

Rodrigué, Marcos

*Aplicación de enmiendas en suelos sódicos de
Inriville, Córdoba*

**Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria
Facultad de Ciencias Agrarias**

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central “San Benito Abad”. Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Rodrigué, M. 2015. Aplicación de enmiendas en suelos sódicos de Inriville, Córdoba [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/aplicacion-enmiendas-suelos-sodicos.pdf> [Fecha de consulta:.....]



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA
ARGENTINA**

Facultad de Ciencias Agrarias

Ingeniería en Producción Agropecuaria

**Aplicación de Enmiendas en suelos Sódicos de Inrville,
Córdoba**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de:
Ingeniero en Producción Agropecuaria**

Autor: Marcos Rodríguez

Profesor Tutor: Ing. Agr. Claudio Romero

Fecha: 10/07/2015



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Índice

Resumen.....	3
Introducción y Objetivos.....	4
Materiales y métodos.....	8
Resultados y discusión.....	11
Conclusiones.....	16
Bibliografía.....	18
Anexos.....	20



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Resumen

Los elevados niveles de sodio generalmente originan una deficiente relación suelo-agua-aire que afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

El yeso es la enmienda mas generalizada para la corrección de la alcalinidad y altos niveles de sodio en el complejo de intercambio del suelo, aunque los resultados dependen de las particularidades de cada ambiente.

Con el fin de corregir/mitigar los efectos negativos del sodio en ambientes clase IVes del establecimiento la Redención(Inrville/Córdoba), con elevado PSI a profundidades de 30-60 cm, se plantearon líneas de experimentación a campo durante la campaña 2010-2011.

Los objetivos específicos de este trabajo incluyeron: la evaluación a corto/mediano plazo de la aplicación de yeso sobre el rendimiento de cultivos de maíz y soja; la comparación de distintos métodos de incorporación de la enmienda; y la determinación de la dosis necesaria con los distintos métodos de aplicación.

Se plantearon 2 ensayos a campo. El 1^{er} ensayo consistió en la aplicación al voleo de yeso sobre maíz y soja, sobre las 3 zonas de los lotes de costa, con dosis de 500/2000 kg yeso/ha. No se observaron diferencias significativas ($p>0.1$) en los rendimientos de los cultivos. El 2^o ensayo consistió en la incorporación de yeso con distintas metodologías: al voleo e incorporado c/subsolador sobre un lote destinado a Soja. Si bien las aplicaciones con subsolador demostraron una buena adaptación al sistema de siembra directa, con mínima remoción superficial, no se observaron efectos sobre los cultivos, ya sea debido a las dosis permitidas por cada aplicación o por las condiciones hídricas favorables de la campaña agrícola.



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Introducción y objetivos

El establecimiento “La Redención” se encuentra ubicado sobre el Río Carcarañá, a 15 Km de la localidad de Inriville, Cba. De acuerdo a la carta de suelos del INTA (1978), alrededor de un 35% de la superficie total (2025 Hectáreas) ha sido clasificada como Clase de Suelos IV_{es} a VII_{ws}, con limitaciones a la profundidad de raíces por presencia de sodio entre los 40 y 60 Cm de profundidad, y pendientes superiores al 1%.

Históricamente estos suelos fueron destinados a la producción ganadera, pero según Navarrete y otros (2005), paralelamente al proceso de agriculturización de la región, en los últimos años fueron incorporándose a la producción de grano. Sin embargo, los rendimientos de cultivos estivales como Soja y Maíz en este tipo de ambientes han presentado una marcada variabilidad interanual. En años de elevada oferta hídrica, los rendimientos resultan similares a los de tierras de mayor aptitud, mientras que en años de menor pluviometría, los rendimientos resultan entre un 30 y 50% menores que el resto de los lotes.

Esta variabilidad puede atribuirse a las limitantes físicas y químicas originadas por la presencia de sodio (Na^+). Los elevados niveles de sodio en el suelo causan numerosos efectos sobre los cultivos y el suelo. Desde el punto de vista químico, se ha comprobado que el Sodio tiende a elevar la concentración de OH^- en la solución de suelo a partir de la hidrólisis de los cationes del complejo de intercambio o de las sales presentes (Abrol y otros, 1988), aumentando los niveles de pH. Si bien en general el elevado pH no tiene un efecto adverso “per se” en el crecimiento de los cultivos, puede disminuir la disponibilidad de nutrientes esenciales. De acuerdo con Costa y otros (1999), desde el punto de vista físico, los suelos sódicos generalmente mantienen una deficiente relación suelo-aire-agua que afecta el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos. Ocasiona la dispersión de las partículas de arcilla y materia orgánica, disminuye la estabilidad y tamaño de los agregados y poros (Lebron y Otros, 2002), y afecta la movilidad de agua en el suelo (Suarez y otros, 1984). A su vez, puede disminuir la disponibilidad de macro y micronutrientes, generar toxicidad sobre las especies implantadas e impedir el crecimiento de raíces (Gambaudo y otros, 2008). El nivel crítico de sodio intercambiable que separa suelos con tendencia a la dispersión no está aún bien precisado y de acuerdo con Shainberg y otros (1984), depende del tipo de suelo, pero generalmente se asume un 15% de PSI como límite, asociado a pH superiores a 8.2 (Abrol y otros, 1980).

Sin embargo, según Taboada (2010), los efectos y persistencia del sodio en el suelo dependerán de múltiples factores, como el relieve, el drenaje limitado por la presencia de horizontes arcillosos, la influencia de napas freáticas, el tipo de sales sódicas predominantes, y la profundidad a la cual se encuentran las capas con Na^+ .

En estos ambientes de clase IV a VII, con limitada posibilidad de inclusión de sistemas ganaderos por razones empresariales, es necesario el desarrollo de estrategias específicas de planificación y manejo integral de suelos y cultivos que permitan incrementar y estabilizar la producción agrícola.



