



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final presentado para optar al
Grado de Ingeniero Agrónomo

*Cambios en la condición física de un suelo sódico por el agregado de
yeso*

Urriolabeytia Juan Ignacio

DNI: 32.208.087

Directora: Elena Bonadeo

Río Cuarto – Córdoba

Agosto 2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final

*Cambios en la condición física de un suelo sódico por el agregado de
yeso*

Autor: Juan Ignacio Urriolabeytia

DNI: 32.208.097

Directora: Elena Bonadeo

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión
Evaluadora:

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Silvia y Juan, a mi hermana Arantxa y a mi novia Carola, por su ayuda, comprensión y compañía a lo largo de todo este tiempo para que hoy esto sea una realidad.

A mi directora Elena, por su amistad, consejos, dedicación, tiempo, compromiso y colaboración.

A Inés por su amistad y colaboración.

A la UNRC y la Facultad de Agronomía y Veterinaria por formarme como persona y profesional.

A todos aquellos que compartieron su tiempo e ideas para la realización de este trabajo.

A mis amigos que compartieron su tiempo durante toda la carrera Santi, Hernán, Nico, Mauri M., Mauri A. Carlitos, Cele, Flaca, Jesús y Walter.

Aquellos amigos que compartieron su tiempo fuera de la carrera Fredy, Negro y Cabeza.

GRACIAS.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	3
INDICE	4
INDICE DE FIGURAS	6
INDICE DE TABLAS	7
RESUMEN	8
SUMMARY	9
INTRODUCCION	10
IMPORTANCIA DEL PROBLEMA EN ARGENTINA Y LA PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	10
PLANTEO DEL PROBLEMA.....	11
HIPÓTESIS	11
OBJETIVOS	12
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
EFECTOS DEL SODIO SOBRE PROPIEDADES HIDROFISICAS.....	15
<i>Infiltración – Conductividad hidráulica</i>	15
<i>Costra superficial</i>	15
<i>Recuperación de suelos sódicos</i>	15
<i>Acción del yeso</i>	17
MATERIALES Y METODOS	19
UBICACIÓN.....	19
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DEL ENSAYO	19
<i>Clima</i>	19
<i>Relieve</i>	20
<i>Suelo</i>	20
<i>Capa freática</i>	24
<i>Cultivo</i>	24
<i>Enmienda</i>	25
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO REALIZADO	26
PERIODO DE ESTUDIO	28
<i>Muestras</i>	28
DETERMINACIONES A CAMPO PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA ENMIENDA.....	28
<i>Densidad Aparente (Dap)</i>	29
<i>Velocidad de infiltracion</i>	30
<i>Resistencia Mecánica</i>	31
<i>Análisis estadísticos</i>	31
RESULTADOS Y DISCUSION	32
DENSIDAD APARENTE.....	32
VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN.....	32

INFILTRACIÓN ACUMULADA.....	33
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA (K_s).....	34
RESISTENCIA MECÁNICA.....	35
CONCLUSIONES.....	37
CONSIDERACIONES FINALES	37
BIBLIOGRAFÍA.....	38

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Red hidrográfica de las “provincias pampeanas” donde se indican regiones con suelos afectados por fenómenos de salinidad-sodicidad-hidromorfismo.....	10
Figura 2: Manchoneo de soja y alfalfa en suelos sódicos del área de Villa María – CÓRDOBA	13
Figura 3: Comportamiento de sodio y calcio adherido a las partículas de arcilla	14
Figura 4: Imagen satelital del area en estudio	19
Figura 5: Distribucion de las precipitaciones en la localidad de Villa Maria durante el periodo 2008 - 2010	20
Figura 6: Secuencia de color con la profundidad, en seco.....	21
Figura 7: Manchon seleccionado para el enyaso, donde se puede observar las condiciones de cobertura y estado de la pastura.....	24
Figura 8: Imagen satelital de la ubicación de los bloques del lote	28
Figura 9: Vista de la pesa en posicion baja y cilindros.....	29
Figura 10: Vista del permeametro ubicado en el horizonte subsuperficial.....	30
Figura 11: Curva de infiltracion acumulada para los 3 tratamientos en las 2 epocas.....	33
Figura 12: Grafico de resistencia mecanica para los 3 tratamientos 27/10/2011	35
Figura 13: Grafico humedad gravimetrica para los 3 tratamientos 27/10/2011	35
Figura 14: Grafico de resistencia mecanica para los 3 tratamientos 24/02/2012	36
Figura 15: Grafico de humedad gravimetrica para los 3 tratamientos 24/02/2012.....	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades morfológicas de la situación normal	22
Tabla 2: Propiedades físico-químicas de la situación normal.....	22
Tabla 3: Propiedades morfológicas de la situación manchón	23
Tabla 4: Propiedades físico-químicas de la situación manchón	23
Tabla 5: Distribución de la granulometría del yeso aplicado, comparado con los requisitos de Normas IRAM (22452:2006).....	25
Tabla 6: Tratamientos realizados y dosis aplicadas año 2005	27
Tabla 7: Tratamientos realizados y dosis aplicadas en el presente trabajo, año 2008	27
Tabla 8: Densidad aparente de cada tratamiento en las distintas épocas de muestreo para el horizonte Bw1	32
Tabla 9: Velocidad de Infiltración en distintas épocas de muestreo.....	32
Tabla 10: Conductividad hidráulica para los distintos tratamientos en el horizonte Bw1	34

RESUMEN

Los suelos sódicos de la región de Villa María (Córdoba), manifiestan, en sectores de cultivos agrícolas o de pasturas, crecimiento desperejo, también denominado crecimiento en “parches” o “manchoneo”, siendo una de las características sobresalientes el abrupto cambio en el aspecto del cultivo entre la superficie afectada, denominada “manchón” y la no afectada llamada “normal”. Este patrón de crecimiento, es característico de suelos sódicos. Se hipotetiza que el agredo de sulfato de calcio (yeso) a los suelos sódicos aumentaría la concentración salina y reemplazaría el sodio de intercambio por el calcio de la enmienda mejorando las condiciones físicas. El objetivo fue evaluar la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica saturada, la densidad aparente y la resistencia mecánica. Sobre el manchón se definieron tres tratamientos: T (0 kg ha⁻¹), DA (4000 kg ha⁻¹) y DM (6000 kg ha⁻¹) de yeso comercial. Los resultados muestran que el agregado de la enmienda provocó aumentos en la cantidad de agua infiltrada, aunque no fueron estadísticamente significativos. En el horizonte Bw1 la enmienda provocó disminución de la Ks pero no modificó la DAP para ninguna de las dos épocas evaluadas. No se observó disminución de la resistencia mecánica hasta los 50 cm por efecto de la enmienda. Se considera que la práctica evaluada podría cambios favorables para la recuperación de estos suelos, pero debe entenderse como un proceso lento y a largo plazo.

Palabras claves: yeso, manchones, suelos salino-sódicos, enmienda, densidad aparente, velocidad de infiltración, resistencia mecánica.

SUMMARY

Sodic soils, in the region of Villa Maria (Cordoba), manifested in sectors of agricultural crops or pasture, uneven growth, also called "patches" or "manchoneo". One of the outstanding features is the abrupt change in the appearance of crops between the affected areas, called "patch" and not affected called "normal". This growth pattern is characteristic of sodic soils. It is hypothesized that calcium (gypsum) incorporated to sodic soil increases salt concentration and replace exchangeable sodium, improving physical conditions. The purpose was to evaluate the infiltration rate, saturated hydraulic conductivity, bulk density and soil strength. Three treatments, T (0 kg ha⁻¹), DA (4000 kg ha⁻¹) and DM (6000 kg ha⁻¹), were defined in complete randomized blocks. The results show that the addition of the amendment increases soil infiltration, though not statistically significant. On the horizon Bw1, amendment caused K_s decreased, but did not change the DAP for any of the two periods evaluated. No decrease in strength was observed up to 50 cm as a result of the amendment. It is considered that the practice evaluated might favorable changes for the recovery of these soils, but should be understood as a slow and long term practice.

Keywords: plaster, saline-sodic soils, t, bulk density, infiltration rate, mechanical strength.

INTRODUCCION

Importancia del problema en Argentina y la provincia de Córdoba

El país con mayor superficie de suelos afectados por halomorfismo es Australia, seguido por la ex URSS, quedando Argentina en tercer lugar (Imbellone *et al.*, 2010). Según Lavado (2007) los suelos afectados por procesos de salinización y/o sodificación pueden categorizarse de acuerdo con los ambientes de ocurrencia y la existencia o no de riego. A su vez los ambientes de ocurrencia pueden clasificarse como áridos, semiáridos y húmedos. Dentro de este último ambiente existen suelos principalmente sódicos y también existen salinos, pero –en muchos casos- predomina el fenómeno de sodicidad sobre el de salinización.

En nuestro país las regiones donde abundan estos suelos son la Pampa Deprimida en la provincia de Buenos Aires, la llanura deprimida del Oeste Bonaerense, el este-sudeste de Córdoba, el sur de Santa Fé (Depresión de la Picasa) y los bajos submeridionales del sur de Chaco y norte de Santa Fé según consta en Figura 1 (Taboada y Lavado, 2009).

