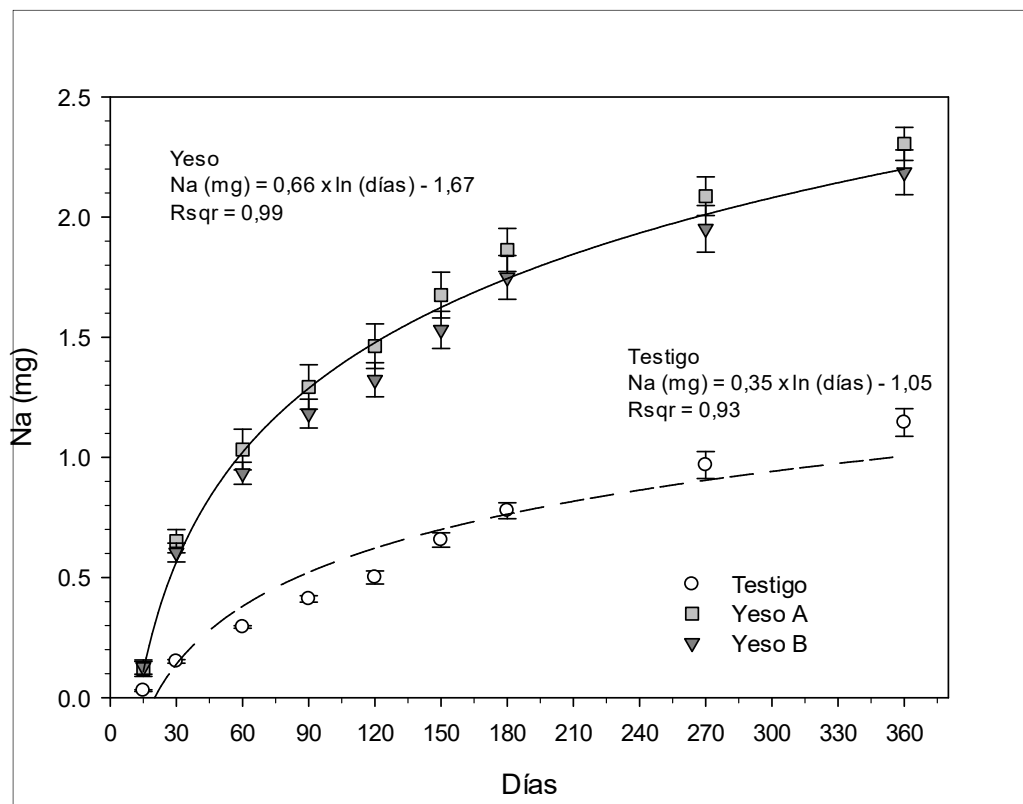


Figura 4. Contenido de Na acumulado en el agua lixiviada, según el yeso empleado y el testigo (sin yeso), en función del tiempo.

2.6. DISCUSIÓN

Son variados los trabajos donde se muestra la eficiencia del yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) como enmienda para disminuir el contenido de Na intercambiable en los suelos. Un ejemplo es Lazovich, Costa y Godz (1985), quienes obtuvieron resultados similares a este trabajo al observar la disminución del Na intercambiable donde se aplicó yeso sobre un suelo Natracuol típico, al hacer percolaciones periódicas en macetas en invernáculo.

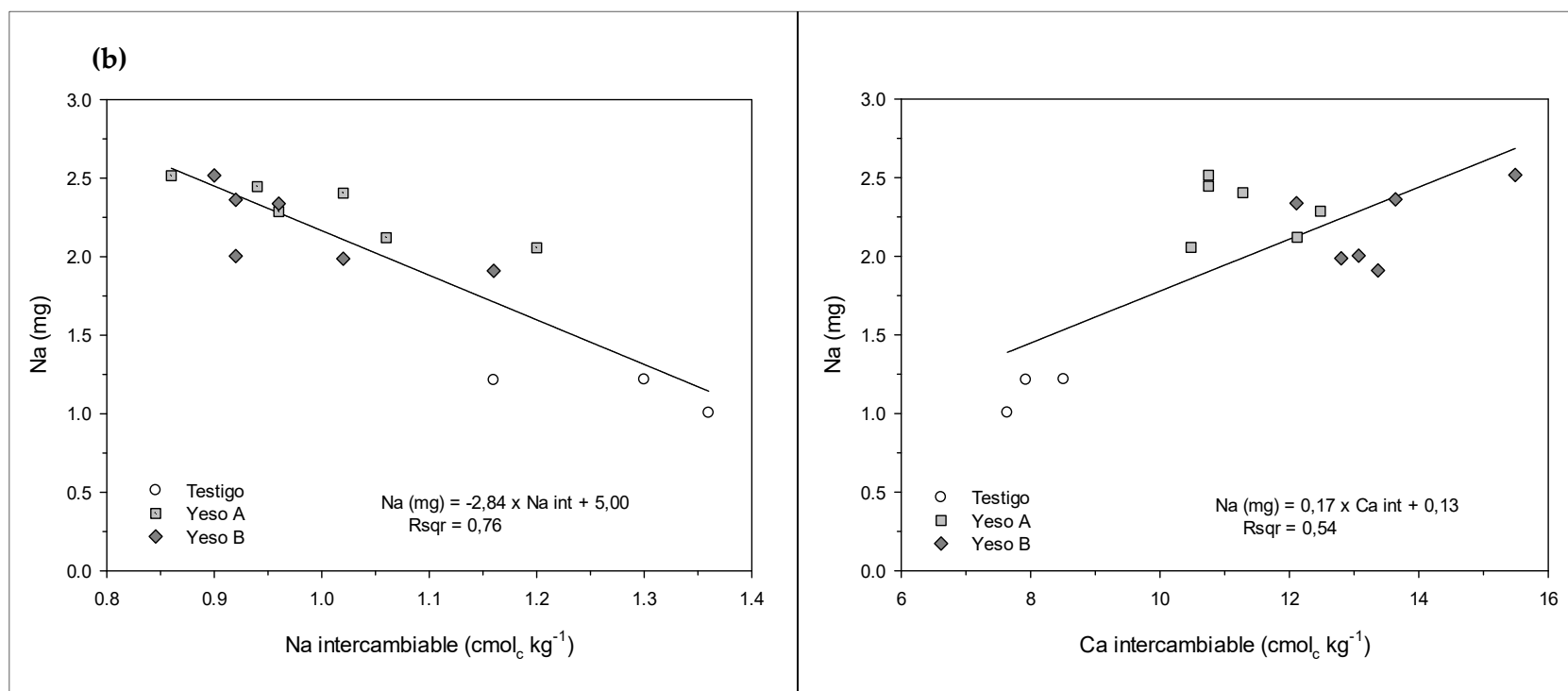


Figura 5. Relación entre la cantidad total de Na desplazado en el agua lixiviada con (a) la concentración de Na intercambiable y (b) la concentración de Ca intercambiable en el suelo. En ambos casos, luego de 360 días de la aplicación de los yesos. Tratamientos: fuente de yeso A, fuente de yeso B, y testigo (sin yeso).

Diversos estudios han demostrado el efecto de las distintas dosis de yeso sobre el desplazamiento del ion Na en el suelo (Costa y Godz, 1999; Rasouli, Pouya y Karimian, 2013). Sin embargo, en este trabajo no fue evidente el efecto de las dosis. Esto puede deberse a que la diferencia entre la efectividad de las dosis altas o bajas es dependiente de la concentración inicial de Na intercambiable, de las características físicas del suelo y del origen del mismo.

Para un suelo, como el empleado en el presente estudio, que contiene aproximadamente $1,50 \text{ cmolc kg}^{-1}$ de Na intercambiable en los 20 cm del perfil, se calcula que es necesaria una dosis de alrededor de 3 Mg ha^{-1} de yeso comercial para desplazar el Na, asumiendo una densidad aparente de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$. En este trabajo se emplearon dos dosis (3 y 6 Mg ha^{-1}) de yeso agrícola comercial, una dosis baja que corresponde a la necesaria para desplazar el Na presente en este suelo, y una dosis alta, que sobrestimó la dosis necesaria para la aplicar la enmienda. En teoría no sería esperable que existieran diferencias en los resultados por las dosis, que corresponde con los resultados obtenidos.

Producto de la disolución del yeso, se produce la saturación de los sitios de intercambio en los coloides del suelo que aumenta la concentración del Ca intercambiable (Chaganti, Crohn y Šimůnek, 2015). Chi *et al.* (2012) explica la remoción del Na y el aumento del Ca en el suelo por el mecanismo de “dilución de la valencia”. La adición del agua altera el equilibrio favoreciendo la adsorción de los cationes divalentes, como el Ca, a costa de los cationes monovalentes tales como el Na.

Por otro lado, se observa la disminución en el contenido del Na intercambiable en los suelos testigo (sin yeso), aunque en menor proporción

que aquellas muestras con el tratamiento de yeso. Dicha disminución puede ser asociada a un efecto de lavado como resultado de la adición de agua desionizada para los eventos de lixiviación. El Na es un elemento cuyo ion en el suelo está muy poco retenido por los coloides y por tanto es fácilmente lavable en forma natural (Imbellone, Giménez y Panigatti, 2010), como sales de cloruro o de sulfatos.

El mayor desplazamiento del ion Na en el complejo de intercambio del suelo ocurre en los primeros ciclos del lixiviado (Lazovich, Costa y Godz, 1985). Los resultados de Qadir, Quareshi y Ahmad (1996) concuerdan con los obtenidos en este trabajo, donde la mayor pérdida de Na ocurre durante las primeras lixiviaciones y proponen que la disminución del efecto en el tiempo se debe a que el reservorio de Ca para desplazar el Na va disminuyendo.

A pesar de que el yeso es un material soluble, el efecto de la aplicación sobre las propiedades físico-químicas en el suelo es a largo plazo. La mayor disminución en la concentración de Na y del PSI se ha observado en otros trabajos donde los suelos estuvieron bajo tratamiento durante un periodo más prolongado que el que comprende el presente estudio. Esto se debe principalmente a que el intercambio del Ca por el Na es un proceso complejo y continuo, por lo que la efectividad del yeso está directamente relacionada con el tiempo de experimentación (Arévalo *et al.*, 2009; Khan *et al.*, 2010; Mao *et al.*, 2016).

Las correlaciones observadas entre el contenido de Na en el agua lixiviada con Ca y Na intercambiables, demuestran la efectividad del yeso en desplazar el ion Na del complejo de intercambio. La disminución en el valor del PSI es producto de que el Na fue sustituido efectivamente por el Ca en el complejo de intercambio.