La corrección de alcalinidad y elevados contenidos de sodio intercambiable en los suelos se realiza a través del uso de enmiendas químicas. Según lo publicado por Delatorre (2000), el yeso es la enmienda más utilizada y de distribución más generalizada, y con mayor número de experiencias a nivel local (Mendoza, 1980). Los efectos del yeso sobre las propiedades de los suelos son bien conocidos: estabiliza la microestructura de las arcillas (Gardner y otros, 1992), aumenta la estabilidad de poros y agregados (Lebron y otros, 2002) y mejora la conductividad hidráulica en el suelo (Frenkel y otros, 1989). Esto se debe a las reacciones que se producen en el suelo, que pasan por la incorporación del calcio a la partícula adsorbente y la liberación del sodio a la solución. Según Delatorre (2000), la reacción del yeso puede sintetizarse:

- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sólido) ----- $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [13]
- CaSO_4 (disuelto) + 2Na-Arcilla ----- Ca^{2+} -Arcilla + Na_2SO_4 (solución)

Espinosa y otros (1995) opinan que parte de ese CaSO_4 en solución se disocia en Ca^{2+} para desplazar al Na^+ y a otros cationes, y parte del CaSO_4 que queda sin disociarse puede moverse a través del perfil a capas inferiores.

En el caso de los suelos sódicos Vles de La Redención- Inrville, Córdoba, los altos niveles de sodio se encuentran a una profundidad variable entre 30 y 60cm. Radcliffe y otros (1986) comprobaron que el yeso aplicado como enmienda, incorporado en el horizonte superficial, puede lixiviarse hasta horizontes más profundos y actuar sobre las capas limitantes a más de 50cm. Existen también experiencias locales realizadas por Costa y otros (1999), de incorporación superficial de dosis de yeso superiores a 30 tn/ha, en los cuales se observó la disminución del sodio en horizontes subsuperficiales, a más de 40cm.

La incorporación de la enmienda con labranzas en el horizonte superficial es uno de los métodos de aplicación más difundidos. Frenkel y otros (1989) encontraron que la mayor disolución efectiva de yeso, la menor cantidad de agua para el lavado y la mayor conductividad hidráulica se obtuvieron cuando el yeso fue mezclado con todo el espesor del suelo que se deseaba recuperar. En planteos de siembra directa se han realizado también experiencias exitosas con aplicaciones al voleo (Mieres, 2012), aprovechando la capacidad del yeso para moverse en el perfil, aunque otros autores (Delatorre, 2000), son de la opinión que con altos requerimientos de yeso los tiempos de recuperación podrían ser prolongados y disminuir la eficiencia de aplicación por pérdidas.

El uso de subsoladores-escarificadores modificados ha permitido la aplicación de enmiendas a profundidad (Farina, 1988), con un mínimo disturbio de la superficie del suelo. A través de la aplicación de enmiendas a profundidad se han reportado incrementos en el crecimiento de raíces y rendimientos de los cultivos, y mejoras en el movimiento de agua y la resistencia a la penetración de los suelos tratados (Mon, 2004). Utilizando enmiendas en profundidad, se han reportado también incrementos en los rendimientos de los cultivos y mejoras en las condiciones físicas del suelo en el Norte de Bs. As. y Sur de Santa Fé (Mon, 2008). En los ambientes con sodio a profundidad y elevados escurrimientos de Inrville, este tipo de aplicación de podría acelerar el proceso de recuperación de los suelos, con eficiencias mayores a las de aplicaciones al voleo, y manteniendo



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

elevados niveles de cobertura de rastrojo.

Aunque con un período de recuperación más prolongado, los aportes de materia orgánica (rastrojo, desechos animales) y la descomposición y actividad de raíces contribuyen también a disminuir el pH de los suelos por la respiración microbiana y radical, provocando un aumento en la presión parcial de CO₂ y en la solubilidad del carbonato de calcio (CaCO₃) presente en el suelo, que pasaría a reemplazar al Na⁺ del complejo de intercambio (Semple, 2003). Según Qadir (2007), esta práctica de “fitorremediación”, limitada generalmente a la actividad ganadería, puede ser combinada con la aplicación de yeso para la corrección de suelos sódicos.

La actividad de raíces y aportes de carbono y rastrojo de rotaciones agrícolas más intensas y con mayor proporción de gramíneas, que a su vez mejoren las propiedades físicas del suelo y permitan un mayor ingreso de agua, podrían potenciar el efecto del yeso en los suelos Viles bajo estudio.

Existe gran cantidad de información referente a la aplicación de enmiendas para la corrección de suelos sódicos, aunque los resultados dependen de las particularidades del ambiente en estudio. La escasa información referente a experiencias zonales en ambientes similares a los de la Redención a limitado su adopción a gran escala, y se requieren estudios locales que permitan evaluar los efectos del yeso como corrector en estos ambientes. Es necesario determinar los efectos positivos que puedan tener sobre estos suelos y los cultivos de estos sistemas productivos, así como las cantidades y dosis necesarias, de modo de determinar si se justifica o no su uso.

Los procesos de corrección de limitantes físico-químicas suelen ser prolongados, y mas aun si se trata de horizontes subsuperficiales. Se requiere desarrollar estrategias de aplicación que maximicen la eficiencia y efectividad temporal de la enmienda, adaptándose a estos sistemas agrícolas de siembra directa continua. La mayoría de las experiencias locales de aplicación en profundidad con subsoladores en siembra directa se ha realizado sobre suelos no sódicos y no se cuenta con información referente a la corrección de sodio en horizontes profundos.