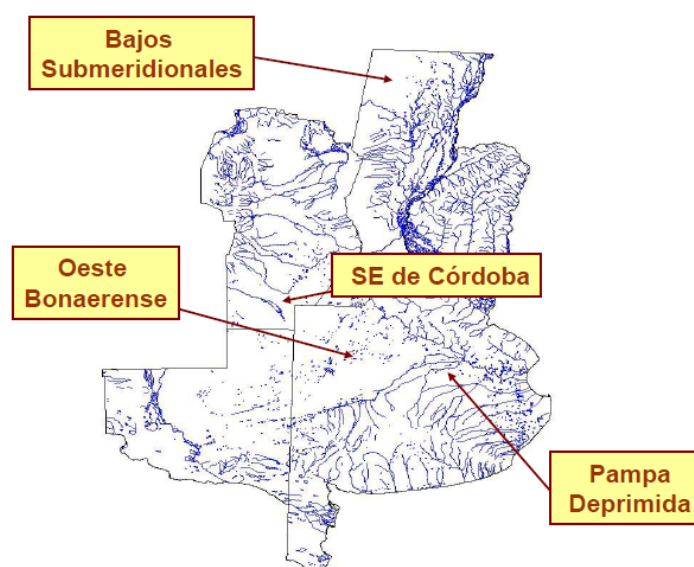


Figura 1. Red hidrográfica de las “provincias pampeanas” donde se indican regiones con suelos afectados por fenómenos de salinidad-sodicidad-hidromorfismo (Taboada y Lavado, 2009)

INTA (1993) informa que en la provincia de Córdoba la superficie ocupada por suelos sódicos es de más de 2.800.000 ha, manifestándose esta limitante a distintas profundidades. En 269.000 ha (12%) la sodicidad ocurre entre 50 y 125 cm de profundidad, en 1.525.000 ha (60%) entre 25 y 50 cm y en 1.009.000 ha (35%) a menos de 25 cm. En el Departamento San

Martín, hay 93.000 ha que presentan afectación sódica, de las cuales 54.870 (el 59%) el exceso de sodio se manifiesta entre 25 y 50 cm.

Planteo del problema

El concepto de suelo ideal para uso agrícola, hace referencia a aquel suelo, cuyas propiedades intrínsecas, permitirán cubrir satisfactoriamente las necesidades de muchas plantas de valor económico; este debería presentar las siguientes características: adecuada aireación, aproximadamente neutro en reacción, sin capas que inhiban la penetración de las raíces, sin exceso de sales, y que tenga suficiente agua y un amplio abastecimiento de nutrientes (Millar *et al.*, 1971).

Los suelos sódicos objeto de este estudio no cumplen con todas las características arriba mencionadas, especialmente no se satisfacen los requerimientos de aireación, existen capas u horizontes restrictivas a la exploración de raíces, además existen dificultades para el movimiento del agua e importantes alteraciones nutricionales (Varallyay, 1981; Taboada y Lavado, 2009; Miller y Donahue, 1995 y So y Aylmore, 1993).

Si bien existen numerosas técnicas y enmiendas para la recuperación de suelos sódicos, el agregado de yeso (sulfato de calcio di - hidratado) es una de las más frecuentes. En la región a estudiar no existen registros adecuados y confiables sobre la eficiencia de esta técnica, por lo que se considera relevante generar información al respecto.

Hipótesis

El agregado de sulfato de calcio a los suelos salinos-sódicos del área de Villa María, aumenta en primer lugar, la concentración salina y con posterioridad ocurre reemplazo del sodio de intercambio por el calcio de la enmienda, mejorando las condiciones físicas de estos suelos. Ello se evidencia por la floculación del coloide, que mejora la permeabilidad, disminuye la resistencia mecánica tanto en húmedo como en seco, modifica la densidad aparente y la porosidad, entre otras propiedades.

Objetivos

General

- ✓ Evaluar el efecto del agregado de yeso sobre las propiedades físicas de un suelo salino-sódico en profundidad ubicado en el área de Villa María.

Específicos

- ✓ Evaluar el efecto del agregado de yeso sobre la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica saturada del segundo horizonte.
- ✓ Determinar el efecto del agregado de yeso sobre la densidad aparente.
- ✓ Evaluar el efecto del agregado de yeso sobre la resistencia mecánica

Revisión Bibliográfica

La salinización de los suelos es un problema para la agricultura del mundo, siendo el factor que más restringe la productividad de los cultivos (Gouia *et al.*, 1994). El término salinización se utiliza para denominar el proceso de acumulación de sal en el suelo. Esto ocurre en zonas áridas o semiáridas donde, las sales solubles precipitan dentro o sobre la superficie del suelo. El aumento de los niveles de sal en las capas superiores del suelo puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas y a la productividad hasta el punto de producir la muerte de la planta. Concentraciones altas de diferentes sales (por ejemplo cloruro de sodio, sulfatos de calcio y/o magnesio, y los bicarbonatos) afectan el crecimiento de la planta tanto directamente, por su toxicidad, como indirectamente, aumentando el potencial osmótico y dificultando la absorción de agua por la raíz. (Lannetta y Colonna, 2006).

Taboada y Lavado (2009) informan que el efecto de la sodicidad sobre las propiedades del suelo y, estas últimas sobre las plantas, está determinada por fenómenos de hinchamiento y dispersión de arcillas. Las arcillas sódicas se hinchan y desarrollan grandes presiones dentro de los agregados. Esto debilita los lazos de unión entre las partículas que se comportan como entes independientes, es decir se dispersan. El movimiento de estas arcillas y el consecuente bloqueo de los poros, son las principales causas de la reducción de la permeabilidad. Cuando la lluvia excede la infiltración, el exceso de agua favorece la dispersión. Esta dispersión no necesariamente ocurre en toda la superficie, sino en micrositios encharcados. Las arcillas dispersadas normalmente refloculan dentro de un periodo de horas. Por estas razones se produce la formación de costras superficiales en muchos suelos halomórficos.

Rengasamy (1997) dice que otra característica distintiva de los suelos sódicos es la baja movilidad del agua, debido a que está fuertemente retenida por las arcillas y permanece prácticamente inmóvil. Por otro lado, el sistema de poros se encuentra colapsado por la inestabilidad de los agregados. En síntesis, los suelos sódicos, poseen bajas tasas de ingreso de agua al perfil y bajos niveles de conductividad hidráulica, disminuyendo la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo y baja disponibilidad de agua para los vegetales.

Los suelos sódicos, de la región de Villa María (Córdoba), manifiestan un crecimiento en “parches” o “manchoneo”, siendo una de las características sobresalientes el abrupto cambio entre la superficie afectada, denominada “manchón” y la no afectada llamada “normal”. Este patrón de crecimiento, es característico de suelos sódicos (Rengasamy and Sumner *et. al.*, 1997).



Figura 2. Manchoneo de soja y alfalfa en suelos sódicos del área de Villa María – Córdoba.

Entre las causas relevantes que determinan el diferente patrón de la vegetación están la profundidad en la que aparece el sodio y las sales en niveles que afectan negativamente el comportamiento de los cultivos (Jarsun, 1996; Bonadeo *et al.*, 2001, 2002).

Este patrón de crecimiento desparejo, facilita el avance de malezas mejor adaptadas a este tipo de ambiente, en su mayoría gramíneas y reduciendo la producción en los sectores denominados “manchón”. Estas características se hacen más notorias luego del primer año de implantación acortando la vida útil de dicha pastura. Los “manchones” son de tamaño variable, siendo numerosos los que se presentan por cada hectárea (Bonadeo *et al.*, 2001). Este fenómeno se manifiesta en suelos de sectores ligeramente deprimidos con elevados contenidos de sales y/o sodio a diferentes profundidades (Jarsun, 1996).

Este problema de origen edáfico está relacionado a procesos halomórficos vinculados a una capa freática con importante concentración de sales sódicas que se encuentra oscilando en los 2 metros de profundidad. La distribución en el terreno parece relacionarse con procesos

genéticos antiguos, donde la vegetación natural afectó la dinámica de las sales, determinando que estas llegaran o no a la superficie, se estima también que posibles derrames del Arroyo Cabral podrían haber contribuido de alguna manera en los procesos de formación de estos suelos (Hampp *et al.*, 2004)

Las comparaciones entre las situaciones sin “manchoneo” y con “manchoneo” han permitido establecer que, como consecuencia de los diferentes procesos y propiedades, se han generado diferentes lixiviados, así como también diferentes contenidos de sales y de sodio intercambiable a profundidades variables, enriqueciendo en forma diferencial el tenor salino del freático. Como resultado de esta dinámica, es notablemente mayor la profundidad del suelo con mejores condiciones para el crecimiento de raíces en situaciones no manchoneadas (Bonadeo *et al.*, 2002).

En la región mencionada el menor rendimiento de las pasturas se atribuye al contenido de sales y/o sodio que se encuentran en concentraciones que exceden los niveles de tolerancia de la pastura (Bressler *et al.*, 1982). Cabe destacar, que los elevados valores de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) no afectan el desarrollo radical de manera directa (Bressler *et al.*, 1982) pero generan un estado de dispersión coloidal que afecta la dinámica hídrica del perfil, limitando el descenso del frente salino. Por otra parte, estos elevados valores de PSI también generan compactaciones y elevadas resistencia mecánicas afectando la profundización de raíces, especialmente con contenidos de humedad bajos.

Guerrero-Alves *et al.* (2004) investigando sobre la génesis de un Natrustalf típico, encontraron que cuando las sales totales disminuyeron hasta niveles críticos, disminuyó también el calcio de intercambio y ocurrió dispersión de las partículas coloidales del suelo (Figura 3), lo que produjo valores elevados de densidad aparente en todos los horizontes del suelo bajo estudio, asociadas a muy bajas macroporosidades ($\leq 4,2\%$) y por ende muy bajas conductividades hidráulicas ($\leq 0,3 \text{ mm h}^{-1}$); lo cual le confiere una muy baja permeabilidad al agua.

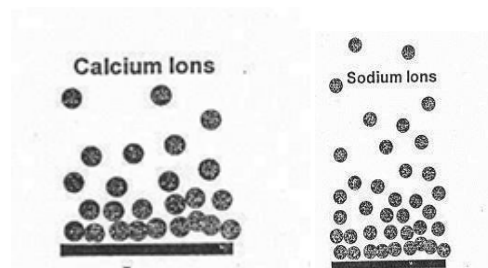


Figura 3. Comportamiento de sodio y calcio adherido a las partículas de arcilla.
(Hanson *et al.*, 1999).

Efectos del sodio sobre propiedades hidrofísicas

Infiltración – Conductividad hidráulica

La dispersión del suelo no sólo reduce la cantidad de agua que entra en el suelo, sino que también afecta a la conductividad hidráulica del suelo. La conductividad hidráulica se refiere a la velocidad a la que el agua fluye a través del suelo. Suelos con estructura bien definida contendrán un gran número de macroporos, grietas y fisuras que permiten el flujo relativamente rápido de agua a través del suelo. Cuando la dispersión del suelo es producida por sodio, causa pérdida de la estructura del suelo y se reduce la conductividad hidráulica. Si el agua no puede pasar a través del suelo, entonces la capa superior puede llegar a hincharse y encharcarse. Esto resulta en suelos anaeróbicos que pueden reducir o prevenir el crecimiento de las plantas y reducir las tasas de descomposición de materia orgánica (Pearson, 2003).