El lavado continuo y el tiempo son factores esenciales para aumentar la eficacia de la sustitución del Na por Ca. Es probable que, con las dosis de yeso aplicadas, se hubiese logrado mayor disminución en el PSI con lixiviaciones más frecuentes y durante un tiempo mayor de experimentación, con el fin de obtener la máxima disolución del yeso (Hussain *et al.*, 2000; Armstrong, Eagle y Flood, 2015)

La efectividad de los tipos de yeso empleados fue similar a pesar de que ambos tienen distinto procesamiento. El yeso A es un material molido con impurezas, mientras que el yeso B se presenta como peleteado. Este comportamiento parecido, permite inferir que la solubilidad para ambos tipos de yeso puede ser equiparable mientras tengan igual humedecimiento. En el campo se tienen condiciones variables de temperatura y humedad que podrían generar variabilidad en el efecto de los yesos sobre los suelos con alta concentración de Na.

2.7. CONCLUSIONES

Los dos tipos de yesos agrícolas empleados fueron efectivos para desplazar el ion Na del complejo de intercambio y sustituirlo por Ca en un suelo con alta concentración de Na, de origen genético.

Es necesario complementar los resultados obtenidos en el laboratorio con estudios a campo, bajo condiciones edafológicas y climáticas de Uruguay, para desarrollar una recomendación de aplicación de yeso en la recuperación de suelos con alta concentración de Na intercambiable.

2.8. REFERENCIAS

Arévalo E, Bonadeo E, Lara F, Amengual C, Cerruti A, Milan C. 2009. Aplicación de calcio y magnesio sobre la producción de alfalfa en suelos “manchoneados” del centro de Córdoba. Argentina: Agromercado: cuadernillo clásico de forrajeras 149, 16 – 17.

Armstrong RD, Eagle C, Flood R. 2015. Improving grain yields on a sodic clay soil in a temperate medium – rainfall cropping environment. *Crop & Pasture Science*, 66: 492 – 505.

Black CA. 1975. Salinidad y exceso de sodio. En: *Relaciones Suelo – Planta*. Tomo I. Nueva York: Editorial Hemisferio Sur. pp. 391 – 440.

Chaganti VN, Crohn D, Šimůnek J. 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline – sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158: 255 – 265.

Chebataroff J. 1973. *Ambientes Salinos; su vegetación, Problemas de utilización*. Montevideo: Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades y Ciencias. Nro 5.

Chi CM, Zhao CW, Sun XJ, Wang ZC. 2012. Reclamation of saline – sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza Sativa L.*) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. *Geoderma*. 187 – 188: 24 – 30.

Chinnusamy V, Jagendorf A, Zhu JK. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, 45 (2): 437 – 448.

Costa JL, Godz P. 1999. Aplicación de yeso a un natracuol del sudeste de la pampa deprimida. *Ciencia del Suelo*, 17 (2): 21 – 27.

Durán A, García F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Volumen I. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. pp. 333.

Durán A. 1991. Los Suelos del Uruguay. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. pp. 398.

Evangelou VP. 1998. The chemistry and management of salt – affected soils and brackish waters. En: *Environmental Soil and Water Chemistry. Principles and Applications*. Nueva York: Editorial Wiley. pp. 407 – 425.

Hussain N, Niazi BH, Salim M, Nasim A. 2000. Reclamation of sodic soils: horizontal flushing at different time intervals after application of gypsum. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2 (1 – 2): 83 – 85.

Imbellone PA, Giménez JE, Panigatti JL. 2010. Capítulo 6: Procesos de sodificación y salinización. En: *Suelos de la Región Pampeana: Procesos de formación*. Buenos Aires: Ediciones INTA. pp. 261 – 285.

Khan JM, Jan MT, Khan AU, Arif M, Shafi M. 2010. Management of saline sodic soils through cultural practices and gypsum. *Pakistan Journal of Botany*, 42 (6): 4143 – 4155.

Lazovich M, Costa JL, Godz P. 1985. Efecto de enmiendas y lavado sobre el desplazamiento catiónico y producción de materia seca de un Natracuol, en invernáculo. *Ciencia del suelo*, 3 (1 – 2): 95 – 101.

Luo J, Wang L, Li Q, Zhang Q, He B, Wang Y, Qin L, Li S. 2015. Improvement of hard saline – sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS). *Soil and Research*, 149: 12-20.

Makoi J y Verplancke H. 2010. Effect of gypsum placement on the physical chemical properties of a saline sandy loam soil. *Australian Journal of Crop Science*, 4: 556-563.

Mao Y, Li X, Dick AW, Chen L. 2016. Remediation of saline – sodic soil with flue gas desulfuration gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China. *Journal of Environmental Sciences*, 45: 224 – 232.

Polak G. 2011. Agricultura de precisión para la corrección de ambientes con elevado valor de sodio intercambiable. Tesis Especialista Fertilidad de Suelos y Fertilización. Buenos Aires: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 45.

Qadir R, Quareshi N, Ahmad N. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma*, 74: 207-217.

Rengasamy P, Olsson KA. 1991. Sodicty and soil structure. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 935 – 952.

Rasouli F, Pouya K, Karimian N. 2013. Wheat yield and physico – chemical properties of a sodic soil from semi – arid area of Iran as affected by applied gypsum. *Geoderma*, 193 – 194: 246 – 255.

Tirado R, Slater BK, Dick WA, Bigham J, McCoy E. 2013. Hydrologic properties and leachate nutrient responses of soil columns collected from gypsum – treated fields. *Soil and Tillage Research*, 134: 232-240.

Upadhyay A, Tripathi S, Pandey SN. 2012. Effects of soil sodicty on growth, nutrients uptake and bio-chemical responses of *Ammi majus* L. *Research Journal of Soil Biology*, 4 (3): 69 – 80.

Wu H. 2018. Plant salt tolerance and Na⁺ sensing and transport. *The Crop Journal*, 6 (3): 215 – 225.

3. YESO AGRÍCOLA APLICADO EN SUELOS CON ALTA CONCENTRACIÓN DE SODIO: ESTUDIO EN CAMPO

3.1. RESUMEN

En Uruguay se encuentran suelos que permanecen improductivos debido a la alta concentración de iones sodio (Na) en el complejo de intercambio. La alternativa más común para corregir el exceso de Na es la aplicación de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), porque los iones Na son desplazados por iones calcio (Ca). El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del agregado de yeso agrícola en superficie sobre un suelo con alta concentración de Na, bajo condiciones de producción de pasturas en Uruguay. Se aplicaron tres dosis (1, 2 y 3 Mg ha^{-1} más un tratamiento testigo - sin yeso -) de dos yesos agrícolas comerciales. La aplicación fue realizada en forma manual, sobre una pastura implantada de *Festuca arundinacea*. Luego de 420 días de aplicados los tratamientos, se observó que disminuyó el Na y paralelamente aumentó el Ca en los primeros 20 cm del perfil. También una tendencia a la disminución del pH, aumento de la humedad y mayor facilidad en la penetración del suelo. La pastura que recibió yeso rindió un 50 % más que la pastura testigo y presentó una menor absorción de Na. No se observaron diferencias entre los tipos de yesos aplicados ni las dosis. Se concluye que el yeso agrícola fue efectivo para disminuir el Na intercambiable en la profundidad de suelo estudiada, aumentar el rendimiento y mejorar la calidad de la pastura. Para realizar una recomendación a nivel comercial es necesario continuar la investigación a todo lo largo del perfil, con un estudio de largo plazo que implique la eliminación del Na del sistema.

Palabras claves: sódico, sulfato de calcio, pastura

3.2. SUMMARY

In Uruguay there are soils that remain unproductive due to the high concentration of sodium ions (Na) in the exchange complex. The most common alternative to correct excess Na is the application of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), because Na ions are displaced by calcium ions (Ca). The objective of this work was to study the effect of broadcast application of agricultural gypsum on the surface on a soil with a high concentration of Na, under conditions of pasture production in Uruguay. Three doses (1, 2 and 3 Mg ha^{-1} plus a control treatment - without gypsum -) of two commercial agricultural gypsum sources were applied. The application was made manually, on an implanted pasture of *Festuca arundinacea*. The first 20 cm of soil profile, after 420 days of treatment applications, had a decrease in exchangeable Na and an increase in exchangeable Ca. There was also a tendency to a lower the pH, higher soil moisture and a lower in the penetration resistance. The pasture that received gypsum yielded 50% more than the control pasture and had a lower absorption of Na. No differences were observed between the types of gypsums sources applied or the doses. It was concluded that the agricultural gypsum was effective to diminish the exchangeable Na in the depth of soil studied, to increase the yield and to improve the quality of the pasture. To develop a commercial recommendation, it is necessary to continue the research throughout the profile, with a long-term study that involves the elimination of Na from the system.

Keywords: sodic, calcium sulfate, pasture

3.3. INTRODUCCIÓN

Los altos contenidos de sales solubles en los suelos, en especial las sales de sodio (Na), afectan el crecimiento de la mayoría de los cultivos. Un exceso de iones Na en el complejo de intercambio produce dispersión de los coloides y pérdida de la macroporosidad, lo que dificulta la exploración de las raíces. Adicionalmente, este exceso de Na también se considera tóxico porque puede afectar el metabolismo de la planta (Black, 1975; Evangelou, 1998; Imbellone, Giménez y Panigatti, 2010; Provin y Pitt, 2012).

Para mejorar las propiedades de estos suelos, es necesario eliminar el exceso de Na y reemplazarlo por un ion que induzca la floculación de los coloides de suelo y mejore el estado de agregación de los mismos. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), como fuente de iones calcio (Ca), es la enmienda comúnmente empleada para dicha recuperación porque el Ca desplaza al Na del complejo de intercambio y promueve la formación de los agregados (Sahin y Anapali, 2005; Brady y Weil, 2008).

La gran mayoría de las investigaciones internacionales sobre la mejora de los suelos sódicos están realizadas en regiones áridas o semiáridas y sobre suelos principalmente generados por actividades antrópicas, donde la mayor concentración de Na intercambiable se observa en los estratos más superficiales.

Esto difiere con la situación de los suelos de Uruguay, una región húmeda y templada, donde los suelos con exceso de Na son de origen pedogenético y la concentración de Na intercambiable aumenta con la profundidad en el perfil

Si bien no ha sido estimada la superficie total que ocupan, en el país es común encontrar suelos con altos niveles de Na que se presentan como

suelos asociados no predominantes, ocupando zonas irregulares y reducidas. Las zonas donde se encuentran resultan improductivas, lo cual conlleva a la disminución del área aprovechable para los cultivos (Chebataroff, 1973; Durán y García, 2007).

La información disponible a nivel nacional sobre la corrección de suelos con problemas de Na es prácticamente nula. Uno de los escasos estudios disponibles, fue el realizado por Polak (2011), quien empleó distintas dosis de yeso según el nivel de Na inicial. Este autor observó que el nivel de Na disminuyó de 1,10 a 0,25 cmolc kg⁻¹ en los primeros 20 cm de profundidad del suelo. Después de seis meses de aplicado el tratamiento, el autor encontró una tendencia hacia la disminución de los valores de pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), pero también una disminución en la concentración de magnesio (Mg) intercambiable, en los primeros 20 cm del perfil del suelo.