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Durante la campaña 2010/2011 se iniciaron entonces líneas de experimentación a campo orientadas a corregir/mitigar los efectos negativos del sodio e ambientes clase VI_{es}. Los objetivos del trabajo fueron:

Objetivos Generales (OG) y Específicos (OE) del Proyecto

- OG 1: Avanzar en el entendimiento de las relaciones suelo-clima-cultivo de los ambientes Clase VI_{es}. (Caracterización ambiental)
 - OE 1.A: Analizar grado y tipo de limitantes presentes a escala de lote de producción.
 - OE 1.B: Diferenciar, seleccionar y caracterizar ambientes de acuerdo a limitantes.
 - OE 1.C: Zonificar ambientes de trabajo de modo de poder definir el diseño básico y ubicación de ensayos posteriores (orientación, bloqueos).
- OG 2: Corregir/Mitigar los efectos negativos del Sodio sobre los sistemas de producción
 - OE 2.A: Evaluar el efecto a corto plazo de la aplicación de yeso sobre el rendimiento de los cultivos.
 - OE 2.B: Comparar la efectividad temporal de distintos métodos de aplicación de yeso sobre el cultivo y sobre el suelo.
 - OE 2.C: Encontrar dosis de respuesta de enmienda con distintos métodos de aplicación.

Materiales y Métodos

El proyecto se dividió en dos etapas para poder desarrollar los 2 objetivos generales que se plantearon con anterioridad:

Etapas 1: Entendimiento de las relaciones suelo-clima-cultivo de los ambientes Clase VI_{es}. (Caracterización ambiental)

El análisis se circunscribió al establecimiento “La Redención” (32° 54’ 25” S; 62° 15’ 47” W), ubicado a 15 km de la localidad de Inriville, Córdoba. Se seleccionaron los lotes ubicados en la sección Sur del establecimiento, en cercanía a la costa del río Carcarañá, siendo representativos de la problemática zonal. (Fig. 1)

La información básica de suelos y descripción de series representativas se tomaron de la carta de suelos de la provincia de Córdoba, HOJA MARCOS JUÁREZ 3363-17 1 (perfiles en ANEXO). Esta información se integro con el análisis de imágenes satelitales por índice verde (NDVI) de 7 campañas agrícolas (2003 a 2010) y mapas de rendimientos de 2 campañas agrícolas (2008-2009) para identificar zonas contrastantes en cada lote. Se realizaron calicatas hasta 1,5 metros de profundidad en cada zona para la diferenciación y descripción de horizontes a campo (Instituto de suelos INTA Castelar, M. Taboada-R. Gil) y la identificación de limitantes edáficas para los cultivos.

Una vez delimitada estas zonas, se realizaron muestreos dirigidos de parámetros físicos y químicos de los suelos de cada zona.

Se tomaron muestras compuestas de suelos (15 submuestras por muestra) cada 20 cm hasta 1 metro de profundidad en cada zona diferenciada, para su análisis en laboratorio. Los análisis químicos incluyeron: Materia orgánica (% Walkley-Black), Nitrógeno total (% Kjeldahl), Nitrógeno como nitratos (ppm), Fósforo (P Bray -1, ppm, hasta 60 cm), Azufre (S-Sulfatos, ppm, a 20 cm), pH (en agua 1:2,5), Conductividad eléctrica (dS/m, suelo agua 1:2,5) y porcentaje de sodio intercambiable (% PSI)

Los análisis físicos iniciales estuvieron orientados a determinar la capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Se determinó la granulometría/textura de cada horizonte hasta 1 metro (método de la pipeta). Utilizando funciones de



Figura 1. Establecimiento La Redención. Inriville, Sudeste de Córdoba. Lotes de costa del Río Carcarañá remarcados



pedotransferencia de Saxton y Rawles (2006), se estimaron las constantes hídricas de capacidad de campo y punto de marchitez a partir de los datos texturales y contenidos de materia orgánica, de modo de poder estimar la lámina de agua útil total (AUT) hasta la aparición de limitantes. El AUT (mm) fue por lo tanto calculado como: $[AUT: (O_{CC} - O_{PMP}) \times Z]$ donde O_{CC} corresponde a la humedad volumétrica en capacidad de campo (cm^3/cm^3), O_{PMP} corresponde a la humedad volumétrica en punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3), y Z representa la profundidad máxima de enraizamiento determinada por la aparición de sodio en valores limitantes (mm).

Etapas 2: Aplicación de enmiendas en suelos sódicos

Para este proyecto, se plantearon dos líneas de ensayo a investigar:

- Ensayo A: Efecto de la aplicación de yeso al voleo según la rotación.
- Ensayo B: Métodos de aplicación de Yeso.

Ensayo A: Efecto de la aplicación de yeso al voleo según la rotación.

a. Localización, diseño y tratamientos

El ensayo se llevo a cabo en lotes de producción de historia similar, ubicados sobre la zona costera del río carcarañá del establecimiento La Redención, representativos de la problemática zonal de altos niveles de sodio a profundidad variable (25-60 cm).

Para el ensayo A, se plantea una serie de 4 ensayos, cada uno de ellos con un Diseño en Bloques completamente aleatorizado (DBCA) de tres repeticiones, en franjas de 30 metros de ancho y 500 metros de largo, realizados 2 de ellos en un cultivo de Soja 1ª y los otros 2 en un cultivo de Maíz 1ª de siembra tardía. Dentro de cada cultivo, un ensayo se realizara en sectores mas afectados por presencia de Sodio (Zona 2), mientras que el otro se realizara en sectores sin limitantes edáficas (Zona 1). Para el ensayo, se empleara yeso de 95-98% de pureza, en forma sólida (granulado-escamado). Se definieron tres tratamientos con el siguiente diagrama de tratamientos por bloque de ensayo:

Diagrama

Id			
A	1	2	3
B	2	3	1
C	3	1	2

Tratamientos

Numero	Id	Dosis Yeso
1	T0	0 Kg/Ha
2	T 500	500 Kg/Ha
3	T 1000	1000 Kg/Ha



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

b. Análisis Estadístico

Para los diseños en T0 apareado, las diferencias entre tratamientos se analizaron a través de modelos lineales mixtos generalizados. Los rendimientos fueron corregidos de acuerdo al rendimiento del T0 adyacente:

$$\text{Rinde} = \text{Rinde trat.} / \text{Rinde T0 ady.} \times \text{promedio de T0}$$

Ensayo B:

a. Localización, diseño y tratamientos

El ensayo se llevo a cabo en lotes de producción de historia similar, ubicados sobre la zona costera del río carcarañá del establecimiento La Redención, representativos de la problemática zonal de altos niveles de sodio a profundidad variable (25-60 cm).