Costra superficial

La formación de costra superficial es una característica de los suelos sódicos. Las principales causas de la formación de costra superficial son 1) la dispersión física causada por el impacto de las gotas de lluvia o agua de riego, y 2) la dispersión química, que depende de la relación entre la salinidad y sodicidad del agua aplicada. La formación de costras superficiales debido a las lluvias es mucho mayor que las producidas por dispersión de sodio. La capa superior endurecida, o costra superficial, restringe la infiltración del agua y la emergencia de las plantas (Pearson, 2003).

Recuperación de suelos sódicos

La recuperación y rehabilitación de los suelos afectados por sales y/o sodio, implica un conjunto de medidas, entre las cuales se encuentra: elección del mejorador, la siembra de cultivos tolerantes, el manejo de la fertilización y riego, laboreos subsuperficiales y trabajos de recuperación (Yadav, 1993). El mejoramiento tiene por objetivo la remoción total o parcial de sales solubles de la zona radicular, mediante lavado; este se puede lograr con el agua de lluvia, o por sistemas artificiales de riego, la eficiencia de lavado está dada por la reducción total de las sales y/o sodio intercambiable, como una función de la calidad de agua y enmienda aplicada (Amudson y Zund, 1985; Papadopulos, 1988).

Yágodin, (1986), sugiere eliminar el carbonato de sodio, sustituir el sodio de intercambio por calcio, eliminar el sulfato de sodio producido y roturar el horizonte nátrico compactado. En este sentido, la presencia de calcio en el suelo, desencadena una serie de procesos que mejoran la condición física-química del suelo: favorece la coagulación del coloide disperso, aumenta la dinámica del agua y del aire, disminuye el pH, lo que en conjunto

favorece el desarrollo vegetal y microbiológico, que a su vez colabora en el mantenimiento de este estado. La intervención pone al sistema en un plano de retroalimentación positiva, hacia un estado de mayor estabilidad y fertilidad.

Para el mejoramiento de suelos sódicos (salinos y no salinos) se recomienda la aplicación de sales solubles de calcio. En especial, es aconsejable yeso por su bajo costo. Su aplicación, de ser posible debe hacerse mezclando yeso con el suelo por medio de barbechos y rastreos, regando a continuación. La cantidad de yeso por aplicar varía de un suelo a otro y depende de la cantidad de sodio intercambiable (Chena González, 1960).

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) posee por objetivo la neutralización de los suelos alcalinos y salinos, como también el mejoramiento de la permeabilidad de los materiales arcillosos, además de aportar azufre. Ello como consecuencia de mejorar la estructura del suelo y modificación del pH del mismo. Otro efecto benéfico es la estabilización de la materia orgánica y la disminución de la toxicidad de los metales pesados. Todo ello conduce a incrementar la productividad de los cultivos (Ponce y Torres Duggan, 2005).

Este tipo de enmienda se ha usado por muchos años para desplazar el sodio del complejo de cambio con resultados variables, la aplicación superficial aunque mejora la velocidad de infiltración y recupera el suelo es un proceso muy lento debido a la baja movilidad del yeso en el suelo, por lo cual es aconsejable incorporarlo para colocar el calcio en donde se necesita y acelerar el proceso, También puede añadirse con el agua de riego con buenos resultados.

El azufre o el ácido sulfúrico se usan frecuentemente con el fin de inducir la conversión de CaCO_3 a CaSO_4 y $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Muchas investigaciones han probado la bondad del uso del H_2SO_4 como enmienda en aplicaciones superficiales (Yahia et, al., 1975; Miyamoto et, al, 1975).

Algunos investigadores como Hoffman (1981) ha encontrado que la labranza profunda de suelos sódicos calcáreos es una técnica que da buenos resultados porque mejora la tasa de infiltración al romper horizontes compactos o capas que restringen el movimiento de agua. Si en el subsuelo se encuentra yeso el proceso de recuperación es más eficiente.

Con respecto a los métodos biológicos, los mismos consisten en la aplicación de materiales orgánicos preferentemente con una relación C/N alta. Estos materiales aplicados, o por siembra de cultivos tolerantes, deben aportar grandes cantidades de material, para mejorar las condiciones físicas de los suelos sódicos (estructura). La descomposición (previa incorporación al suelo) de ese material orgánico produce grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), que ayuda a movilizar el Ca^{2+} a través de la combinación con el agua

(hidrólisis) del calcáreo presente en el suelo. Este calcio reemplaza al Na⁺ del suelo trayendo aparejado todas las mejoras en las propiedades físicas que ello supone.

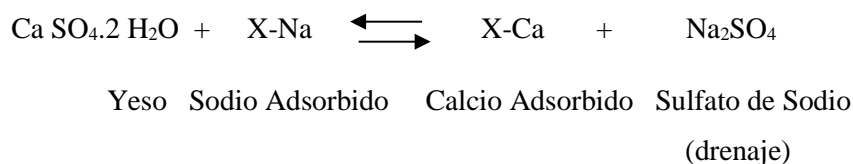
La siembra de especies tolerantes a suelos sódicos, a través del efecto de sus raíces, mejorando el movimiento de agua, aspecto fundamental en la recuperación de este tipo de suelos, lo que ayuda la eliminación de las sales (Colacelli, 2003).

El yeso agrícola es posible utilizarlo tanto como fertilizante azufrado como corrector de suelos sódicos. Una de las propiedades más destacables del yeso es su solubilidad en agua pura (2.5 g/L a 25°C), considerablemente mayor que la de la calcita, pero mucho menor que las sales solubles (Porta Casanellas *et al.*; 2004). Además de proveer calcio soluble (Ca²⁺), aporta sulfatos disponibles para las plantas (Harris, 2001). El yeso agrícola en su forma mineralógica pura (sulfato de calcio) contiene 18.6% de S y 23% de Ca²⁺ (Ponce y Torres Duggan, 2005).

Acción del yeso

Como ya se expresó precedentemente, la aplicación de yeso permite desplazar el Na⁺ adsorbido en las arcillas del suelo. Una vez que la enmienda entra en contacto con la masa de suelo, comienza a reaccionar y actuar el yeso como corrector. Luego de la aplicación se produce una reducción progresiva del pH como consecuencia de un fenómeno de intercambio iónico a nivel de las arcillas. El Ca²⁺ aportado por el yeso, por tener mayor preferencia de adsorividad y además por un efecto de concentración (incremento de la concentración de iones Ca²⁺ provocado por la aplicación de la enmienda), va reemplazando progresivamente a los cationes Na⁺. Por ello, para lograr la rehabilitación del suelo, es necesario que el sulfato de sodio generado en la reacción de intercambio sea lavado fuera del sistema suelo, ya sea a través de la acción pluvial (en zonas con balances hídricos positivos) o a través de sistemas de drenaje en el caso de que sea rentable efectuarlos (Niborski, 2000).

La reacción teórica global de intercambio iónico del yeso en el suelo es:



Las dosis de aplicación de la enmienda dependen de varios factores, entre ellos: tipo de suelo (textura y capacidad buffer), origen de la alcalinidad (genético, antrópico, etc.), nivel de PSI y objetivo de reducción del mismo, cultivo a implantar, etc. (Ponce y Torres Duggan, 2005).

Quintero *et al.* (2003) Trabajando sobre un Argiudol vértico, disperso, afectado por Na⁺, con baja salinidad y pH neutro concluyen que la enmienda con yeso representa una

alternativa adecuada para corregir problemas de suelos dispersivos y que mediante la disminución del Na^+ intercambiable, se produjo una recuperación en las condiciones físicas del suelo, repercutiendo en un incremento de la productividad de forraje y posibilitando una mejor utilización del fertilizante por parte del cultivo. Además quedó evidenciada la mejora del sistema poroso del suelo, por adición de yeso, por el cambio producido sobre la estabilidad estructural y por el aumento en la mineralización de la materia orgánica.

Se entiende que la aplicación de esta enmienda implica mejorar las condiciones físicas del suelo a través de la floculación del coloide y las químicas por la modificación del pH del suelo y la eliminación de Na^+ y de las sales por lavado (Moreno *et al.*, 2006).

MATERIALES Y METODOS

Ubicación

El ensayo se ubica, entre los 32° 29' LS y 63° 17' LO, al este de la localidad de Arroyo Cabral, como puede observarse en la Figura 4.



Figura 4. Imagen satelital del área en estudio.

Caracterización del área del ensayo

Clima

El clima es templado subhúmedo, con un registro pluviométrico anual medio de 807 mm (1956-2012), con distribución monzónica (INTA A.E. Villa María, 2007). El balance hidrológico histórico presenta un déficit marcado en los meses de enero y febrero; siendo equilibrado el resto del año. En la Figura 5 se indica la distribución en el año de las precipitaciones mensuales promedio entre los años 2008-2012.