El yeso aplicado en los suelos con alta concentración de Na intercambiable aporta iones Ca, que desplazan al Na en exceso y promueven la formación de los agregados que mejoran la estructura. En el presente estudio se planteó como objetivo evaluar en condiciones a campo el efecto de la aplicación de dos fuentes comerciales de yeso sobre un suelo con un nivel de Na alto y su efecto sobre la producción de una pastura implantada.

3.4. MATERIALES Y METODOS

3.4.1. Sitio de estudio

Para realizar este estudio fue seleccionada un área (32° 22' 38'' S 58° 2' 52'' W) ubicada dentro del campo de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la

República (Paysandú, Uruguay). Esta región corresponde a la unidad San Manuel de la carta 1:1 000 000, donde predominan los Brunosoles Éútricos Típicos y Lúvicos, con suelos asociados como Solonetz Aéricos con horizonte A muy delgado, ócrico (Durán y García 2007).

Cuadro 1. Caracterización del perfil del suelo en la zona del ensayo. Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (Paysandú, Uruguay).

Horizonte	Esp (cm)	Arena (2 - 0,05)	Limo (50 - 2)	Arcilla (<2 µm)	pH (H ₂ O)	C. org %	Ca	Mg	K	Na	CIC pH 7,0
A	0 - 9	40,4	29,3	30,3	7,4	0,96	12,4	2,5	1,1	3,6	19,6
AB	9 - 23	27,2	25,4	47,4	7,8	0,98	15,4	3,1	1,2	5,4	25,0
B	23 - 33	26,4	23,5	50,1	7,9	0,77	16,8	3,4	1,1	6,7	28,2
BC	33 - 51	20,3	50,7	29,0	8,3	0,69	17,3	4,2	1,3	9,5	32,2

Dado las características irregulares de los suelos con alto nivel de Na en el país, esta área es parcialmente homogénea a simple vista. En el Cuadro 2 se muestra la caracterización de las propiedades físico – químicas del suelo en el área seleccionada, en tres distintos estratos del perfil.

Según los datos de la Estación Experimental, la lluvia durante el periodo del ensayo fue en promedio 138 mm mensual, un poco por encima del promedio mensual histórico de la estación en los últimos 15 años (125 mm). La Figura 1 muestra la precipitación diaria en el área donde se instalaron las parcelas.

Cuadro 2. Caracterización de las propiedades físico – químicas del suelo en los primeros 20 cm del perfil.

Parámetro químico	Profundidad del suelo (cm)			Metodología
	0 - 5	5 - 15	15 - 20	
pH – agua	6,73 ± 0,06	7,66 ± 0,10	8,13 ± 0,11	1:2,5
pH – KCl	5,52 ± 0,09	6,23 ± 0,09	6,62 ± 0,08	1:2,5
P (ppm)	6,02 ± 1,23	1,43 ± 0,59	1,09 ± 0,33	Bray -1
MO (%)	2,83 ± 0,28	1,93 ± 0,09	1,87 ± 0,09	Walkley-Black
K (cmolc kg ⁻¹)	0,87 ± 0,11	0,84 ± 0,11	0,96 ± 0,11	Acetato de Amonio – pH 7
Mg (cmolc kg ⁻¹)	2,33 ± 0,16	2,73 ± 0,41	3,70 ± 0,13	Acetato de Amonio – pH 7
Ca (cmolc kg ⁻¹)	10,57 ± 0,79	14,78 ± 1,97	19,02 ± 1,56	Acetato de Amonio – pH 7
Na (cmolc kg ⁻¹)	2,30 ± 0,45	3,40 ± 0,57	5,87 ± 0,47	Acetato de Amonio – pH 7
CE* (dS m ⁻¹)	0,381 ± 0,017	0,711 ± 0,140	1,410 ± 0,141	1:1 agua
PSI ^A (%)	14	16	20	$PSI = \frac{[Na^+]}{[Na^+] + [Ca^{+2}] + [Mg^{+2}] + [K^+]}$

* Promedio del análisis por triplicado de la muestra de suelo

♦ Conductividad eléctrica

^A Porcentaje de Na intercambiable

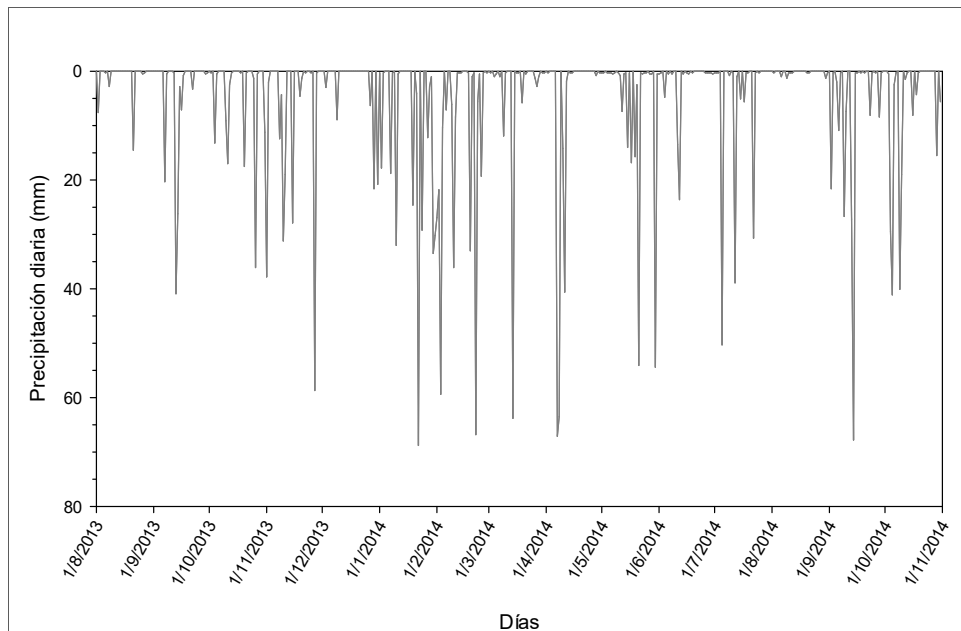


Figura 1. Precipitación diaria durante el periodo en que se realizó el experimento de campo.

3.4.2. Diseño experimental

Se instalaron dos experimentos contiguos, utilizando en ambos, un diseño de bloques completos de parcelas dispuestas al azar, con tres repeticiones. El suelo donde se ubicaron los experimentos, fue delimitado en función de su aparente uniformidad según la vegetación existente.

En un área de 378 m², se instaló el Experimento 1 sobre un suelo con alta concentración de Na intercambiable a fin de evaluar dos tipos de yeso en diferentes dosis, sobre el crecimiento de la pastura y algunas propiedades del suelo. El área total fue dividida en 21 parcelas con una dimensión de 18 m².

Adjunto al Experimento 1, se instaló otro ensayo en un área de 270 m². Para el Experimento 2, se dividió el área en 15 parcelas de 18 m². En este segundo experimento el objetivo fue evaluar la influencia de la enmienda

(tres tipos de yeso y azufre en dosis equivalente a la agregada como yeso) sobre producción de la biomasa aérea de la pastura.

3.4.3. Tratamientos aplicados

Para el Experimento 1 se emplearon dos fuentes comerciales de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) agrícola (Fuente A, yeso molido con impurezas; y Fuente B, yeso peleteado). La enmienda fue aplicada manualmente en superficie y sin incorporar, sobre una pastura implantada de *Festuca arundinacea*, según las dosis indicadas en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Experimento 1. Dosis aplicadas de los yesos agrícolas.

	Fuente	Dosis (Mg ha ⁻¹)
YA1	Yeso A	1
YA2	Yeso A	2
YA3	Yeso A	3
YB1	Yeso B	1
YB2	Yeso B	2
YB3	Yeso B	3
T (Testigo)	0	0

En el Experimento 2 se emplearon tres fuentes de yeso comerciales (Fuente A, yeso molido con impurezas; Fuente B, yeso peleteado; y Fuente C, yeso molido puro) con igual dosis (3 Mg ha⁻¹). Como tratamiento complementario, se empleó una fuente de azufre elemental (S°) puro, con

una dosis equivalente a la del S en el yeso ($0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de S). Se dejó un tratamiento testigo, sin aplicación de enmienda. Igualmente, las enmiendas fueron aplicadas manualmente en superficie y sin incorporar.

3.4.4. Muestreo de suelo y biomasa aérea de la pastura

Previo a la aplicación de los tratamientos, se muestreó el suelo individualmente en cada bloque. Fueron extraídas tres muestras compuestas de cinco tomas cada una, a las profundidades de 0 – 5, 5 – 15 y 15 – 20 cm. El muestreo de suelo en el Experimento 1 se realizó con un calador automático (diámetro aproximado de 3 cm).

Luego de la aplicación, fueron realizados dos muestreos de suelos a los 90 y 420 días. En cada parcela se extrajeron muestras compuestas de suelo de tres tomas cada una, con calador automático, divididas en los estratos de 0 – 5, 5 – 15 y 15 – 20 cm.

La pastura en el Experimento 1 se muestreó a los 210 y a los 420 días luego de aplicados los tratamientos. Con un rectángulo de 24 x 45 cm, en tres repeticiones por parcela, se muestreó la pastura cortando la parte aérea y dejando aproximadamente unos 2,5 cm desde el suelo.

Al final del Experimento 1 (420 días), se midió la penetrabilidad del suelo por parcela empleando un penetrómetro, que permite medir la profundidad de penetración a una presión constante ejercida.

En el Experimento 2, los tratamientos fueron aplicados a los 120 días a posteriori de la instalación del Experimento 1. Después de la aplicación, aproximadamente a los 300 días, la biomasa aérea de la pastura fue muestreada empleando la técnica descrita anteriormente.

El área de los experimentos no fue cercada. Si bien el acceso de los animales a esta zona es limitado, no pudo impedirse el pastoreo. El rendimiento y el resto de las variables son consideradas comparativas entre el testigo y los tratamientos en ambos experimentos.

3.4.5. Procesamiento y análisis de las muestras

Las muestras de suelo fueron secadas en estufa a 40 °C. En el muestreo realizado a los 420 días se determinó la humedad del suelo. Posteriormente, todas las muestras se molieron hasta un tamaño < 2 mm. En cada muestreo se determinó el pH a través de una relación 1:2,5 del suelo con agua y las bases intercambiables a partir de la extracción con acetato de amonio 1N a pH 7.

Las muestras de biomasa aérea de la pastura se secaron a 60 °C, se determinó materia seca (MS) y posteriormente se molieron (< 0,5 mm). La concentración de los cationes (Ca, Magnesio - Mg, Potasio - K, y Na) se determinó a través de la técnica de digestión seca de 1 g de muestra a 550 °C por 5 horas y disolución con ácido clorhídrico. La concentración de S se determinó en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), a través de la detección por infrarrojo del SO₂ generado de la combustión de la muestra a 1350 °C.

Los cationes, tanto en las muestras de suelo como en las de plantas, se determinaron a través de un Espectrómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer 3300 (Ca y Mg, por absorción atómica; y K y Na, por emisión atómica).