Para el ensayo B, se estableció un DBCA de 4 repeticiones, en franjas con un largo de 100 metros y un ancho de 56 metros. Se evaluaron distintos métodos de aplicación de enmienda: al voleo, aplicada en profundidad con subsolador. Se evaluaron también los laboreos sin aplicación de enmiendas para descartar posibles efectos debidos a la remoción del suelo.

Se utilizó como enmienda yeso sólido ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, granulado-escamado, 95% de pureza). La aplicación al voleo se realizó con fertilizadora, con una dosis de aproximadamente 1000 kg yeso/ha. La aplicación en profundidad o inyectado se realizó con un subsolador adaptado con un dosificador para aplicación de enmiendas, con 4 escarificadores a una distancia de 70cm entre sí. Se depositó el producto a una profundidad entre 20 y 30cm, en una banda de aproximadamente

0.05m de ancho. La dosis máxima permitida por los dosificadores fue de 250 kg/ha. El diagrama del tratamiento fue el siguiente:

Diagrama

Id				
A	1	2	3	4
B	4	1	2	3
C	3	4	1	2
D	2	3	4	1

Tratamiento

Numero	Id	Aplicación	Yeso (Kg/Ha)
1	T0	Testigo	0
2	V + S	Voleo + Subsolador	1000 + 250
3	S	Subsolador	250
4	S	Subsolador	0

Resultados y discusión

Los lotes seleccionados presentan un predominio de los complejos MJ6 (clase IIes, 90% Serie Marcos Juárez – 10% Serie Río Tercero) y RT4 (clase VIes, 30% Serie Marcos Juárez – 70% Serie Río Tercero), (Fig. 2.A). La interpretación de los análisis de NDVI promedio 2003-2010 junto con mapas de rendimiento 2008-2009, y con el posterior reconocimiento de perfiles a campo, permitieron delimitar 3 zonas:

- Zona 1 con predominio de suelos serie Marcos Juárez (clase IIes)
- Zona 2 con suelos similares a la serie Río Tercero (clase VIes)
- Zona 3 con predominio de serie Río Tercero, pero ubicada en las cercanías de la terraza del río, que recibe los escurrimientos de las zonas anteriores de mayor altura relativa (Fig. 2.B.)

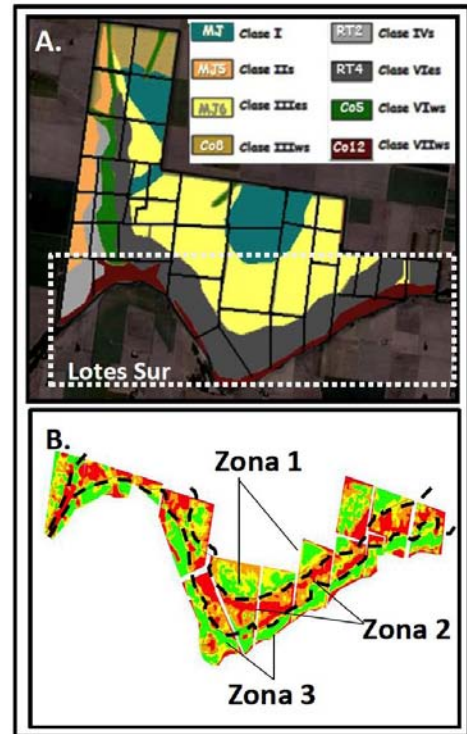


Figura 2.A. Tipos de suelo predominantes en Est. La Redención.

Figura 2.B. Ambientes diferenciados en lotes de costa del Río Carcarañá de acuerdo a NDVI promedio 2003-2010 y mapas de rendimiento 2008-2009

Se observaron ciertas diferencias con respecto a la descripción del perfil correspondiente a la serie Río Tercero (p.ej. ausencia de horizonte A2), y a su vez los análisis químicos posteriores difirieron de los valores presentados en la carta.

Las tablas 1 y 2 presentan los resultados de los muestreos químicos cada 20 cm de dos lotes representativos (lotes 3C y LS). Se destaca en la zona 2 de ambos lotes la presencia de sodio en niveles limitantes (Micheloud, 2004), porcentaje de sodio intercambiable, PSI >15% y pH superiores a 8 en profundidades desde 30 a 60 cm. Los % de sodio se incrementan en profundidad. Para la zona 3, los niveles de sodio resultaron similares a la zona 2, pero apareciendo a una profundidad menor (20 cm). Los niveles de conductividad eléctrica no superaron los 0,25 dS/m en los horizontes analizados (en contraposición con lo descripto por la carta de suelos para la serie Río Tercero).



Tabla 1. Análisis químico por horizonte. Zona 1 y Zona 2. Lote 3C. La Redención, Inrville.