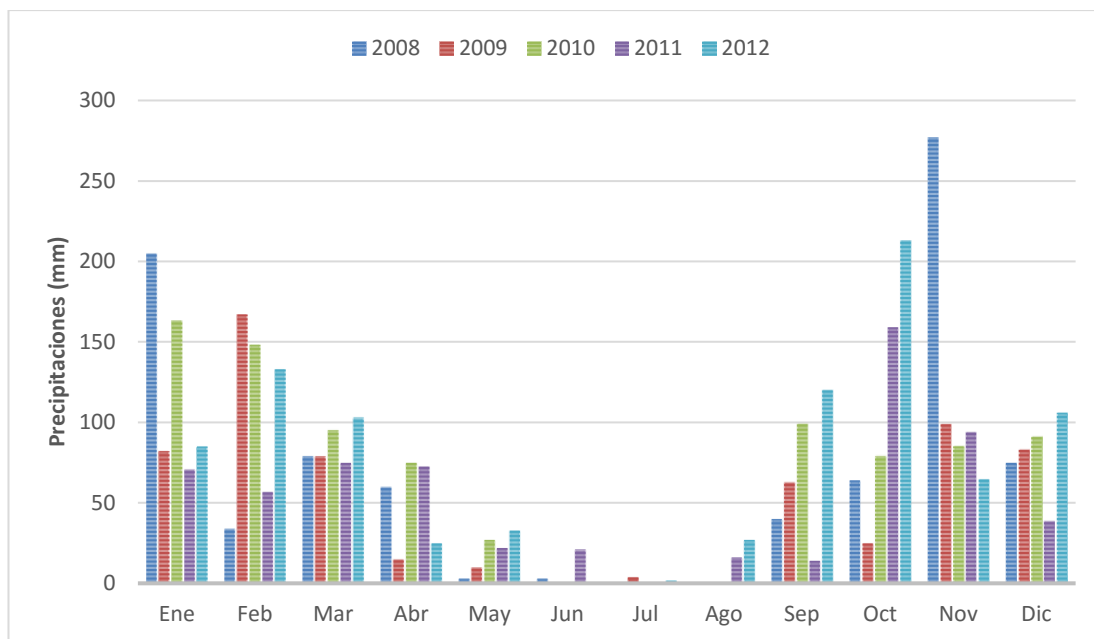


Figura 5. Distribución de precipitaciones en la localidad de Villa María durante el periodo 2008 – 2012. (Fuente: Agencia de Extensión Rural, INTA V. María, 2012).

Relieve

El relieve es subnormal, con pendiente regional menor al 0,5%, de dirección oeste-este.

Suelo

El suelo está clasificado como *Haplustol éntico* (Consociación Oncativo), según la Carta de Suelos de INTA (1987). Sin embargo, en el área en estudio se encontró un desajuste con lo expresado: por el grado de evolución, el suelo puede clasificarse como *Haplustol típico*, con fases por alcalinidad y salinidad a distintas profundidades (Bonadeo *et al.*, 2006). En cercanía de la zona, existen series con características sódicas típicas, como son la Serie Cayuqueo y Ticino (ambas Natracualf típico) (INTA, 1987).

La secuencia de horizontes y sus características estructurales y granulométricas (Etcheverre, 1976) se indican en las Tablas 1 y 2, para la situación “normal” y para la situación “manchón”. Si bien la situación “normal” presenta un horizonte más que el “manchón”, ambas tienen clasificaciones texturales y estructurales similares (franco limosa y bloques subangulares, respectivamente), incluso dentro de los horizontes no hay diferencias granulométricas importantes.

Respecto a la materia orgánica, ambas situaciones alcanzan valores próximos a 2,5% en el primer horizonte y disminuye con la profundidad hasta valores de 0,63% a los 76 cm y de 0,84% a los 90 cm, para “manchón” y “normal”, respectivamente.



Figura 6. Secuencia de color con la profundidad, en seco. Las flechas indican profundidad en cm.

La secuencia de colores dentro del perfil puede ser otro indicador de la afección sódica, debido a la coloración (más clara y rojiza) de los horizontes alcalinos, en húmedo. En seco, y tal como se ve en la Figura 6, los horizontes superficiales son más pálidos, mientras que los sódicos se muestran en una tonalidad más rojiza. El origen de estas diferencias pueden atribuirse a que los procesos de formación de los compuestos húmicos, ocurrieron bajo condiciones desfavorables (manchón) que limitaron la polimerización, resultando en colores más claros (Bonadeo *et al.*, 2006).

Las propiedades fisicoquímicas de los perfiles de las dos situaciones, se presentan en las Tablas 3 y 4, donde se observa que el suelo “normal”, según la CE es no salino. De acuerdo con el pH, el horizonte A es neutro, el horizonte B es moderadamente alcalino y el C es fuertemente alcalino. El PSI nos dice que ambas situaciones tanto normal como el manchón son sódicos. Por su parte, en la Tabla 3, la CE aumenta de un horizonte a otro, siendo el segundo horizonte ligeramente salino, pasando a medianamente salino. A partir de los 24 cm ya hay limitaciones fisicoquímicas, al presentar un pH superior a 9 y donde el PSI sobrepasa el 30% (extremadamente alcalino). La clasificación mencionada corresponde a la de suelos salinos y/o sódicos de Porta Casanellas (1994). Los bajos valores superficiales de CE demuestran que no hay eflorescencia salina.

Tabla 1: Propiedades morfológicas de la situación normal.

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura (Tipo)	MO (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arenas (%)
A	0-26	Franco limoso	Bloques subang.	2.64	10	59	31
Bw	26-37	Franco limoso	Bloques subang.	1.32	11	56	33
Bwk	37-55	Franco limoso	Bloques subang.	1.16	12	53	35
BCK	55-90	Franco limoso	Bloques subang.	0.95	11	53	36
Ck	90 a +	Franco limoso	Masivo	0.84	11	55	34

Se detectaron carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) a los 63 cm de profundidad.

Tabla 2: Propiedades morfológicas de la situación manchón.

Horizonte	Prof. (cm)	Textura	Estructura (Tipo)	MO (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arenas (%)
A	0-24	Franco limoso	Bloques subang.	2.37	9	53	38
Bw1	24-43	Franco limoso	Bloques subang.	0.99	12	56	32
Bw2k	43-76	Franco limoso	Bloques subang.	0.93	11	52	37
Ck	76 a +	Franco limoso	Masivo	0.63	11	52	37

Se detectaron carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$) a los 34 cm de profundidad.

Tabla 3: Propiedades físico-químicas de la situación normal.

Horizonte	Prof. (cm)	CE 1:1 (dS m ⁻¹)	pH	CIC (cmol/Kg)	PSI
A	0-26	0.60	6.88	12.6	11.1
Bw	26-37	0.32	7.80	14.3	12.6
Bwk	37-55	0.65	8.62	14.3	12.6
BCK	55-90	0.54	9.33	13.0	15.4
Ck	90 a +	0.78	9.56	10.9	39.4

Tabla 4: Propiedades físico-químicas de la situación manchón.

Horizonte	Prof. (cm)	CE 1:1 (dS m ⁻¹)	pH	CIC (cmol/Kg)	PSI
A	0-24	0.6	7.26	11.7	11.7
Bw1	24-43	1.21	9.14	13.36	33.0
Bw2k	43-76	2.28	9.83	12.6	42.0
Ck	76 a +	4.76	9.85	13.0	43.9

Capa freática

La capa freática oscila en los 2,5 m de profundidad y contiene diferentes sales sódicas. Relevamientos puntuales de la CE de la freática muestran que en las áreas normales es de 2,8 dS m⁻¹, mientras que para el “manchón”, asciende hasta los 7,6 dS m⁻¹ (Bonadeo *et al.*, 2006). Los mismos autores dicen que en la situación N, el anión dominante es el sulfato, mientras que en el M es el bicarbonato. El catión dominante tanto en N como en M, es el sodio. Esto explica las diferencias de pH en el suelo, ya que, si bien las sales son predominantemente sódicas, en N son neutras (sulfatos), mientras que en M son alcalinas (bicarbonatos).

Se considera necesario realizar más mediciones en tiempo y espacio para llegar a valores confiables sobre la salinidad de la napa freática.

Cultivo

Durante la realización de dicho trabajo, en el lote seleccionado para realizar el enyesado y donde se tomaron todas las muestras y se hicieron las determinaciones que se detallan abajo, se desarrollaba un cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L.*) cv. Araucana (grupo 8-9). El estado de la pastura, a nivel de lote era bueno. Sin embargo, los manchones eran fácilmente identificados por su bajo o nulo número de plantas de alfalfa y por la presencia de malezas gramíneas (Figura 7). Esto facilitó la ubicación y selección visual de los manchones, eligiéndose los de marcada manifestación de la problemática y mayor tamaño posible. Paso seguido y para corroborar la selección, se muestreó el manchón, determinándose pH y CE en las muestras.



Figura 7. Manchón seleccionado para el ensayo, donde se puede observar las condiciones de cobertura y estado de la pastura.

Enmienda

La enmienda cálcica utilizada fue yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) del 67% de pureza. No cumplía con los requisitos de Normas IRAM (22452:2006) para yeso de uso agrícola. Las fracciones granulométricas se expresan en la Tabla 5.

Tabla 5: Distribución de la granulometría del yeso aplicado, comparado con los requisitos de Normas IRAM (22452:2006).

Fracción granulométrica	IRAM	Muestra
> 4 mm	2 %	4,6 %
4 – 2 mm	78 %	44,4 %
2 – 1mm	7 %	36,8 %
< 1 mm	11 %	14,2 %

Si bien la muestra es más heterogénea que la definición reglamentaria, presenta un 33% más de partículas menores a 2 mm, lo que favorece la solubilidad y aumenta la velocidad de la respuesta (Chawla y Abrol, 1981).

Las cantidades de yeso aplicadas se aproximaron a partir de la ecuación propuesta por Yágodin *et al.*, (1986):

$$\text{yeso } (Tn \text{ ha}^{-1}) = P\text{meq yeso} \cdot (PSI_i - PSI_d) \cdot CIC \cdot h \cdot \delta \cdot c \quad (1)$$

Dónde:

- Pmeq yeso: es el peso (en g meq⁻¹) de 1 meq de $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0,086$;
- +PSI_i: PSI inicial (en partes de CIC);
- PSI_d: PSI deseado (en partes de CIC),
- CIC: capacidad de intercambio catiónico (en meq por cada 100 g de suelo),
- h: profundidad (en cm) y
- δ: densidad aparente (en Mg ha⁻¹) de la capa a mejorar,
- c: es un coeficiente de conversión de unidades.

Considerando que se desea llevar PSI del segundo horizonte (PSI_i= 33%) a 15%, y que la CIC es de 13,4 meq por cada 100 g de suelo, el horizonte tiene 19 cm de espesor y una densidad aparente de 1,37 Mg m⁻³, reemplazando en (1), se tiene:

$$Yeso (Tn ha^{-1}) = 0,086 g meq^{-1} \cdot \frac{(0,33 - 0,15) \cdot 13,4 meq}{100 g de suelo} \cdot (19 \cdot 1,37) \cdot 100 Tn ha^{-1}$$

$$Yeso (Tn ha^{-1}) = 4,95$$

Como la pureza del yeso aplicado es del 67%, la dosis aumenta a 6,58 Tn ha⁻¹. Por cuestiones prácticas (del ensayo y análisis de datos) y de aplicación a campo (a escala de lote) se aplicaron 6000 kg ha⁻¹ de yeso.