A partir de estas determinaciones se calculó rendimiento de materia seca y nutrientes absorbidos.

3.4.6. Análisis estadístico

En ambos experimentos se empleó un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones.

En el Experimento 1, los factores que influyen en las variables determinadas son: (a) las dosis, y (b) las dos fuentes de yeso agrícola (Fuente A y Fuente B). Mientras que en el Experimento 2, los factores que influyen en el rendimiento de la pastura son: (a) las dosis (yeso, azufre y testigo), y (b) las enmiendas empleadas (Fuente Yeso A, Fuente Yeso B, Fuente Yeso C y Fuente Azufre S).

La evaluación estadística se realizó con un análisis de contrastes ortogonales para determinar diferencias entre los tratamientos. Se utilizó el programa estadístico Rstudio.

3.5. RESULTADOS

A los 90 días luego de la aplicación del yeso, en el Experimento 1 se observó que en los primeros 5 cm del perfil el Na intercambiable en las parcelas con yeso era 21 % menor que en las parcelas testigo (sin yeso). A los 420 días, esa diferencia alcanzó el 22 %. La Figura 2a muestra que la diferencia es apreciable tanto en superficie como en profundidad (0 – 20 cm del perfil). No se encontraron diferencias significativas entre dosis, por lo tanto se graficó el valor promediado de las distintas dosis para cada fuente. Tampoco se observaron diferencias significativas entre las fuentes de yeso.

Paralelamente, se observó una mayor concentración de Ca intercambiable en las parcelas con yeso (Figura 2b). A los 5 cm del perfil, se observó que el Ca intercambiable en el primer muestreo (90 días) era 20 % más que en las parcelas testigo.

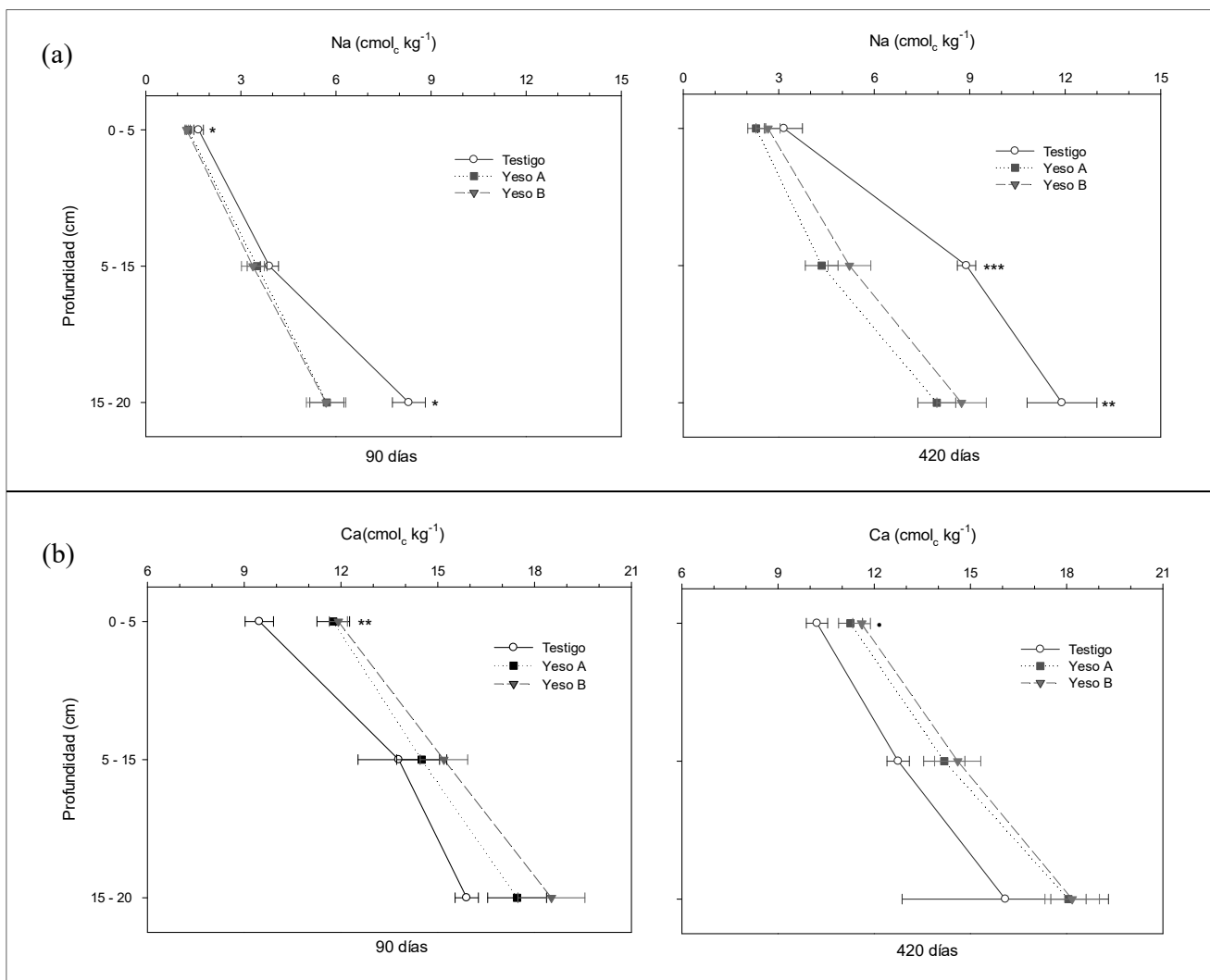


Figura 2.
Concentración en la fase intercambiable de (a) Na y (b) Ca en función de la profundidad en el suelo del Experimento 1 (**P < 0,001; ** P < 0,01; * P < 0,05; • P < 0,10).

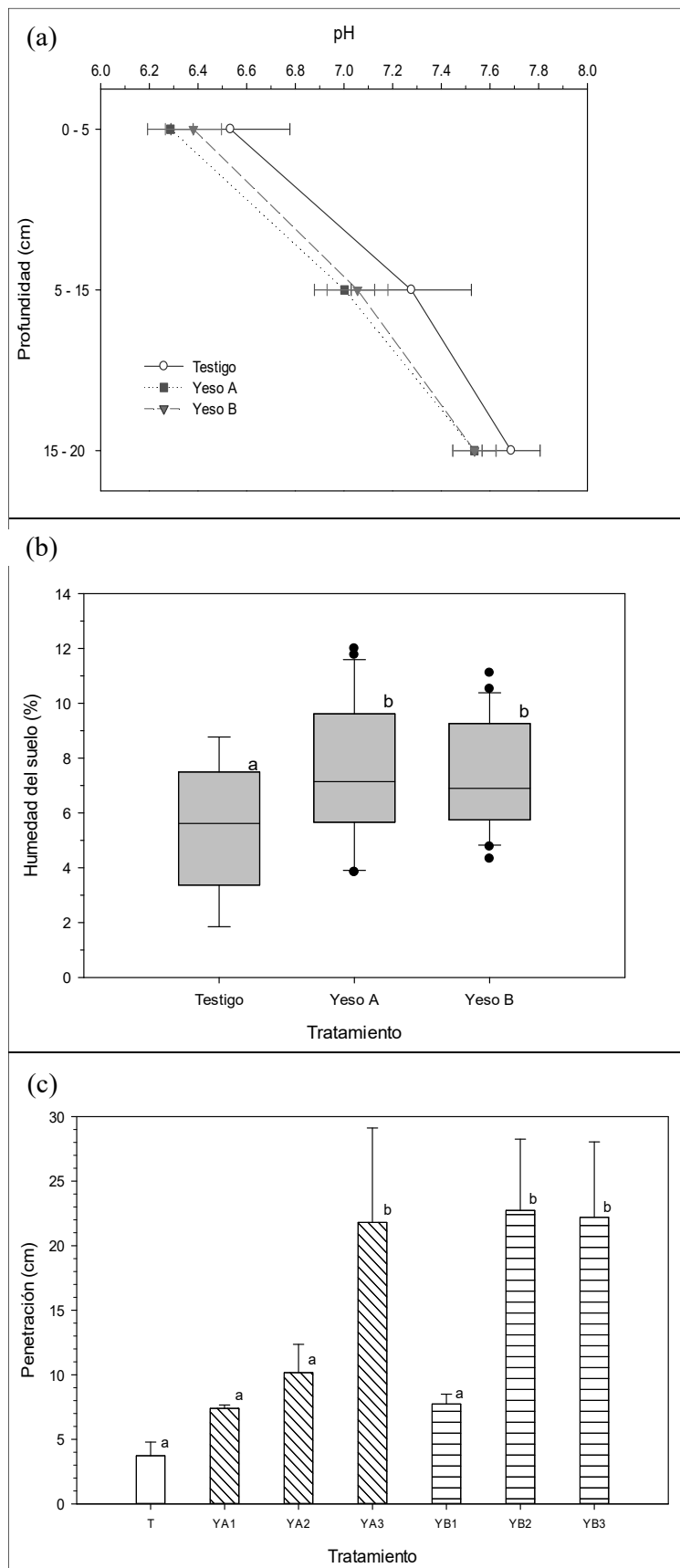


Figura 3.
Resultados del muestreo de suelo al final del Experimento 1 (420 días):

(a) pH (1:2,5).

(b) Humedad del suelo (0 – 20 cm). Cajas con diferentes letras (a o b) significa diferencia significativa de acuerdo al análisis de contrastes ortogonales $P < 0,10$.

(c) Facilidad de penetración en el suelo. Barras con diferentes letras (a o b) significa diferencia significativa de acuerdo al análisis de contrastes ortogonales $P < 0,05$.

En el segundo muestreo (420 días) la diferencia disminuyó a un 10 %. En cuanto al K y Mg intercambiable se observó similar concentración a los 20 cm del perfil del suelo en todas las parcelas.

En la Figura 3a se presenta la variación del pH en la profundidad del perfil como resultado del muestreo al final (420 días) del experimento 1. Existe una tendencia a la disminución del valor del pH en las parcelas con yeso, aunque el efecto no es significativo. Se promediaron los valores por fuente para la gráfica, ya que no se observaron diferencias significativas entre dosis. Comparando tratamientos, tampoco se observó diferencia estadística significativa.

Al final del Experimento 1 (420 días) se evaluó la humedad del suelo, la cual fue mayor en las parcelas con yeso que en las testigo ($P < 0,10$). Se promediaron los valores de las dosis para la Figura 3b porque no se encontraron diferencias significativas.

En las parcelas con mayor cantidad agregada de yeso (YA3 y YB3) se encontró mayor penetrabilidad, luego de los 420 días de la aplicación del tratamiento en el Experimento 1 ($P < 0,05$). Con el Yeso B se encontró una mayor penetrabilidad incluso con la dosis intermedia aplicada (YB2). En lo que respecta a las dosis bajas de ambas fuentes, no difirieron del testigo (Figura 3c).