ZONA 1								ZONA 2							
Profundi dad	MO	N- Nitratos	P	S-SO ₄	pH	Ce	PSI	MO	N- Nitratos	P	S-SO ₄	pH	Ce	PSI	
(cm)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	()	(dS/m)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	()	(dS/m)	(%)	
0 - 20	2.30	6.5	15.8	7.6	5.90	0.09	2.2	1.99	5.9	18	7	5.9	0.09	8.8	
20 - 40	1.98	5.5	7.1	-	5.9	0.09	1.7	162	4.8	7.4	-	6.8	0.18	16.8	
40 - 60	0.93	3.1	4.9	-	6.2	0.09	2.3	0.93	4.6	5.3	-	7.6	0.29	23.6	
60 - 80	0.56	3.1	7.3	-	6.4	0.08	2.3	0.31	5.0	12.2	-	8.1	0.56	41.1	
80 - 100	0.37	3.1	10	-	6.6	0.07	2.5	0.12	6.2	22.1	-	8.9	1.02	58.7	

Tabla 2. Análisis químico por horizonte. Zona 1 y Zona 2, Lote LS. La Redención, Inrville.

ZONA 1							ZONA 2					
Profundidad	MO	N-Nitratos	Fósforo	pH	Ce	PSI	MO	N-Nitratos	Fósforo	pH	Ce	PSI
(cm)	(%)	(ppm)	(ppm)	()	(dS/m)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	()	(dS/m)	(%)
0 - 20	1.92	6.4	9.5	5.7	0.12	2.5	2.06	4.2	12.6	6.2	0.13	11.6
20 - 40	0.94	5.0	7.4	5.9	0.13	3.7	1.49	4.3	7.4	7.0	0.26	28.1
40 - 60	0.54	4.0	5.8	6.5	0.15	6.3	0.56	3.6	6.9	8.1	0.57	40.7
60 - 80	0.29	4.3	6.9	7.0	0.13	8.6	0.31	4.3	20.8	8.6	1.18	64.0
80 - 100	0.08	2.8	9.1	7.3	0.07	2.5	0.19	4.3	23.5	9.0	1.47	74.6

Los análisis de granulometría arrojaron valores similares a los descriptos en la carta de suelos (Resultados en Anexo, Tablas 4-6), sin mayores diferencias en los contenidos de arena, arcilla y limo entre zonas. Las texturas resultaron predominantemente franco-limosas en los distintos horizontes. La estructura de agregados observada en las calicatas mostró una alta correlación con los niveles de sodio de los muestreos, observándose estructuras columnares y baja proporción de raíces a partir de los 40-50 cm en la zona 2 y a partir de los 25-30 cm en la zona 3.

La estimación de capacidad de campo y punto de marchitez por funciones de pedotransferencia a partir de la textura (Saxton, 2006), permitió calcular la lámina de agua útil total (AUT,mm) hasta la profundidad de aparición de limitantes químicas (Tabla 3). La mayor capacidad de almacenaje de agua útil corresponde a la zona 1 de suelos clase III, sin limitantes hasta

Tabla 3. Capacidad de almacenaje de agua útil hasta aparición de limitantes. Ambientes clase III y VI. La Redención, Inrville.

Parámetro	Zona 1	Zona 2	Zona 3
	Clase III	Clase VI	Clase VI. Escurremientos
Z (cm): Profundidad hasta aparición de Sodio	200 +	40-60	20-30
AUT (mm): Agua útil hasta profundidad máxima	335	102	70
UC (mm): Umbral crítico o agua Fácilmente disponible	168	51	35

los dos metros de profundidad. La capacidad de almacenaje de las zonas 2 y 3 (clase VI) represento un 30 a 20% de lo estimado en la zona clase III.

Las características físico-químicas de los ambientes diferenciados y su interacción con la dinámica del agua quedan de manifiesto al analizar las imágenes de NDVI de dos campañas contrastantes desde el punto de vista climático, como el 2009 (campaña seca) y el 2010 (campaña húmeda) (Fig. 3 A y B). Las imágenes muestran como en periodos secos y de alta demanda, como enero de 2009, se genera una importante variabilidad en la expresión de los cultivos dentro de los lotes. Se marca un patrón que corresponde a los suelos con predominio de elevados contenidos de sodio. En cambio, en periodos húmedos como enero 2010, las diferencias dentro y entre lotes se atenúan. El grado de limitación estará fuertemente influido por las condiciones climáticas de la campaña

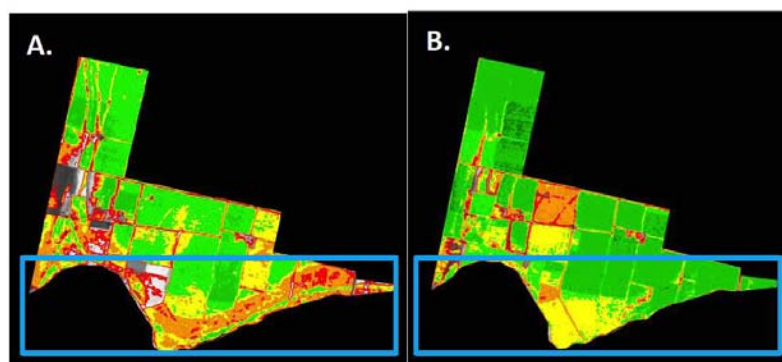
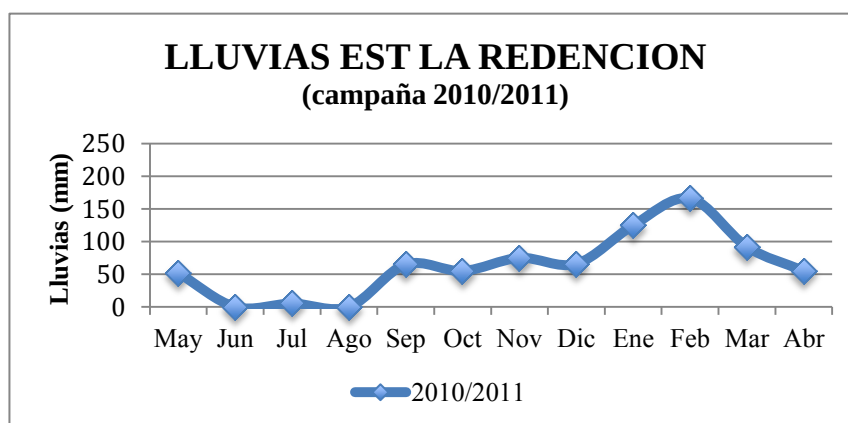


Figura 3 A y B. Análisis de índice verde (NDVI) en una campaña seca (Enero 2009, A) y húmeda (Enero 2010, B). Las zonas verdes presentan mejor desarrollo y rendimiento de cultivos, y las zonas rojas representan las de peor condición.