Especificaciones del ensayo realizado

El lote seleccionado para la experiencia tenía implantada una pastura de alfalfa (Medicago sativa L.), cv. Araucana (grupo 8-9).

El estudio se realizó en situación “manchón”, sobre un ensayo implantado en enero de 2005, al cual se había aplicado yeso (Sulfato: 37.13% - Calcio: 18.50% Título: 67%) definiendo tres tratamientos: Testigo -T- (sin aplicación), Dosis Agronómica -DA- (2000 Kg/ha) y Dosis Máxima -DM- (6000 Kg/ha). Cada bloque está ubicado en un manchón diferente.

La enmienda se aplicó en superficie y al voleo.

Es de importancia aclarar que en esta primer instancia de aplicación, DM se aproximó utilizando el método propuesto por Yágodin *et.al.* (1986) como se indica en el ítem anterior. En tanto, para DA se tuvieron en cuenta aspectos prácticos, relativos a la facilidad de aplicación y aspectos económicos.

$$Na^+ \text{ int}(meq/100g) = \frac{\Delta PSI * CIC}{100}$$

El yeso fue aplicado en dos oportunidades, al inicio del ensayo, y a los tres años posteriores según se especifica en la Tabla 6 y en la Tabla 7. Aunque la última aplicación solo se realizó sobre DA.

En la Tabla 6 se presenta los tratamientos aplicados, las dosis y la cantidad de elemento puro aportado al suelo en el año 2005.

Tabla 6. Tratamientos realizados y dosis aplicadas en el año 2005.

Tratamientos			
Año 2005	Testigo (T)	Dosis agronómica (DA)	Dosis Máxima (DM)
Dosis aplicada (SO₄Ca.2H₂O).	0 Kg/Ha	2000 Kg/Ha	6000 Kg/Ha
Dosis pura (SO₄Ca.2H₂O).	0 Kg/Ha	1340 kg/Ha	4020 Kg/Ha
Sulfatos aportados	0 Kg/Ha	497,54 Kg/Ha	1492,6 Kg/Ha
Calcio aportado	0 Kg/Ha	247,9 Kg/Ha	743,7 Kg/Ha

En la Tabla 7 se muestran los tratamientos que se definen después de la segunda aplicación de yeso a DA, realizada el día 07 del mes de Abril del año 2008. El tratamiento **DA** se lo pasa a denominar **DD** (doble dosis) después de la aplicación de nuevamente 2000 kg/ha. Cabe aclarar, que en la discusión de resultados se denomina **DD** desde el primer muestreo, aunque aún la nueva aplicación de yeso no se había realizado.

Tabla 7. Tratamientos realizados y dosis aplicadas en el presente trabajo, año 2008.

Tratamientos			
Año 2008	Testigo (T)	Doble Dosis (DD)	Dosis Máxima (DM)
Dosis aplicada (SO₄Ca.2H₂O).	0 kg/Ha	2000 Kg/Ha	0 kg/Ha
Dosis pura (SO₄Ca.2H₂O).	0 kg/Ha	1340 kg/Ha	0 kg/Ha
Sulfatos aportados	0 kg/Ha	497,54 Kg/Ha	0 kg/Ha
Calcio aportado	0 kg/Ha	247,9 Kg/Ha	0 kg/Ha

La superficie de cada unidad experimental fue de 49 m² (7m x 7m), mientras que el área de muestreo de 25 m² para evitar la influencia de los bordes. La dimensión seleccionada contempla que los muestreos correspondientes no afecten la evolución del yeso.

El diseño estadístico es en bloques completos al azar con tres repeticiones, quedando definido como lo muestra la Figura 8.

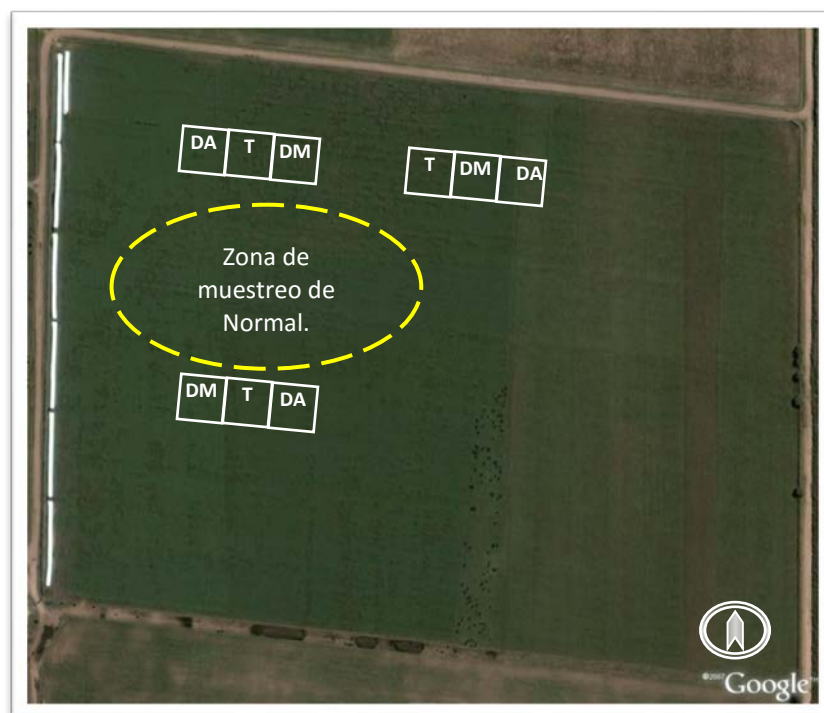


Figura 8. Imagen satelital de la ubicación de los bloques en el lote.

Periodo de estudio

El estudio se llevó a cabo entre abril de 2008 y marzo de 2012.

Muestreos

Los muestreos y las determinaciones a campo fueron realizados y tomados en dos oportunidades, la correspondiente al primer muestreo, en abril de 2008 y enero de 2009 y los correspondientes al segundo muestreo, en diciembre de 2011 y marzo de 2012.

Dentro del manchón seleccionado y para cada uno de los tratamientos, el suelo se muestreo en distintas profundidades.

Los muestreos realizados no tuvieron un patrón predeterminado, solo se tuvo en cuenta el momento de ocurrencia de precipitaciones, para facilitar la extracción de muestras, debido a la extrema dureza de estos suelos cuando su contenido hídrico es bajo.

Determinaciones a campo para evaluar el efecto de la enmienda

En las unidades experimentales a campo, se realizaron las siguientes determinaciones para ver el efecto de la enmienda:

Densidad Aparente (Dap): Método del Cilindro (Klute, 1986). La determinación se realizó para ambas situaciones en los dos primeros horizontes.

Previo a la extracción de las muestras, se limpió la superficie del lugar elegido y se colocaron los cilindros, se dejó caer la pesa (Figura 9) hasta que el borde superior del cilindro externo coincidió con la superficie del suelo.

Posteriormente con la ayuda de una pala, se extrajo el juego de cilindros y con un cuchillo se emparejaron los bordes del cilindro interno, para que todo el volumen capaz de albergar dicho cilindro este ocupado por la muestra.



Figura 9. Vista de la pesa en posición baja y cilindros.

El contenido del cilindro se introdujo en una bolsa de nylon correctamente identificada para evitar pérdidas de peso y humedad.

Una vez llevadas las muestras al laboratorio se pesó el volumen total extraído y luego se determinó el contenido de humedad a una alícuota que fue llevada a estufa a 105°C, hasta peso constante. Con la siguiente formula se determinó el contenido de humedad de dicha alícuota.

$$\%H = 100 * \frac{(PSH + T) - (PSS + T)}{(PSS + T) - T}$$

PSH: Peso suelo húmedo

PSS: Peso suelo seco

T: Tara

Por último, ya con el porcentaje de humedad, se corrigió el peso del suelo húmedo contenido en el cilindro y se relacionó con el volumen total, obteniéndose el valor de DAP.

Velocidad de infiltración: por el método del permeámetro de disco (Gil, 1999), a flujo saturado (0 kPa de tensión), en el horizonte subsuperficial.

Como la medición se realizó en el horizonte subsuperficial, en todas las situaciones se cavó hasta alcanzar tal profundidad.

Luego de ello se alisó la base y para establecer una buena superficie de contacto, entre el disco y el suelo, se colocó arena fina dentro del anillo enrasador de 14 cm de diámetro y de 0.5 cm de espesor.

En estas condiciones se ubicó el dispositivo y se comenzó a medir luego de permitir que la arena se mojase (Figura 10). Los intervalos de lectura fueron: los primeros 5 minutos cada 1 minuto y luego cada 5 minutos hasta lograr 3 lecturas similares.

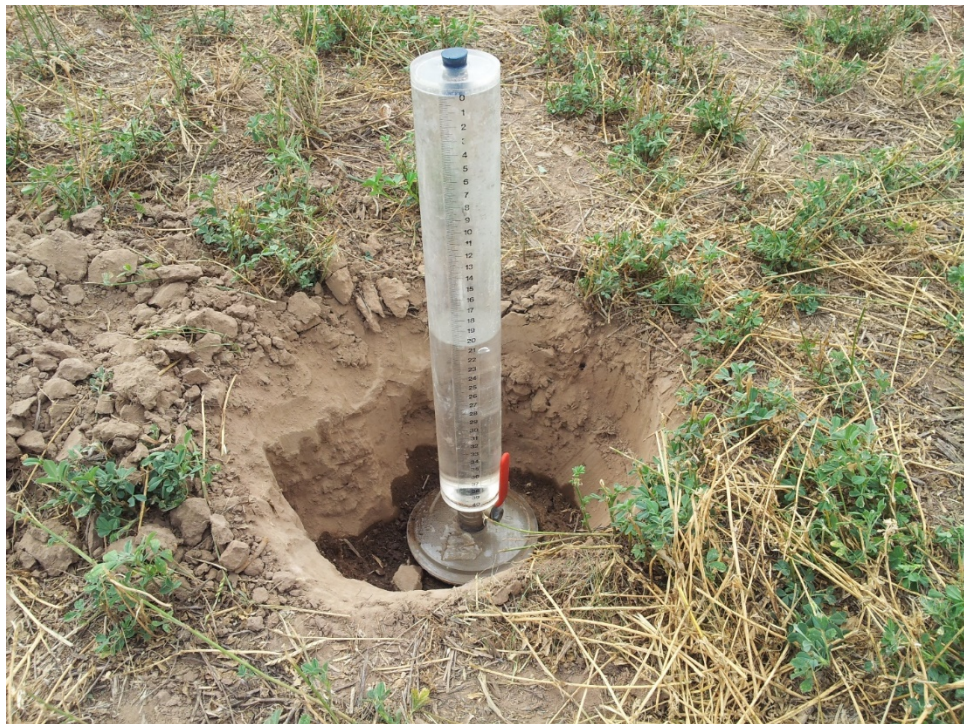


Figura 10. Vista del permeámetro ubicado en el horizonte subsuperficial.