La pastura de las parcelas con yeso en el experimento 1, rindieron aproximadamente 50% más que la pastura en las parcelas testigo (sin yeso). La Figura 4 muestra el rendimiento del primer muestreo (210 días), así como el acumulado del primer y segundo corte. Se observa una diferencia estadística ($P < 0,05$) que indica mayor rendimiento en el acumulado de la pastura ubicada en las parcelas con yeso agrícola.

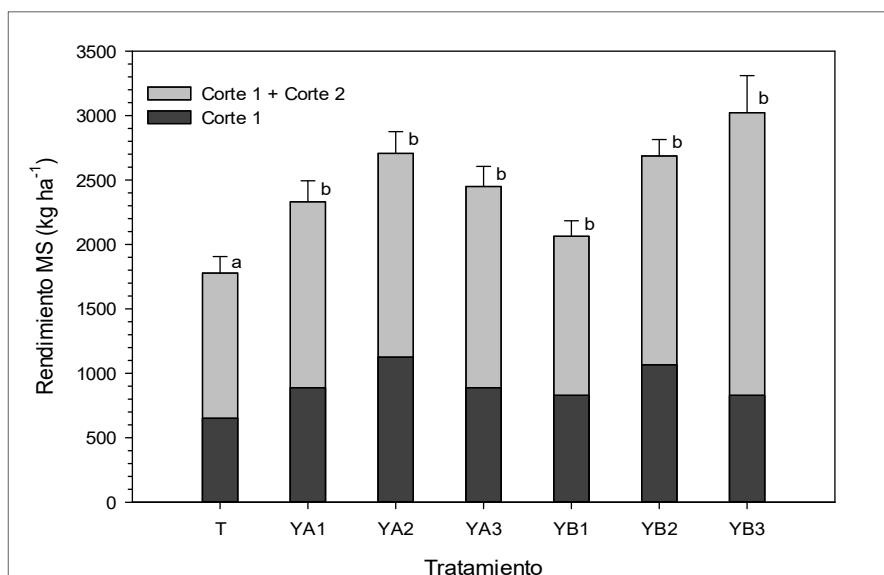


Figura 4. Rendimiento de materia seca en los dos cortes de la pastura. Barras con diferentes letras (a o b) significa diferencia significativa del acumulado según contrastes ortogonales $P < 0,05$.

En el follaje de las parcelas del Experimento 1, se analizó la concentración del Na absorbido (Figura 5). A través de contrastes ortogonales, en el primer corte (210 días) se observó que hay una diferencia significativa entre la pastura del Yeso A y la del Yeso B ($P < 0,05$), con cerca de un 29 % menos de absorción en las parcelas con el Yeso B.

Para el segundo corte (420 días), se encontró que la pastura de las parcelas con tratamiento de yeso (ambas fuentes) presentó un 54% menos de absorción de Na en comparación con la pastura en las parcelas testigo (sin yeso). Se observó una menor absorción de Na en las pasturas que recibieron la dosis YA3, siendo significativa la diferencia en comparación con el testigo a través de contrastes ortogonales ($P < 0,10$).

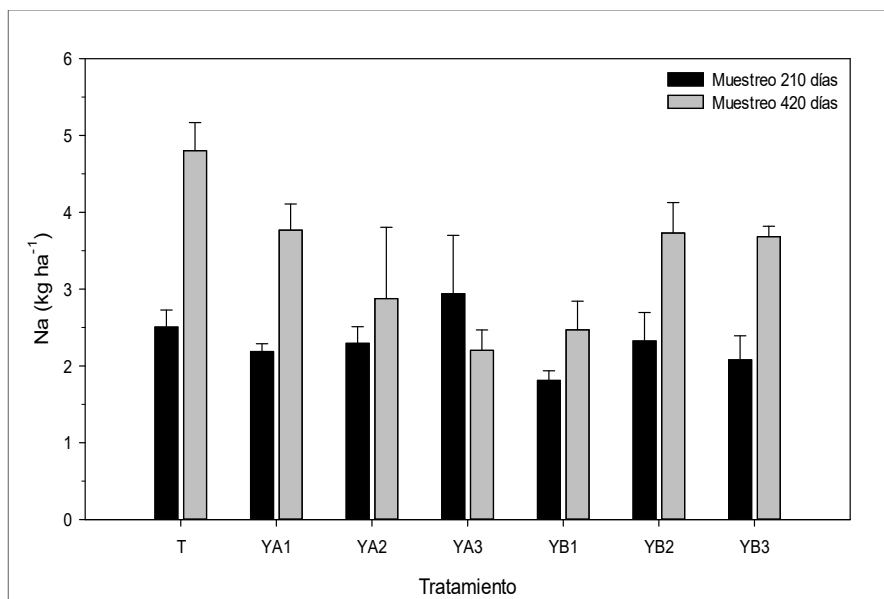


Figura 5. Concentración de Na en el follaje de la pastura en el Experimento 1.

El Cuadro 4 muestra los cationes absorbidos por la pastura. En ambos cortes, la absorción de potasio (K) y magnesio (Mg) por la pastura fue similar para todos los tratamientos.

En tanto, en el primer corte (210 días), en promedio, la pastura de las parcelas con ambos yesos presentaron 36 % mayor absorción de Ca ($P < 0,10$) que las parcelas testigo. Mientras que en el segundo corte (420 días), las parcelas con el Yeso B presentaron 56 % mayor absorción de Ca ($P < 0,10$) que las parcelas testigo (Cuadro 4).

Cuadro 4. Cationes absorbidos por la pastura en el Experimento 1.

Tratamiento	Primer corte (210 días)				Segundo corte (420 días)			
	K	Mg	Ca	Na	K	Mg	Ca	Na
	kg ha ⁻¹							
YA1	12,48a	1,08a	2,46a	2,84a	15,58a	2,40a	8,07a	3,77ab
YA2	13,82a	1,32a	4,42a	2,95a	14,66a	1,85a	7,78a	2,88ab
YA3	14,21a	1,16a	3,32a	2,94a	10,63a	1,65a	6,42a	2,20a
YB1	9,41a	0,90a	3,40a	1,81b	11,09a	1,60a	6,87ab	2,47ab
YB2	12,67a	1,31a	4,63a	2,32b	17,66a	2,46a	10,52ab	3,73ab
YB3	12,39a	0,98a	2,57a	2,08b	19,46a	2,53a	11,88ab	3,68ab
T	11,85a	1,08a	2,22b	2,50ab	11,60a	1,96a	6,24ac	4,80b

Letras (a, b o c) significa diferencia significativa de acuerdo al análisis de contrastes ortogonales $P < 0,05$.

En el Experimento 2 se observó un 6 % más de rendimiento en MS en las parcelas con yeso al compararlas con las parcelas con S (Figura 6). El rendimiento de las parcelas con yeso y S fue 80 % mayor al obtenido en las parcelas testigo ($P < 0,001$).

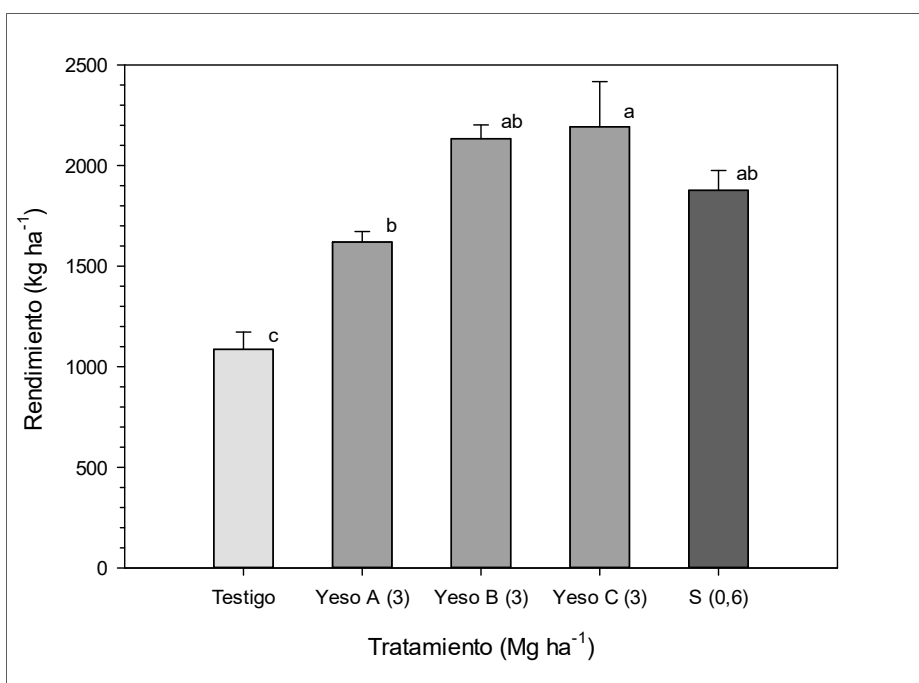


Figura 6. Rendimiento de MS según fuente de yeso y azufre, 300 días luego de la aplicación en el Experimento 2. Barras con diferentes letras (a, b o c) indica diferencia significativa según contrastes ortogonales $P < 0,10$.

La absorción de S se muestra en la Figura 7, donde fue 5 % mayor en las parcelas con yeso que en las parcelas con S, pero sin diferencia significativa. Entre las parcelas testigo y las de yeso y S hay una diferencia de la absorción del 170 % ($P < 0,001$).

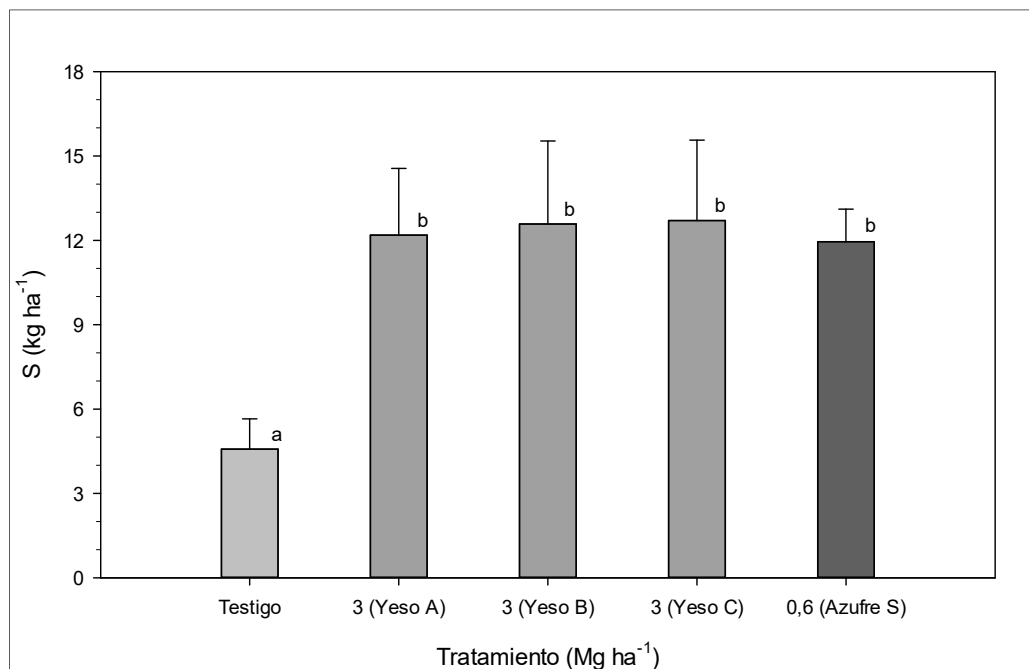


Figura 7. Absorción de S por la pastura según fuente de yeso y azufre, 300 días luego de la aplicación en el Experimento 2. Barras con diferentes letras (a o b) indica diferencia significativa según contrastes ortogonales $P < 0,10$.