Dado que la dinámica del agua es un factor elemental para determinar el grado de limitante que produce el sodio sobre los cultivos, se llevo un seguimiento de las precipitaciones que ocurrieron a lo largo de la campaña 2010-2011, las cuales pueden observarse en el siguiente grafico.



Dado que los ensayos de Soja y Maíz se sembraron en el primer decenio del mes de Diciembre de 2010, el periodo crítico de ambos cultivos, esto es 10 días antes y 20 días después de la floración, ocurrió en el mes de Febrero, siendo este mes excepcionalmente llovedor y favorable para el desarrollo de los mismos, asemejándose a las condiciones climáticas ocurridas en la campaña 2009-2010.

Ensayo 1. Efecto de la aplicación periódica de yeso al voleo según la rotación

Los rendimientos de cosecha mecánica de soja y maíz (ajustados de acuerdo a los rendimientos de los testigos) no evidenciaron diferencias significativas por la aplicación de enmienda, considerando los distintos ambientes atravesados en el ensayo (Tabla 4)

Si bien las diferencias tampoco resultaron significativas dentro de cada zona con los análisis y niveles de significancia utilizados ($p > 0.1$), es necesario destacar que los rendimientos de soja tendieron a superar al testigo en la zona mas restrictiva (Zona 2) en aproximadamente 3 qq/ha (+10,9%), con aplicaciones de 1000 Kg yeso/ha. Este incremento resulto superior al coeficiente de variación observado en las franjas testigo en esta zona (Fig. 4). Una tendencia similar se observo en el caso del maíz, aunque con menores incrementos relativos que en soja (sin diferencias significativas entre dosis dentro de cada zona), con incrementos cercanos a los 6 qq/ha en la zona 2 con aplicaciones de 1000 Kg/ha, superando la variación de los testigos. (Figura 5)

Tabla 4. Rendimiento de cosechadora de soja y maíz de acuerdo a la dosis de aplicación de yeso, campaña 2010-2011, en suelos predominio clase VIes (promedios zona 1 y 2). Inrville, Cba.

Tratamiento	Soja 1		Maíz 1	
	Rendimiento (Kg/ha)	CV (%)	Rendimiento (Kg/ha)	CV (%)
T 0 Kg/ha	2968 a	4,49	10820 a	8,65
T 500 Kg/Ha	2845 a	10,99	10911 a	1,89
T 1000 Kg/ha	3096 a	1,97	10915 a	1,10

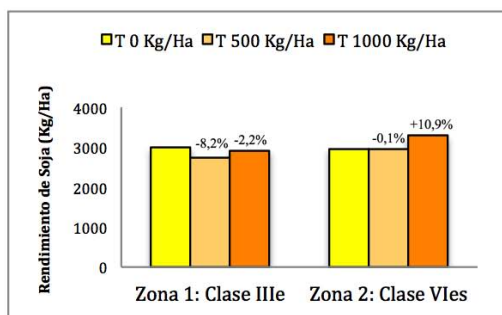


Figura 4. Rendimiento en Soja 1 según la dosis de aplicación de yeso, 2010-2011. Inrville, Córdoba.

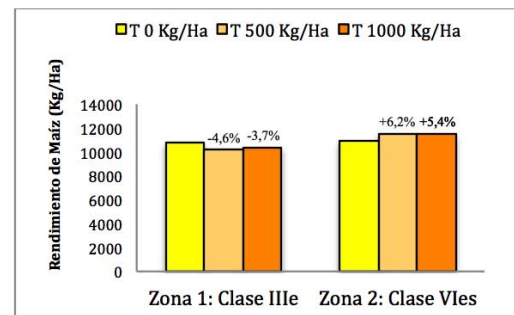


Figura 5. Rendimiento en Maíz 1 según la dosis de aplicación de yeso, 2010-2011. Inrville, Córdoba.

Ensayo 2. Métodos de aplicación y dosis de respuesta

No se observaron diferencias significativas en los rendimientos de soja ($p > 0.1$) entre métodos de aplicación o con respecto al testigo (Fig. 6). Al igual que en el ensayo 1, es probable que las cantidades totales de yeso aplicado resulten insuficientes para generar algún impacto en el plazo de una campaña. Solo la aplicación de yeso al voleo + inyectado (sumando una dosis total de 1200 Kg/ha) tendió a superar al tratamiento testigo, aunque sin diferencias estadísticamente significativas. Aún con altas concentraciones de yeso en la banda, la adición de 260 Kg yeso/ha en profundidad con el subsolador no mostro ventajas si lo comparamos con el pasaje del implemento sin aplicar yeso, o con el tratamiento testigo. Deberían evaluarse modificaciones en los dosificadores del implemento, de modo de elevar la dosis aplicada.