Al cabo de 75 minutos en promedio se alcanzó un régimen estable de permeabilidad.

Conductividad hidráulica saturada (k): Luego con los datos de la planilla de registro, la cual contenía las lecturas obtenidas en los tiempos mencionados, se calculó la lámina infiltrada y con esta la acumulada, para luego terminar calculando la conductividad hidráulica saturada (k).

La conductividad hidráulica saturada (K) se estima como la pendiente de la sección lineal de la Infiltración acumulada graficada en función del tiempo ($\Delta I \text{ ac.} / \Delta t$).

Resistencia Mecánica: para dicha determinación se seleccionó, dentro de los métodos cuantitativos, el penetrómetro de impacto (penetrómetro Villegas) con sonda de punta cónica, con un ángulo de 60°, medido en su vértice y una sección de 2 cm². Se registraron el número de caídas de la pesa, de peso conocido, desde una distancia también conocida para introducir el pistón hasta una determinada profundidad, con lo que se pudo calcular la energía gastada en esa operación.

El eje del penetrómetro viene graduado cada 5 cm por un surco radial acanalado, que sirve para ir contando la cantidad de veces que se tuvo que largar la pesa para alcanzar la profundidad deseada.

- Cada golpe corresponde a 2.5 Kg cm⁻²
- Cálculo de los resultados: $R = k \times n^\circ$

Donde R: resistencia a la penetración cada 5 cm de espesor de suelo.

k: constante del penetrómetro (propia de cada equipo). En este caso es de 2,5 Kg cm⁻².

n°: número de impactos.

Luego para interpretar los datos obtenidos a campo se construyeron tablas y gráficos para visualizar mejor la resistencia mecánica y su distribución en el perfil.

Análisis estadísticos

Todas las variables medidas en forma directa en el campo o en el laboratorio y las medidas indirectamente a través de otras variables, fueron sometidas a un análisis estadístico. Para este trabajo final de grado se usó el software estadístico InfoStat, versión 2013. La prueba estadística que se realizó a cada una de las variables fue un análisis de varianza (ANOVA), con sus correspondientes pruebas de normalidad y homogeneidad.

El test de comparación usado fue el LSD Fischer, con un nivel de significación del 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSION

Densidad aparente

En la Tabla 8 se aprecian los valores de densidad aparente del horizonte Bw1 (20 a 40 cm) para cada uno de los tratamientos en las distintas épocas de muestreo.

Tabla 8: Densidad aparente de cada tratamiento en las distintas épocas de muestreo para el horizonte Bw1.

	Testigo (Mg m ⁻³)	Dosis Agronómica (Mg m ⁻³)	Dosis Máxima (Mg m ⁻³)
Época 1	1,44a	1,45a	1,45a
Época 2	1,45a	1,45a	1,48a

Letras iguales en la misma fila no indican diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$)

Analizando los datos obtenidos, se puede afirmar que en el horizonte analizado (20-40 cm) no hay diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos. Se puede apreciar una leve tendencia de incremento de la DAP en DM, en la segunda época de muestreo, pero al ser tan pequeño es difícil atribuir la diferencia a cambios en las propiedades del suelo, ya que también puede deberse a algún error en la determinación.

Velocidad de infiltración

En la Tabla 9 se muestran los valores de velocidad de infiltración de cada uno de los tratamientos para las dos épocas estudiadas.

Tabla 9: Velocidad de Infiltración en distintas épocas de muestreo.

	Testigo (mm h ⁻¹)	Dosis Agronómica (mm h ⁻¹)	Dosis Máxima (mm h ⁻¹)
Época 1	2,24a	2,50a	4,00a
Época 2	2,94a	5,86a	6,18a

Letras iguales en la misma fila no indican diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$)

Analizando los datos de la Tabla 9, se puede afirmar que en el horizonte no hay diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos. La falta de diferencias estadísticas se atribuyen a la elevada variabilidad que poseen los datos obtenidos en las repeticiones, lo que se puede deber a las características de la propiedad evaluada y al efecto del yeso que actúa en determinados sectores y no en otros. No obstante, se observa una marcada tendencia al aumento en la velocidad de infiltración, fundamentalmente en la segunda época de muestreo y para el tratamiento DM. Es probable que a medida que transcurrió el

tiempo, la disolución de la enmienda, provocó un aumento del intercambio del ion Na^+ por Ca^{++} produciendo una leve mejora de la estructura, asociada al proceso de floculación, y con ello un aumento de la velocidad de infiltración.

Si bien la velocidad de infiltración es muy baja, el aumento producido es importante, no en valores absolutos sino en valores relativos, ya que se duplicó la misma.

Cabe mencionar que existen limitantes funcionales como ser el elevado porcentaje de limo que, por su estructura aplanada y ordenamiento, restringe la permeabilidad del suelo. El escenario es completado por la arcilla, que si bien su proporción es baja, se encuentra dispersa por el sodio obstruyendo macroporos.

Hassan *et al* (1990), en Azhar *et al*, (2001) sostienen que las capas densas que se forman en los suelos salinos sódicos se deben a la iluviación de la arcilla dispersa y/o a la acumulación de limo. Estos procesos no son ajenos a la situación en estudio.

Infiltración acumulada

En la Figura 11 se observa la relación entre infiltración acumulada en función del tiempo para los diferentes tratamientos en las dos épocas evaluadas. En la misma se observa como los tratamientos DA y DM tienen mayor infiltración acumulada que T en todo el periodo evaluado haciéndose máximas las diferencias al cabo de 1 hora., pudiéndolo atribuir al efecto de la enmienda. Este aumento de DA y DM se debe a que la cantidad de yeso agregado ha logrado desplazar parte del sodio del complejo de intercambio y reemplazarlo por el calcio de la enmienda mejorando la condición estructural y aumentando la macroporosidad.

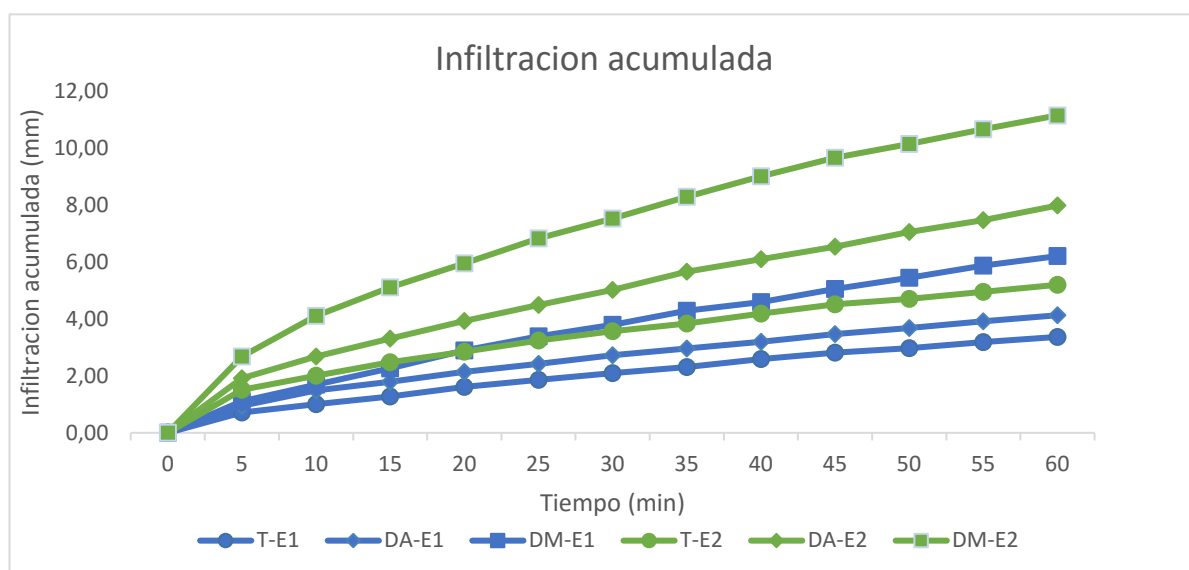


Figura 11. T= Testigo; DA= Dosis Agronómica; DM=Dosis Máxima; E1= Época 1 y E2=Época 2

El efecto del yeso sobre la infiltración acumulada es más importante en la segunda época evaluada debido al mayor tiempo que paso desde la aplicación del yeso.

Conductividad hidráulica saturada (K_s)

En la Tabla 10 se aprecian los resultados obtenidos de K_s del horizonte Bw1 y el análisis estadístico correspondiente para las épocas donde fue determinada.

Tabla 10: Conductividad hidráulica para los distintos tratamientos en el horizonte Bw1

	Testigo (mm h⁻¹)	Dosis Agronómica (mm h⁻¹)	Dosis Máxima (mm h⁻¹)
Época 1	18,03b	13,96ab	10,15a
Época 2	11,44a	8,36a	5,90a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$)

Analizando los datos se puede observar que el T presenta el mayor valor y la DM el menor, mostrando a DA con valores intermedios, aunque las diferencias estadísticamente significativas solo ocurren entre T y DM para la época 1.