3.6. DISCUSIÓN

La aplicación del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) produjo un efecto positivo tanto en el suelo como en la pastura. Esto se refleja en la tendencia a la mejora en algunas propiedades fisicoquímicas del suelo y, por otro lado, en la calidad y el rendimiento de las pasturas que crecieron en las parcelas donde se aplicó la enmienda.

El aumento del Ca intercambiable en el suelo y la disminución del Na intercambiable reflejan la efectividad del yeso para disminuir el exceso del Na y reemplazarlo por el ion divalente. Trabajos como el de Loveday (1976) y Rasouli, Puya y Karimian (2013) presentan resultados similares.

Moreno y Bonadeo (2012) explican que para que se evidencie en el suelo el efecto del agregado de yeso es necesario hacer una evaluación a largo plazo, porque el sistema se desequilibra debido a la adición de la enmienda. Para restablecer el equilibrio basta que transcurra el tiempo (Armstrong, Eagle y Flood, 2015). Coincidentemente en esta investigación se evidencia mayor disminución del Na intercambiable en el segundo muestreo (420 días) al compararlo con el primer muestreo (90 días).

El desequilibrio en el sistema suelo se produce debido a que hay más iones Ca en la solución del suelo, provenientes de la disolución del yeso, que el retenido por los coloides (en el complejo de intercambio). Para alcanzar un nuevo equilibrio, el sistema toma Ca de la solución del suelo y libera Na en su lugar (Khan *et al.*, 2010).

En profundidad, en ambos muestreos, es destacable la diferencia de las concentraciones de Na y Ca intercambiable entre las parcelas con yeso y las parcelas testigos (sin yeso). Estos suelos pueden presentar estructura prismática que ayuda a desplazar los granos de yeso en profundidad.

Los resultados obtenidos, indican que el efecto de reemplazo se mantiene a lo largo de, por lo menos, los primeros 20 cm del perfil (Sharma, 1971; Costa y Godz, 1999). Los resultados reflejan que la sustitución de Na por Ca puede darse también a profundidad a pesar de que la aplicación haya sido en superficie.

A diferencia de los resultados de este trabajo, Longo *et al.* (2005) no observaron disminución en el Na intercambiable, posiblemente por una capa poco permeable que impide el lavado del Na a zonas más profundas del perfil. Dado la presencia de esta capa, Sharma (1971) propone la posibilidad de readsorción de Na. Los suelos estudiados en este ensayo presentan un

horizonte poco permeable por debajo de los 20 cm, que pudo influir para no obtener diferencias entre los tratamientos con yeso, debido a la posible readsorción del Na desplazado.

A partir de la concentración de Na intercambiable en los primeros 5 centímetros del perfil, se calculó que la dosis de yeso para desplazar al Na era de aproximadamente 4,5 Mg ha⁻¹. Las dosis aplicadas fueron bajas, lo que pudo producir una disminución del efecto.

Quintero *et al.* (2006) indicaron que la mayor disminución del Na intercambiable se da en los suelos de las parcelas con las dosis más altas. Sin embargo, en este trabajo fue similar el efecto de las dosis y de las fuentes empleadas. El uso de dosis menores y el tiempo del ensayo, pudieron ser factores influyentes para no ver el efecto de las dosis de yeso sobre el Na del suelo.

El hecho que hubiera una tendencia a la disminución del pH coincide con Rengasamy y Olsson (1991), quienes plantean que dicha disminución es debido a los efectos de fuerzas iónicas que promueven la formación de complejos con el sulfato proveniente del yeso. Para Bonadeo *et al.* (2014) el descenso es observable en los primeros 20 cm del perfil. Quintero *et al.* (2006) determinaron que este efecto del yeso sobre el pH en suelos con exceso de Na es constante en el tiempo, hasta que la reserva de la enmienda se agote.

La diferencia significativa en la humedad del suelo entre las parcelas con yeso y las testigos, es posible asociarla a una mejora de las condiciones estructurales del suelo. Lebron, Suarez y Yoshida (2002) plantean que un aumento en la disponibilidad del agua en los suelos sódicos tratados con yeso, es producto del aumento del Ca intercambiable por el desplazamiento del ion Na ya que la presencia del Ca produce una mejora en la estructura y

la macroporosidad, y esta es la razón por la que aumenta la retención de agua en el suelo.

Este efecto positivo sobre la retención de agua, también es posible asociarlo con los resultados obtenidos en la penetrabilidad del suelo y directamente relacionarlo con una mayor exploración radicular por el aumento del rendimiento de la pastura.

Lo cual es debido a que la mejora en las condiciones estructurales por el aumento en la concentración de Ca intercambiable, produce mayor penetrabilidad, en especial en las dosis altas de cada fuente. Una conclusión sobre la mejora estructural requeriría de un estudio a largo plazo.

La mejora en el rendimiento de la materia seca y en la calidad de las pasturas están asociadas a un aumento en los niveles disponibles de Ca y S en forma de sulfato provenientes de la aplicación del yeso (Arévalo *et al.*, 2009; Rasouli, Puya y Karimian, 2013). Yazdanpanah *et al.* (2013) determinaron a través de un análisis con lisímetros en un suelo salino-sódico, que la adición del yeso, mejora la disponibilidad de otros nutrientes como potasio (K).

La pastura de las parcelas con yeso presenta menor absorción de Na por la disminución del Na disponible en suelo, que se refleja en mayor rendimiento y calidad. Bandera (2013) indica que la poca absorción es producto de la selectividad de las plantas para tomar los nutrientes. La absorción del Ca disponible reduce el Na en la pared celular y mejora el funcionamiento de la membrana plasmática (Chi *et al.*, 2012)

El Na tiene el efecto de ion específico en los tejidos vegetales, ocasionando perturbación en la membrana celular y deficiencia de iones tales como el potasio (Alcaraz, 2012; Martínez *et al.*, 2011).

La presencia del sulfato en el suelo a partir de la disolución del yeso presenta un efecto de fertilizante que podría aumentar el rendimiento en las pasturas. En el Experimento 2 se trató de aislar este efecto, lográndose un aumento en el rendimiento de la pastura con la aplicación de S inferior al logrado con la aplicación de yeso (Longo *et al*, 2005). Por lo tanto, el yeso no actuaría solo como mejorador de las condiciones del suelo; sino que además, aporta el S necesario para mejorar la productividad de las plantas.

Sería necesario complementar con un análisis de los niveles de S del suelo, ya que estos resultados podrían ser condicionados debido a una deficiencia en este elemento.

Una de las dificultades de trabajar en suelos con alta concentración de Na en Uruguay, es que los mismos se presentan como manchones o áreas irregulares. En este estudio fue posible obtener parte de los resultados esperados en un tiempo de aproximadamente 420 días. Sin embargo, la irregularidad del área con exceso de Na dificultó la repetitividad en los puntos de muestreo.

3.7. CONCLUSIONES

Las fuentes de yeso agrícolas empleadas fueron efectivas para el proceso de desplazamiento del exceso del ion Na del complejo de intercambio, produciendo una tendencia a mejorar en varias de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

El aumento en el contenido de la humedad acompañado de la disminución en la resistencia a la penetración, permite concluir que el aporte de Ca por parte del yeso mejora las condiciones de los suelos para los

cultivos. La aplicación de yeso agrícola en las dosis empleadas conlleva a la mejora en el rendimiento y calidad de la pastura implantada.

El aporte de este trabajo es el punto inicial para estudios a largo plazo en áreas con exceso de Na, bajo condiciones edafológicas y climáticas de Uruguay.

3.8. REFERENCIAS

Alcaraz FJ. 2012. Salinidad y Vegetación [En línea]. Consultado 30 abril 2018. Disponible en: <http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema18.pdf>.

Arévalo E, Bonadeo E, Lara F, Amengual C, Cerruti A, Milan C. 2009. Aplicación de calcio y magnesio sobre la producción de alfalfa en suelos “manchoneados” del centro de Córdoba. Argentina: Agromercado: cuadernillo clásico de forrajeras 149, 16 – 17.

Armstrong RD, Eagle C, Flood R. 2015. Improving grain yields on a sodic clay soil in a temperature medium – rainfall cropping environment. *Crop & Pasture Science*, 66: 492 – 505.

Bandera R. 2013. Rehabilitación de suelos salino – sódicos: evaluación de enmiendas y especies forrajeras. Tesis de Magister del Área Recursos Naturales. Buenos Aires: Facultad de Agronomía – Escuela de Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires. pp. 56.

Black CA. 1975. Salinidad y exceso de sodio. En: *Relaciones Suelo – Planta*. Tomo I. Nueva York: Editorial Hemisferio Sur. pp. 391 – 440.

Bonadeo E, Moreno I, Baranda A, Milan C. 2014. Changes in a sodic soil after gypsum application under dryland conditions. *European Scientific Journal*, 10 (27): 367 – 377.

Brady N, Weil R. 2008. Soils of dry regions: alkalinity, salinity, and sodicity. En: The Nature and Properties of Soils. New Jersey: Pearson Prentice Hall. pp. 469 – 510.

Chebataroff J. 1973. Ambientes Salinos; su vegetación, Problemas de utilización. Montevideo: Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades y Ciencias. Nro 5.

Chi CM, Zhao CW, Sun XJ, Wang ZC. 2012. Reclamation of saline – sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. 2012. Geoderma, 187 – 188: 24 – 30.

Costa JL, Godz P. 1999. Aplicación de yeso a un natracuol del sudeste de la pampa deprimida. Ciencia del Suelo, 17 (2): 21 – 27.

Durán A, García F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Volumen I. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. pp. 333.

Evangelou VP. 1998. The chemistry and management of salt – affected soils and brackish waters. En: Environmental Soil and Water Chemistry. Principles and Applications. Nueva York: Editorial Wiley. pp. 407 – 425.

Imbellone PA, Giménez JE, Panigatti JL. 2010. Procesos de sodificación y salinización. En: Suelos de la Región Pampeana: Procesos de formación. Buenos Aires: Ediciones INTA. pp. 261 – 285.