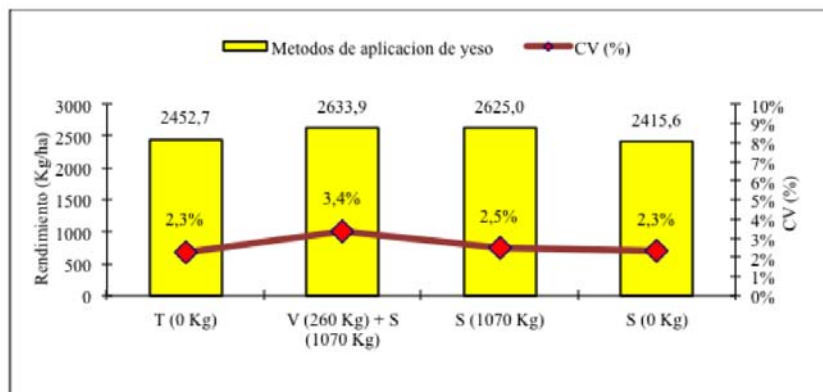


Figura 6. Rendimiento en soja 1 según método de aplicación de yeso, 2010-2011. Inrville, Cba
T: Testigo, V: Voleo, S: Subsolador



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Conclusiones

Caracterización ambiental

La caracterización ambiental permitió avanzar en el entendimiento del grado y tipo de limitantes presentes a escala de lote de producción. La información suministrada por los mapas de rendimiento, junto a los análisis de NDVI, permitieron identificar las zonas donde había mermas de rendimiento de los cultivos, y en esas zonas hacer análisis físicos y químicos que permitieron identificar cuales eran las limitantes que presentaban esos sectores.

Los niveles de sodio se encontraron sobre los umbrales críticos para los cultivos ($PSI > 15\%$) a profundidades entre 25 y 60 cm. No se detectó influencia de napa freática.

A diferencia de lo indicado en la carta de suelos, los análisis de salinidad no indicaron limitaciones. Se observaron también ciertas diferencias con respecto a la descripción del perfil correspondiente a los suelos sódicos de la serie Río Tercero (p.ej ausencia del horizonte A2).

Por otra parte, los análisis texturales permitieron determinar las constantes hídricas, las que, junto a la profundidad de la limitante, permitieron determinar la capacidad de agua útil de los suelos.

La profundidad de aparición del sodio y la posición en el relieve permitió separar con precisión ambientes dentro de los lotes sódicos, que se utilizaron posteriormente para el diseño, ubicación de ensayos y direccionamiento de muestreos.

Ensayos

Tanto el ensayo de dosis de yeso, como el de métodos de aplicación, no mostraron respuestas estadísticamente significativas ante la aplicación de yeso. Una de las explicaciones para esto, es que durante la campaña 2010-2011, hubo un régimen de precipitaciones superior a la media en los meses de periodo crítico para el desarrollo de los cultivos (alrededor de floración), y al ser el Sodio un factor limitante de la disponibilidad de agua, su efecto se reduce si hay abundancia de la misma.

Con respecto a la aplicación de yeso al voleo, si bien el método de aplicación permitió realizar ensayos con altas dosis de yeso, al encontrarse el sodio a 40 cm, parte del yeso sin disociarse debe moverse a profundidades para actuar como corrector. Es esperable entonces que la mejora de estos suelos lleve un plazo prolongado, de una duración mayor a 1-2 años.

Por otra parte, la aplicación de yeso en profundidad a través de escarificadores/subsoladores, si bien ha mostrado resultados positivos en otras experiencias, en general incluyeron aplicaciones de 0.6 a 1 Tn/ha con implementos similares al utilizado en el ensayo en la redención, por lo que sería conveniente realizar modificaciones a los dosificadores de modo de aumentar la dosis aplicada. El pasaje de este implemento en las condiciones del ensayo demostró una adecuada adaptación al sistema de siembra directa planteado,



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

manteniendo niveles aceptables de cobertura vegetal, por lo que podría convertirse en una opción en caso de observarse efectos positivos del yeso en los horizontes sódicos.

Si bien los efectos de la enmienda sobre los rendimientos de los cultivos en la misma campaña no resultaron significativos, se observó una tendencia al incremento en la producción del grano, especialmente en soja, con aplicaciones elevadas de yeso. Los niveles de MO, SO_4^{4-} y saturación de calcio de los análisis de suelo indican que estos ambientes podrían presentar respuesta a la aplicación de azufre y calcio en cultivos como la soja



Bibliografía

- Abrol, I. P.; Yadav, J. S. P.; Massoud, F. I. (1988), Salt-affected soils and their management, *FAO Soils Bulletin*. 39 (1): 93-94
- Abrol, I. P.; Chhabra, R.; Gupta, R. K. (1980), A fresh look at the diagnostic criteria for sodic soils. 21 (1): 142-147.
- Costa, J. L.; Godz, P. (1999), Aplicación de yeso a un natracuol del sudeste de la pampa deprimida, *Ciencia del Suelo*. 17 (2): 21-27
- Delatorre, J. (2000), Salinidad de agua y suelos, Primer Seminario Internacional Fertirriego. Santiago, Chile
- Espinosa, J. (1995), Acidez y encalado de los suelos. *Informaciones Agronómicas (INPOFOS)*. 20 (1): 6-14.
- Farina, M. P. W.; Channon, P. (1988), Acid-subsoil amelioration: I. Comparison of several mechanical procedures. *Soil Science Society of America Journal*. 1 (52): 169-175.
- Frenkel, H.; Gerstl, Z.; Alperovitch, N. (1989), Exchange- induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils. *Soil Science Society of America Journal*. 40 (1): 599-611.
- Gambaudo, S.; Fontanetto, H.; Beccaría, G.; Boretto, D.; Albrecht, J.; Tron, L. (2008), Recuperación de suelos halomórficos mediante agricultura de precisión, INTA Rafaela. Información Técnica cultivos de verano, Campaña 2008. Publicación Miscelánea N° 112.
- Gardner, W. K.; Fulton, M. C.; Flood, R. G. (1992), Reclamation of failed subsurface drainage system on unstable clay soil. *Australian Journal of experimental agriculture*. 31 (1): 93-97.
- INTA, (1978), Carta de suelos de la Republica Argentina, HOJA 3363-17 Marcos Juarez. Convenio INTA-SEAG. Buenos Aires, ISAG.
- Lebron, I.; Suarez, D. L.; Yoshida, T. (2002), Gypsum Effect on the Aggregate Size and Geometry of Three Sodic Soils Under Reclamation, *Soil Science Society of America journal*. 66 (1): 92-98.
- Mendoza, R. E.; Barberis, L. A. (1980). Efecto del agregado de yeso y el lavado a un suelo sódico de la depresión del Río Salado y su repercusión sobre la producción de “*Lolium perenne*” L. *INTA serie RIA*. 2 (15): 297-304
- Micheloud, H.; Gambaudo, S. (2004). Materiales para la corrección de suelos halomórficos. *Fertilizar*. 34 (1): 4-7.
- Mieres, L.; Campos R. R.; Oprandi, G. O.; Colombo, F.; Rotela, F.; Parodi, M. I.; Gambaudo, S. (2012), Diagnóstico y rehabilitación de suelos halomórficos. *INTA, Ecos y Voces*. 29 (1): 14-17