Estos valores pueden verse afectados por los tratamientos realizados, ya que al utilizar yeso para lixiviar el sodio de los suelos, la estructura se ve más afectada en los tratamientos DA y DM que el T donde no se usó yeso. Posiblemente el Na^+ desplazado por el calcio del yeso en el primer horizonte pasó al segundo y creo una condición de estructura más desfavorable que el testigo. (Bonadeo *et al.*, 2014)

Con los distintos usos y manejos del suelo se modifica la estructura (Hartge y Ellies, 1990). Paralelo a ello, debería cambiar también la conductividad hidráulica. La magnitud de estos cambios estructurales ocasionales por el manejo, dependen de la oportunidad y frecuencia de las operaciones de labranzas superficiales y subsuperficiales del suelo y, también del efecto compactante producido por el tráfico y tránsito de la maquinaria agrícola o de animales (Hartge y Ellies, 1990). Además, la morfología, orientación y tamaño de los sistemas radicales de los vegetales pueden afectar la conductividad hidráulica saturada. (Ellies *et al.*, 1992).

Resistencia Mecánica

En la Figura 12 se indica la variación de la resistencia mecánica con la profundidad para los tratamientos abordados. En ella se observa un incremento de la resistencia mecánica de DA a partir de los 12-13 cm de profundidad y de DM unos algunos cm por debajo, lo que podría atribuirse a que dada la baja permeabilidad de estos suelos, el Na^+ que ha sido sustituido por Ca^{++} suministrado por el yeso, en lugar de ser lixiviado se acumula en estas profundidades alcanzando niveles mayores que T por lo tanto provoca una mayor dispersión del coloide (Ilyas, 1997; Bonadeo *et al.*, 2009). Este aumento del contenido de Na^+ y consecuente incremento de la resistencia mecánica ha sido reportado por Bonadeo *et al.* (2014). Se asume que la humedad fue similar para todos los tratamientos (Figura 12) por lo que es factible comparar la resistencia mecánica entre los tres tratamientos.

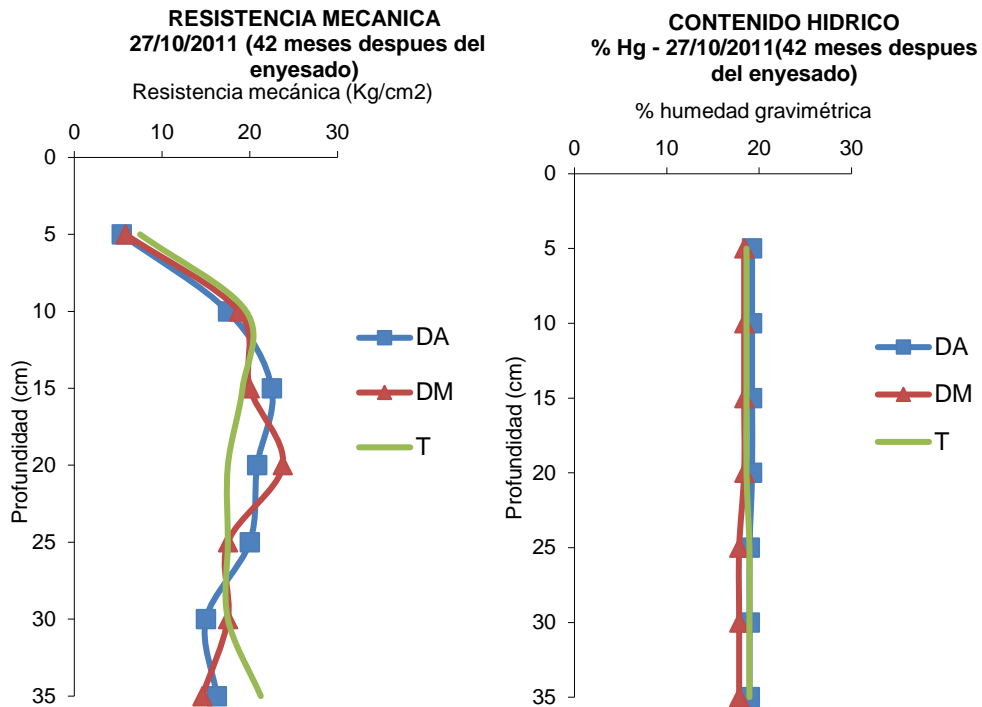
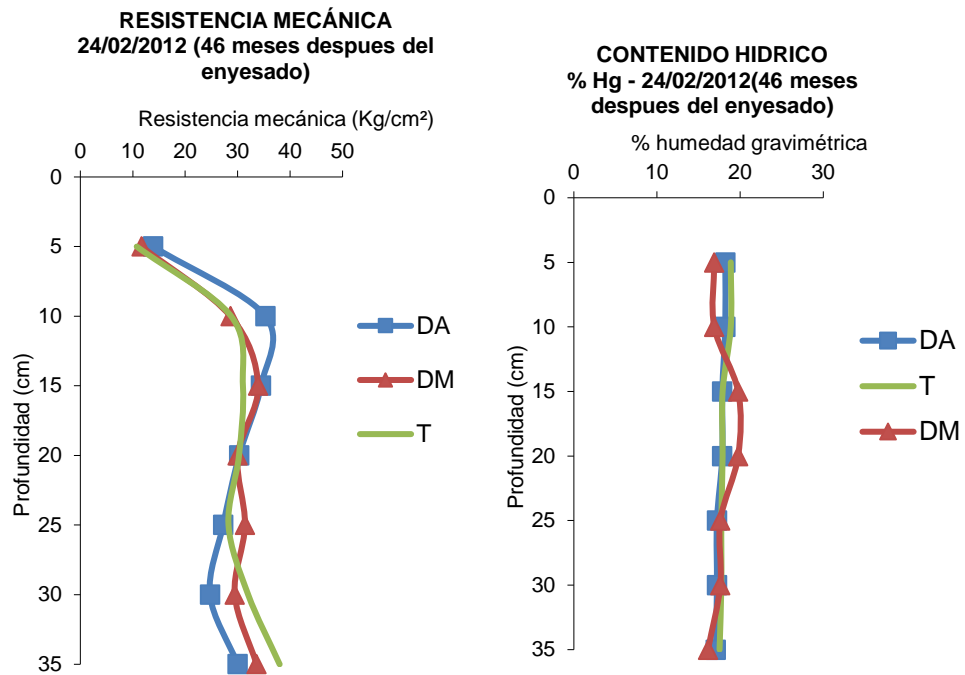


Figura 12 (izquierda) y 13 (derecha). Resistencia Mecánica y Humedad gravimétrica 27/10/2011.

También, Rengasamy y Olson (1991), indican que ante un mismo contenido de humedad, la distancia entre partículas de arcillas es menor cuando están saturadas con sodio respecto de calcio, siendo la escasa distancia entre partículas coloidales las responsables de la elevada resistencia mecánica de los suelos.

Además, en la Figura 12 se observa una disminución de la resistencia mecánica de DA y DM por debajo de los 25-30 cm respecto de T, dicho efecto podría atribuirse al efecto de

una mayor cantidad de raíces, ya que según el agregado de yeso en suelos sódicos podría provocar aumentos de la cantidad de raíces. Según Carter et al. (1986); Bawja and Josan (1989) y Carter and Pearen (1989) cit. por Ilyas et al. (1997) el agregado de yeso en suelos sódicos provoca una mejor implantación del cultivo, mayor desarrollo de parte aérea y mejor profundización de raíces. Si bien esta puede ser una causa habría que realizar más mediciones de resistencia mecánica y raíces y así obtener una mayor cantidad de datos para analizar y poder obtener una respuesta más específica



Figuras 14 (izquierda) y 15 (derecha). Resistencia Mecánica y Humedad gravimétrica 24/02/2012.

La Figura 14 que corresponde a la determinación de resistencia mecánica hecha 2 años después del enyesado, se observa el mismo fenómeno que fue explicado anteriormente referido a la acumulación de Na⁺ y su efecto sobre la resistencia mecánica, aunque no se detectan diferencias notorias de resistencia mecánica en profundidad.

CONCLUSIONES

El agregado de 4000 y 6000 kg ha⁻¹ de yeso (Dosis Agronómica y Dosis Máxima) no provocaron cambios importantes sobre las propiedades físicas del suelo del área en estudio.

No se observaron efectos notorios ni significativos del agregado de la enmienda sobre la densidad aparente ni la velocidad de infiltración.

En el horizonte Bw1, el agregado de yeso provocó una disminución de la conductividad hidráulica (k_s) en ambos tratamientos (Dosis Agronómica y Dosis Máxima) con respecto al Testigo, siendo la Dosis Máxima de la Epoca 2 donde se registraron los mayores cambios.

Con respecto a la Resistencia mecánica no se observa una disminución en la profundidad de estudio, sino lo contrario, un leve aumento en ambos tratamientos pudiéndose atribuir ese efecto a la acumulación de sales de Na⁺ por desplazamiento del Ca⁺⁺ de la enmienda.

Si se puede observar una disminución de la resistencia mecánica por debajo de la profundidad de estudio justo en los 30-35 cm de profundidad pudiendo deberse al efecto colonizador de las raíces del cultivo que se ven beneficiadas por el aporte de nutrientes de la enmienda.

CONSIDERACIONES FINALES

El proceso de mejoramiento es lento y complejo.

Un gran factor limitante es el agua, el balance hídrico no es lo suficientemente positivo como para aportar el agua necesaria para llevar a cabo un proceso contundente de lixiviado. El descenso de las sales y del sodio no depende únicamente de una elevada tasa de infiltración, también se requiere de un volumen importante de agua, capaz de atravesar el suelo y eliminar las sales del perfil. Tal vez este sea el principal factor limitante del mejoramiento de esta situación y del desarrollo de los cultivos.

Otro factor a tener en cuenta es de ajustar las dosis requeridas. Cada lote presenta diferentes niveles de afección y características estructurales y texturales propias, que van a incidir en los niveles de yeso aplicar.

Los resultados de esta investigación deben ser criteriosamente considerados y sería conveniente continuar durante más tiempo este tipo experiencias para obtener resultados más exactos, ajustando la cantidad de repeticiones tanto numéricas como temporales.