Khan JM, Jan MT, Khan AU, Arif M, Shafi M. 2010. Management of saline sodic soils through cultural practices and gypsum. *Pakistan Journal of Botany*, 42 (6): 4143 – 4155.

Lebron I, Suarez DL, Yoshida T. 2002. Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 92 – 98.

Longo A, Ferratto J, Mondino M, Grasso R. 2005. Incorporación de azufre y yeso en suelo salino – sódico: su efecto sobre el rendimiento y calidad de lechuga bajo invernadero. *Revista FAVE – Ciencias Agrarias*, 4 (1 – 2): 31 -36.

Loveday J. 1976. Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. *Australian Journal of Soil Research*, 14: 361 – 371.

Martínez N, López CV, Basurto M, Pérez R. 2011. Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5 (3): 156 – 161.

Moreno I, Bonadeo E. 2012. Efectos de sodio sobre las propiedades de los suelos – Técnicas de recuperación. En: Zapata MJ (Eds.). *En Boca de Tod@s... Ensayos de la Convocatoria VOX POPULI*. Córdoba, UniRío Editora. pp. 19 – 25.

Polak G. 2011. Agricultura de precisión para la corrección de ambientes con elevado valor de sodio intercambiable. Tesis de Especialista en Fertilidad de Suelos y Fertilización. Buenos Aires: Facultad de Agronomía – Escuela de Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires. pp. 45.

Provin T, Pitt JL. 2012. Managing soil salinity. Texas A & M Agrilife Extensión, E – 60: 3 – 12.

Quintero C, Boschetti N, Durand A, Fettolini S. 2006. Recuperación de suelos dispersivos por medio de enmiendas. Estudio de casos. En: Gonzalez AP (Eds.). Bases para la Conservación de Suelos y Aguas en la Cuenca del Río Paraná. Santa Fé, Universidad de Entre Ríos. pp. 101 – 108.

Rasouli F, Pouya A, Karimi N. 2013. Wheat yield and physico – chemical properties of a sodic soil from semi – arid area of Iran as affected by applied gypsum. 2013. Geoderma. 193 – 194: 246 – 255.

Rengasamy P, Olsson KA. 1991. Sodicty and soil structure. Australian Journal of Soil Research, 29: 935 – 952.

Sahin U, Anapali O. 2005. A laboratory study of effects of water dissolved gypsum application on hydraulic conductivity of saline – sodic soil under intermittent ponding conditions. Irish Journal of Agricultural and Food Research, 44 (2): 297 – 303.

Sharma ML. 1971. Physical and physico – chemical changes in the profile of a sodic soil treated with gypsum. Australian Journal of Soil Research, 9: 73 – 82.

Yazdanpanah N, Pazira E, Neshat A, Mahmoodabadi M, Rodríguez L. 2013. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (II): Impact on nitrogen, phosphorous and potassium redistribution and on microbial respiration. Agricultural Water Management, 120: 39 – 45.

4. DISCUSIÓN GENERAL

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es la enmienda más comúnmente empleada para disminuir la dispersión de los suelos sódicos. Es un material que se encuentra fácilmente disponible y, además, es económico y de fácil aplicación (Zoca y Penn, 2017). Los resultados de este trabajo demuestran que esta enmienda genera efectos benéficos en algunas de las propiedades físicas y químicas del suelo, así como también en la pastura implantada en el área del ensayo.

La solubilidad del yeso en agua es aproximadamente $2,50 \text{ g L}^{-1}$. Esta solubilidad se ve aumentada en suelos sódicos como consecuencia del proceso de desplazamiento del Na por Ca en el complejo de intercambio catiónico de los coloides del suelo (Jury *et al.*, 1979; Ahmad *et al.*, 2006; Chi *et al.*, 2012; Zoca y Penn, 2017). Por lo tanto debe estar acompañado de una temporada de lluvias promedio o un buen humedecimiento, ya que como lo marcan Montaña *et al.* (1985), la solubilidad de un yeso agrícola está ligada al agua disponible.

En el primer muestreo, a los 90 días luego de la aplicación del yeso en el ensayo a campo, se encontraron diferencias significativas en los primeros 5 cm del perfil entre las parcelas control y las parcelas con yeso. Esto es similar a lo observado en los lisímetros ya que durante los primeros lavados, luego de la aplicación del yeso, es cuando se obtuvo la mayor concentración de Na en el lixiviado. Puede asumirse que es al principio del experimento donde ocurre el mayor reemplazo entre los cationes Na y Ca (Costa y Godz, 1985; Qadir *et al.*, 1996; Wilson *et al.*, 2004).

A campo se pudo observar el efecto a profundidad, con condiciones climáticas de lluvia dentro del promedio del país, a consecuencia de la

infiltración del yeso. Esto concuerda con trabajos como el de Costa y Godz (1999), quienes indican que hay mejoras en la disminución del Na superficial en ensayos a largo plazo si se hace la incorporación del yeso en los primeros 10 cm del perfil o se aplican dosis muy elevadas en superficie (Robbins y Gavlak, 1989).

La mayor disminución del Na intercambiable en condiciones controladas y a campo se obtuvieron en aquellas situaciones donde se dejó disolverse el yeso en el suelo por un mayor tiempo. Lo cual es similar a lo que concluyeron Khan *et al.* (2010) y Moreno y Bonadeo (2012) en sus trabajos, donde marcan el tiempo como factor fundamental para que la enmienda pueda solubilizarse y hacer efecto sobre el suelo.

En general, pudo observarse que a medida que disminuye el Na intercambiable hay un aumento del Ca intercambiable. La saturación del sistema con los iones Ca disminuye el espesor de la capa difusa e induce la floculación de los agregados del suelo por la acción de las fuerzas de van der Waals entre las partículas de arcilla (Loveday, 1976; Rasouli *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2013; Chaganti, Crohn y Šimůnek, 2015; Schultz *et al.*, 2017).

El aumento en la concentración de Ca intercambiable generó una posible mejora en la estructura del suelo, lo cual se evidenció en el ensayo a campo por un aumento en la humedad del suelo y en la materia seca de la pastura, además de un aumento en la penetrabilidad del penetrómetro. Son varios los trabajos que pudieron concluir que el aumento del Ca intercambiable en el suelo produce como consecuencia un incremento en la porosidad y la conductividad hidráulica (Sharma, 1971; Lebron *et al.*, 1994; Costa y Godz, 1999; Lebron *et al.*, 2002; Quintero *et al.*, 2006; Wilson *et al.* 2004; Ahmad *et al.*, 2006; Bonadeo *et al.*, 2014).

Ilyas et al. (1997) sugiere que el cultivo, la pastura en este trabajo, puede tener cierta influencia en la mejora de la conductividad hidráulica del suelo. Según estos autores, los canales generados por las raíces de las plantas aumentan la lixiviación del Na intercambiable a las zonas más profundas.

En los primeros centímetros del perfil (0 – 5 cm), los resultados al finalizar el experimento no demostraron diferencias significativas en la concentración de Na intercambiable entre las parcelas control y las parcelas con yeso. De esto se infiere que pudo haber una lixiviación similar en ambos tratamientos, lo que concuerda con lo obtenido en los microlisímetros en donde se determinó que en el suelo control también ocurría lixiviación del Na, aunque en menor proporción que en el suelo con yeso (Ahmad *et al.*, 2006).

Al disminuir la concentración de Na intercambiable en la solución del suelo, aumenta la actividad del ion H^+ (Imbellone *et al.*, 2010). Sin embargo, el yeso por sí solo no tiene efecto sobre el valor del pH de un suelo. La combinación del sulfato y Ca proveniente del yeso con la mineralogía y composición de los coloides del suelo, es lo que produce cambios en el valor del pH (Bonadeo *et al.*, 2014; Zoca y Penn, 2017).

Los resultados del trabajo demuestran una tendencia a la disminución del pH en el suelo. En el caso de suelos sódicos neutrales (ausencia de altas concentraciones de carbonatos), la disminución se da en el orden de 0,5 a 1 unidad, la cual es atribuida a la formación de complejos iónicos con el sulfato (Regansamy y Olsson, 1991; Quintero *et al.*, 2006; Schultz *et al.*, 2017).

En algunos casos, la aplicación de yeso puede ocasionar no solo la lixiviación del Na, sino también la pérdida de Mg del complejo de intercambio del suelo (Loveday, 1976; Costa y Godz, 1985; Ilyas *et al.*, 1997;

Chaganti, Crohn y Šimůnek, 2015). Sin embargo, para la combinación de suelo y dosis de yeso empleada en este trabajo, no se encontraron disminuciones significativas en los niveles del Mg intercambiable. Oster y Frenkel (1980) señalan que el reemplazo de Ca por Mg es mínimo, dado que el Mg presenta mejor selectividad para los sitios de intercambio en comparación con el Na.

La alta concentración del Na en el suelo, puede ocasionar deficiencia en la planta de algunos elementos (Imbellone *et al.*, 2010). Incluso el Na tiene efecto de ion específico, produciendo un efecto tóxico en el citoplasma y deficiencia en K (Martínez *et al.*, 2011; Alcaraz, 2012). Puede inferirse que el aumento del Ca intercambiable soluble mejoró la disponibilidad de nutrientes y el balance nutricional del suelo, dado al aumento en el rendimiento y la mejora en la calidad de la pastura (Chi *et al.*, 2012).

Por otro lado, la reducción del valor de pH aumenta la disponibilidad de nitrógeno (N), porque reduce la posibilidad de pérdida por volatilización, y de fósforo (P), ya que se solubiliza los posibles complejos formados con Ca (Rasouli *et al.*, 2013).

Algunos trabajos concuerdan en el hecho que después de cierto tiempo, retorna el Na intercambiable en los primeros estratos del perfil del suelo (Sharma, 1971). El decaimiento del efecto lo demuestra el trabajo de Rasouli *et al.* (2013), dado que ellos observaron el mayor rendimiento del trigo durante primer año luego de la aplicación de yeso sobre un suelo sódico, en comparación con el rendimiento en los dos años consecutivos.

5. CONCLUSIONES

El efecto del yeso agrícola para mejorar las condiciones de un suelo con alta concentración de Na fue evaluado en este trabajo, en condiciones controladas y a campo.

La sustitución del Na por el Ca induce la floculación de los coloides que estabilizan los agregados y, por tanto, mejora las condiciones de permeabilidad en el suelo. Esta mejora conduce a un aumento en el rendimiento de los cultivos, que teóricamente, sería consecuencia de la facilidad en el proceso de germinación y enraizamiento.

Además, la disminución de la concentración en el Na intercambiable implica un mejor balance de los nutrientes absorbidos por la planta, que no solo influye en el rendimiento sino en la calidad de la pastura analizada en este experimento.

Con los resultados obtenidos pudo demostrarse la efectividad del yeso agrícola para mejorar algunas de las propiedades, que fueron abarcadas por esta investigación, de los suelos con alta concentración de Na. Lo cual podría permitir aumentar el área productiva en las zonas afectadas por estos suelos en Uruguay.