BIBLIOGRAFÍA

- AMUDSON, R.G. Y L.J. ZUND (1985). **Changes in the chemical and physical properties of a reclaimed saline-sodic soil in the San Joaquin Valley of California.** Soil Science, 140 (3): 213-222.
- AZHAR, M.; M. IQBAL.; M. KHAN Y M. ASHRAF (2001) **Effects of tillage implements in combination with Gypsum applications on the reclamation of saline-sodic soils.** International Journal of Agricultural & Biology. 3 (3):301-304.
- BONADEO, E.; I. MORENO.; E. HAMPP Y A. SORONDO (2001). **Factores que regulan la productividad de la alfalfa en áreas con manchoneo.** XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo”. Cuba.
- BONADEO, E., I. MORENO.; A. ODORIZZI.; E. HAMPP.; A. SORONDO Y M. BONGIOVANNI (2002). **Relación entre propiedades físico-químicas del suelo y raíces de alfalfa (Medicago sativa L.)**”. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- BONADEO, E.; E. HAMPP.; M. BONGIOVANNI.; I. MORENO Y A. ODORIZZI (2006). **Relaciones entre propiedades físicas y químicas del suelo y raíces de alfalfa (Medicago sativa L.)** afectada por “manchoneo”. Revista Ciencia del Suelo. N° 24. Buenos Aires. pp. 101-107.
- BONADEO, E.; C. MILÁN.; I. MORENO.; M. BASANTA Y J. VIOLA (2009). **Efecto del agregado de enmiendas cálcicas y magnésicas a un Natrustalf típico de la República Argentina en condiciones de secano.** Actas del XVIII Congreso latinoamericano de la Ciencia del suelo. 16-20 noviembre 2009. San José de Costa Rica.
- BONADEO, E.; I. MORENO. A. BARANDA Y C. MILAN (2014). **Changes in a sodic soil after gypsum application under dryland conditions.** European Scientific Journal. 10 (27).
- BRESSLER, E.; G.L. MC. NEAL Y D.L. CARTER (1982). **Saline and Sodic Soils. Modelling, Principles and Dynamics.** Advances Series in Agricultura Sciences. Springer Verlag. N° 10.
- CHAWLA, K. L. Y I.P. ABROL (1981). **Effect of gypsum fineness on the reclamation of sodic soils.** Agricultural Water Management. 5(1): 41-45.

- CHENA GONZÁLEZ, R. (1960). **Suelos sódicos y suelos salinos**. Secretaria de agricultura y ganadería. Dirección General de Agricultura. México.
- COLACELLI, N. (2003) M.Sc.Prof. Adj. Cát. de Uso del Suelo Facultad de agronomía y Zootecnia de la U.N.T . Recuperado el 14 de noviembre de 2012, de [http:// www.produccion.com.ar](http://www.produccion.com.ar).
- ELLIES, A.; C. RAMIREZ, R. MACDONALD, H. FIGUERO Y J. GAYOSO (1992). **Efecto de la compactación de suelos volcánicos sobre el crecimiento de *Lolium multiflorum* y *Trifolium pratense***. Agricultura Técnica 52 (4): 450-455.
- ETCHEVERE, P. (1976). **Normas de reconocimiento de suelos**. Publicación N° 152. INTA Castelar, Buenos Aires.
- GIL, R. (1999). **Permeámetro de disco**. Publicación Instituto de suelo del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CNIA). INTA. Castelar. 11 pp.
- GOUIA, H., M.H. GHORBAL Y C.B.TOURAINE (1994). **Effects of NaCl on flows of N mineralions and NO³ reductasa rate within whole plants of salt-sensitive bean and tolerant cotton**. Plant Physiol". 105: 1409-1418.
- GUERRERO-ALVES, J.; I. PLA-SENTÍS Y R. CAMACHO (2004). **Génesis de un suelo sódico alcalino en chaguaramas, Venezuela**. Agronomía Tropical, 54(4): 433-460.
- HAMPP, E.; E.BONADEO.; M. BONGIOVANNI.; E I. MORENO (2004) **Aspectos genéticos de suelos con manchoneo**. XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia.
- HANSON, B., S.R. GRATTAN Y A. FULTON. (1999). **Agricultural Salinity and Drainage**. University of California Irrigation Program. University of California, Davis.
- HARRIS, P. (2001). **A field day for minerals**. En Industrial Minerals. Diciembre de 2001.
- HARTGE, K. M. Y A. ELLIES (1990). **Changes in soil structure as caused by land use after clearing virgin forest**. Z. F. Bodenkunde und Pflanzenernährung. 153:389-393.
- HOFFMAN, G.J. (1981). **Guidelines for reclamation of salt-affected soils**. Proc. InterAmerican Salinity and water Management Technology Conference. Juarez, Mexico, 11-12 December 1980. pp. 49-64.

- ILYAS, M.; R. QURESHI Y M. QADIR (1997). **Chemical changes in a saline-sodic soil after gypsum application and cropping**. Soil Technology. 10(3): 247-260.
- IMBELLONE, P., J.E. GIMENEZ Y J.L. PANIGATTI (2010). **Suelos de la Región Pampeana**. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- INFOSTAT (2013). Infostat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- INTA (1987). **Carta de suelos de la República Argentina**. Hoja 3363-9 Villa María. Plan de Mapa de Suelos. Córdoba.
- INTA (1993) **Panorama Edafológico de Córdoba. Inventario de los Suelos y de Algunos Caracteres Edáficos de la Provincia por Departamentos y Pedanías**. Plan Mapa de Suelos Córdoba.
- JARSUN, B. (1996) **Condiciones del suelo para la alfalfa, Métodos correctivos**. V Jornadas Nacionales de alfalfa Villa María Córdoba, Argentina.
- KLUTE, A. (ed.) (1986). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agron. Monograph N° 9 ASA, SSSA. Madison, Wisconsin, USA.
- LANNETTA, M. Y N. COLONNA (2006). **Salinización**. Recuperado el 12 de julio de 2012, de http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B3_Leaflet_ES.pdf
- LAVADO, R.S. (2007) **Visión sintética de la distribución y magnitud de los suelos afectados por salinidad en la Argentina**. En; Talesnik, K., Grunberg, K. y Santa María, G; (Eds.); “La salinización de suelos en la Argentina: su impacto en la producción agropecuaria” (11-15). Córdoba: Ed. De la Universidad Católica de Córdoba. Argentina.
- MILLAR, C. E., L.M. TURK Y H.D. FOTH (1971). **Fundamentos de la ciencia del suelo**. México: Ed. Continental.
- MILLER, R.W. Y R.L. DONAHUE (1995). **Soils in Our Environment**, Seventh Edition. Prudence Hall, Englewood, Cliffs, NJ. p. 323.
- MORENO, I., E. BONADEO.; E. HAMPP.; D. URBANI Y M. BONGIOVANI (2006). **Agregado de yeso y dinámica de sales y pH en suelos con horizontes salinos subsuperficiales**. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Argentina.
- NIBORSKI, M. (2000). **El exceso de sales y sodio en los suelos de las regiones áridas y semiáridas**. Cátedra de manejo y conservación de suelos. Facultad de

agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Recuperado el 6 de abril de 2010, de <http://www.oas.org/usde/publication/unit/oea10s>.

- PAPADOPULOS, I. (1988). **Fiel salinity profile deveploment under drip irrigation with high-sulfhate water**. Soil Soc. 145(3): 201-206.
- PEARSON KRISTA E. Y J.W. BAUDER (2003). **The Basics of Salinity and Sodicity Effects on Soil Physical Properties**. Department of Land Resources and Environmental Sciences. Montana State University – Bozeman. Edicion Digital: <http://waterquality.montana.edu> Consultado el 14/11/2009.
- PONCE, M. B. Y M. TORRES DUGGAN (2005). **Minerales para la Agricultura en Latinoamérica**. Universidad Nacional de San Martin. Argentina.
- PORTA CASANELLAS, J., M. LÓPEZ-ACEVEDO REGUERÍN Y C. ROQUERO LABURU (1994). **Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente**. Madrid: Ed. Mundi Prensa.
- PORTA CASANELLAS, J.; M. LÓPEZ ACEVEDO Y C. ROQUERO (2004). **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**. Ediciones Mundi Prensa, Madrid.807 pags.
- QUINTERO C., N. BOSCHETTI.; A. DURAND MORAT Y S. FETTOLINI (2003). **Recuperación de suelos dispersivos por medio de enmiendas**. Cátedra Edafología, Facultad Ciencias Agropecuarias- Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. Recuperado el 4 de mayo de 2010, <http://www.uner.edu.ar>.
- RENGASAMY, P. (1997). **Sodic soils**. En: Rengasamy Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. and A. Stewart. Methods for assessment of soil degradation, R. Lal et al. (Eds.) Advances in Soil Science (USA) 558 pp.
- RENGASAMY, P. Y K.A OLSSON (1991). **Sodicity and Soil Structure**. Aust. J. Soil Res. 29:925-32.
- RENGASAMY, P. Y M.E. SUMNER (1997). **Processes involved in sodic behaviour**. In Sumner, M.E. and Naidu, R., (ed) “Sodic soils”. New York Oxford University Press, New York.
- SO, H.B. Y A.A.G. AYLMORE (1993) **How do soidc soils behave**. Aust. J. Soil Res. 31, 761-77.
- TABOADA, M. Y R. LAVADO (Ed). (2009) **Alteraciones de la fertilidad física de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones**. Buenos Aires: Ed. De la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.

- VARALLYAY, G. (1981). **Extreme Moisture Regime as the Main Limiting Factor of the Fertility of Salt Affected Soils**, en *Agrokémia és Talajtan. Húngaro-Indian Seminar on Salt affected Soils*, 30 (73-94). Budapest, Hungría.
- YADAV, J. S. P. (1993). **Problems and prospects of crop productions and afforestation on salt affected soils with special reference to India**. *Agrokemia e's Talajtan*. 42(1-2): 157-172.
- YAGODIN, B. A., P. SMIRNOV Y A.P PETERBURGSKI (1986). **Agroquímica**. Moscú: Ed. Mir.
- YAHIA, T. A., S. MIYAMOTO Y J.L STROEHLEIN (1975). **Effect of surface applied sulfuric acid on water penetration into dry calcareous soils**. *Soil Sci. Am. Proc.* 39: 1201-1204. Calcareous soils.