Es necesario hacer una evaluación a largo plazo de dosis variables de yeso agrícola sobre suelos con altas concentraciones de Na para hacer las recomendaciones más oportunas en las condiciones edafológicas y climáticas del país.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ahmad M, Niazi BH, Sandhu A. 1988. Effectiveness of gypsum, HCl and organic matter for the improvement of saline sodic soils. Pakistan Journal of Agricultural Research, 9 (3): 373 – 378.

Ahmad S, Ghafoor A, Qadir M, Aziz A. 2006. Amelioration of a calcareous saline – sodic soil by gypsum application and different crop rotations. International Journal of Agriculture & Biology, 8 (2): 142 – 146.

Alcaraz FJ. 2012. Salinidad y Vegetación [En línea]. Consultado 30 abril 2018.
Disponibile en:
<http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema18.pdf>.

Arévalo E, Bonadeo E, Lara F, Amengual C, Cerruti A, Milan C. 2009. Aplicación de calcio y magnesio sobre la producción de alfalfa en suelos “manchoneados” del centro de Córdoba. Argentina: Agromercado: cuadernillo clásico de forrajeras, 149: 16 – 17.

Bandera R. 2013. Rehabilitación de suelos salino – sódicos: evaluación de enmiendas y especies forrajeras. Tesis de Magister del Área Recursos Naturales. Buenos Aires: Facultad de Agronomía – Escuela de Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires. 56.

Bergström L. 1990. Use of lysimeters to estimate leaching of pesticides in agricultural soils. Environmental Pollution, 67: 325 – 347.

- Black CA. 1975. Salinidad y exceso de sodio. En: Relaciones Suelo – Planta. Tomo I. Nueva York: Editorial Hemisferio Sur. 391 – 440.
- Bonadeo E, Moreno I, Baranda A, Milan C. Changes in a sodic soil after gypsum application under dryland conditions. *European Scientific Journal*, 10 (27): 367 – 377.
- Brady N, Weil R. 2008. Soils of dry regions: alkalinity, salinity, and sodicity. En: *The Nature and Properties of Soils*. 14th edition. New Jersey, Pearson Prentice Hall. 469 – 510.
- Cardon GE, Davis JG, Bauder TA, Waskom RM. 2003. Managing sodic soils. Crops Series – Soil. Fact sheet N° 0.504. Colorado, Colorado State University Extension.
- Central West Catchment Management Authority (CMA). 2008. Sodic surface soil management. A best management practice guide for the Central West Catchment. Wellington, Australia, Australian Government. 26
- Chaganti VN, Crohn D, Šimůnek J. 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline – sodic with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158: 255 – 265.
- Chebataroff J. 1973. Ambientes Salinos; su Vegetación. Problemas de Utilización. N° 5. Montevideo, Facultad de Humanidades y Ciencias – Departamento de Geografía. 3 – 29.

- Chi CM, Zhao CW, Sun XJ, Wang ZC. 2012. Reclamation of saline – sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. *Geoderma*, 187 – 188: 24 – 30.
- Costa JL, Godz P. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sudeste de la Pampa Deprimida. *Ciencias del Suelo*, 17 (2): 21 – 27.
- Costa JL, Godz P. 1985. Efecto de enmiendas y lavado sobre el desplazamiento catiónico y producción de materia seca de un natracuol, en invernáculo. *Ciencia del Suelo*, 3 (1 – 2): 95 – 101.
- Davis JG, Waskom RM, Bauder TA. 2013. Managing sodic soils. Crops Series/ Soil. Colorado State University Extension. Fact sheet N° 0.504.
- Durán A, García F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, Clasificación, Manejo y Conservación. Volumen I. Montevideo, Editorial Hemisferio Sur. 333.
- Durán A. 1991. Los Suelos del Uruguay. 2da edición. Montevideo, Editorial Hemisferio Sur. 398.
- Evangelou VP. 1998. Environmental Soil and Water Chemistry: Principles and Applications. Iowa: Editorial Wiley. 407 – 425.

Fassbender H. 1987. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de America Latina. San José de Costa Rica, Editorial IICA. 423.

García A. 2009. Manejo de suelos con acumulación de sales. En: Memorias VIII Congreso Ecuatoriano de Ciencia del Suelo. Esmeraldas, Ecuador, Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. pp. 8 – 9.

García A. 2000. Enmiendas para el manejo de suelos sódicos. TECNI – FENALCE. Bogota: Boletín Informativo de la Subgerencia Técnica, 3 (2): 1 – 4.

Grille E. 2015. El Desarrollo Agropecuario y Agroindustrial de Uruguay: Reflexiones en el 50 Aniversario de la Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA – MGAP). Montevideo, Ministerio de ganaderia, agricultura y pesca. 86.

Hussain N, Niazi BH, Salim M, Nasim A. 2000. Reclamation of sodic soils: horizontal flushing at different time intervals after application of gypsum. International Journal of Agriculture and Biology, 2 (1 – 2): 83 – 85.

Ilyas M, Qureshi RH, Qadir MA. 1997. Chemical changes in a saline – sodic soil after gypsum application and cropping. Soil Technology, 10: 247 – 260.

- Imbellone AP, Giménez JE, Panigatti JL. 2010. Procesos de sodificación y salinización. En: Suelos de la región Pampeana. Procesos de Formación. Buenos Aires: Editorial INTA. 261 – 285.
- Jaramillo D. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. 613.
- Jury WA, Jarrel WM, Deviti D. 1979. Reclamation of saline – sodic soils by leaching. Soil Science Society of American Journal, 43: 1100 – 1106.
- Khan MJ, Jan MT, Khan AU, Arif M, Shafi M. 2010. Management of saline sodic soils through cultural practices and gypsum. Pakistan Journal of Botany, 42 (6): 4143 – 4155.
- Lazovich M, Costa JL, Godz P. 1985. Efecto de enmiendas y lavado sobre el desplazamiento catiónico y producción de materia seca de un Natracuol, en invernáculo. Ciencia del suelo, 3 (1 – 2): 95 – 101.
- Lebron I, Suarez DL, Yoshida T. 2002. Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. Soil Science Society of American Journal, 66: 92 – 98.
- Lebron I, Suarez DL, Alberto F. 1994. Stability of a calcareous saline – sodic soil during reclamation. Soil Science of American Journal, 58: 1753 – 1762.

- Loveday J. 1976. Relative significance of electrolyte and cation Exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. *Australian Journal Soil Research*, 14: 361 – 371.
- Makoi J, Verplancke H. 2010. Effect of gypsum placement on the physico chemical properties of a saline sandy loam soil. *Australian Journal of Crop Science*, 4 (7): 556-563.
- Martínez N, López CV, Basurto M, Pérez R. 2011. Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*, 5 (3): 156 – 161.
- Montaño S, Ortega M, Ramírez C, Rone JL. 1985. Estudio de tres yesos agrícolas y el yeso puro bajo dos formas de aplicación (incorporado al suelo y solubilizado en agua) en el mejoramiento de la capa arable de un suelo sódico. *Agrociencia*, 59: 169 – 186.
- Moreno I, Bonadeo E. 2012. Efectos de sodio sobre las propiedades de los suelos – Técnicas de recuperación. En: Zapata MJ (Eds.). *En Boca de Tod@s... Ensayos de la Convocatoria VOX POPULI*. Córdoba, UniRío Editora. 19 – 25.
- Oster JD, Frenkel H. 1980. The chemistry of the reclamation of sodic soils with gypsum and lime. *Soil Science of American Journal*, 44: 41 – 45.

- Polak G. 2011. Agricultura de precisión para la corrección de ambientes con elevado valor de sodio intercambiable. Tesis Especialista en Fertilidad de Suelos y Fertilización. Buenos Aires: Facultad de Agronomía – Escuela de Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires. 45.
- Provin T, Pitt JL. 2012. Managing soil salinity. Texas A & M Agrilife Extensión, E – 60: 3 – 12.
- Qadir R, Quareshi N, Ahmad N. 1996. Reclamation of a saline – sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. Geoderma, 74: 207-217.
- Quintero C, Boschetti N, Durand A, Fettolini S. 2006. Recuperación de suelos dispersivos por medio de enmiendas. Estudio de casos. En: Gonzalez AP (Eds.). Bases para la Conservación de Suelos y Aguas en la Cuenca del Río Paraná. Santa Fé, Universidad de Entre Ríos. pp. 101 – 108.
- Rasouli F, Pouya A, Karimian N. 2013. Wheat yield and physico – chemical properties of a sodic soil from semi – arid area of Iran as affected by applied gypsum. Geoderma, 193 – 194: 246 – 255.
- Rengasamy P, Olsson KA. 1991. Sodicty and soil structure. Australian Journal Soil Research, 29: 935 – 952.
- Richards LA. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook Vol 60. Washington: United States Salinity

Laboratory of the United States Department of Agriculture (USDA).
160.

Robbins CW, Gavlak RG. 1989. Salt – and sodium – affected soils. University
of Idaho Cooperative Extension Service Bulletin, Nro 703. 12.

Sahin U, Anapali O. 2005. A laboratory study of effects of water dissolved
gypsum application on hydraulic conductivity of saline – sodic soil
under intermittent ponding conditions. Irish Journal of Agricultural
and Food Research, 44 (2): 297 – 303.

Schultz E, Chatterjee A, DeSutter T, Franzen D. 2017. Sodic soil reclamation
potential of gypsum and biochar additions: influence on
physicochemical properties and soil respiration. Communications in
Soil Science and Plant Analysis, 48 (15): 1792 – 1803.

Sharma M L. 1971. Physical and physico – chemical changes in the profile a
sodic soil treated with gypsum. Australian Journal Soil Research, 9: 73 –
82.

Singh K, Singh B, Singh RR. 2013. Effect of land rehabilitation on
physicochemical and microbial properties of sodic soil. Catena, 109: 49 –
57.

Suarez D. 2001. Sodic soil reclamation: modelling and field study. Australian
Journal of Soil Research, 39: 1225 – 1246.

Szabolcs I. 1994. Prospects of soil salinity for the 21st century. En: 15th World Congress of Soil of Soil Science. The International Society of Soil Science and the Mexican Society of Science. Acapulco. 123 – 141.

Taboada MA, Lavado R. 2009. Alteraciones de la Fertilidad de los Suelos. El Halomorfismo, la Acidez, el Hidromorfismo y las Inundaciones. Buenos Aires, Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires. 163.

Weihermüller L, Siemens J, Deurer M, Knoblauch S, Rupp H, Göttlein A, Pütz T. 2007. In situ soil water extraction: A review. Journal of Enviromental Quality, 36: 1735 – 1748.

Wilson M, Zino L, Cerana J, Boschetti N, Quintero C. 2004. Efecto del agregado de yeso sobre las características físicas y químicas de un suelo degradado por el uso arrocero. Paraná: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Zoca SM, Penn C. 2017. An important tool with no instruction manual: A review of gypsum use in agriculture. Advances in Agronomy, 144: 1 – 44.