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

- Mon R. Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda (Tesis de doctorado). Universidad de Coruña (2008)
- Mon, R.; Irurtia, C. (2004). Recuperación de la productividad de suelos degradados mediante el subsolado y el agregado de yeso. Actas del XIX. Congreso Argentino de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná. Entre Ríos. Argentina.
- Navarrete, D. M.; Gallopín, G.; Blanco, M.; Díaz-Zorita, M.; Ferraro, D.; Herzer, H.; Laterra, P.; Morello, J.; Murmis, M. R.; Pengue, W.; Piñeiro, M.; Podestá, G.; Satorre, E. H.; Torrent, M.; Torres, F.; Viglizzo, E.; Caputo, M. G.; Celis, A. (2005), Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extra-pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas, CEPAL - SERIE Medio ambiente y desarrollo. 118 (1): 7-9
- Radcliffe, D. E.; Clark, R. L.; Sumner, M. E. (1986), Effect of gypsum and deeprooting perennials on subsoil mechanical impedance. Soil Science Society of America Journal. 6 (50): 1566-1570.
- Saxton, K. E.; Rawls, W. J. (2006), Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society of America journal. 70 (1): 1569–1578
- Semple, W. S.; Cole, I. A.; Koen, T. B. (2003), Performance of some perennial grasses on severely salinized sites on the inland slopes of New South Wales. Australian Journal of Experimental Agriculture. 1 (43): 357-371
- Shainberg, I.; Singer, M. J. *Response of soil to sodic and saline conditions*. In Wallender, W. W.; Tanji, K. K. (ed.) *Agricultural Salinity Assessment and managment*. American Society of Civil Engineers, 2nd Edition, 1984, pages 139-168
- Suarez, D. L.; Rhoades, J. D. ; Lavado, R.; Grieve, C. M. (1984), Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersión, Soil Science Society of America journal. 48 (1): 50–55
- Taboada, M. A. (2010), Diferenciación y aptitud de uso de los suelos salinos-sódicos. Suelos salinos. AER Laboulaye, Córdoba.
- Qadir, M.; Oster, J. D.; Schubert, S.; Noble, A. D.; Sahrawat, K. L. (2007), Phytoremediation of sodic and saline sodic soils. *Advances in Agronomy*. 1 (96): 197-247.



Anexos

Análisis de Suelos

Tabla A. Textura por horizonte. Zona 1 (Clase IIIe)

Profundidad (Cm)	% Arcilla	% Arena Fina	% Arena Gruesa	% Limo	Clasificacion
0 - 20	22,0%	13,5%	0,5%	64,0%	Franco Limoso
20 - 40	30,0%	13,9%	0,4%	55,7%	Franco Limo Arcilloso
40 - 60	28,0%	14,8%	0,4%	56,8%	Franco Limo Arcilloso
60 - 80	22,0%	15,5%	0,4%	62,1%	Franco Limoso
80 - 100	20,0%	15,9%	0,8%	63,3%	Franco Limoso

Tabla B. Textura por horizonte. Zona 2 (Clase VIes, con pendiente)

Profundidad (Cm)	% Arcilla	% Arena Fina	% Arena Gruesa	% Limo	Clasificacion
0 - 20	18,0%	17,5%	0,8%	63,8%	Franco Limoso
20 - 40	26,0%	13,5%	0,6%	59,9%	Franco Limoso
40 - 60	28,0%	13,4%	0,6%	58,0%	Franco Limo Arcilloso
60 - 80	27,0%	14,1%	0,5%	58,4%	Franco Limo Arcilloso
80 - 100	24,0%	15,4%	0,4%	60,2%	Franco Limoso

Tabla C. Textura por horizonte. Zona 3 (Clase VIes)

Profundidad (Cm)	% Arcilla	% Arena Fina	% Arena Gruesa	% Limo	Clasificacion
0 - 20	23,0%	9,2%	0,6%	67,2%	Franco Limoso
20 - 40	19,0%	12,0%	0,8%	68,2%	Franco Limoso
40 - 60	21,0%	12,1%	1,4%	65,5%	Franco Limoso
60 - 80	24,0%	16,5%	2,0%	57,4%	Franco Limoso
80 - 100	18,0%	16,5%	2,0%	63,4%	Franco Limoso



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Complejos y series de suelo. Carta de suelos INTA, Hoja Marcos Juárez 3363-17

Complejo MJ6:

- Complejo en fase ligera a severamente erosionado
- 90% serie marcos Juárez, 10% serie Río Tercero
- Capacidad de uso: IIIs
- Suelos con limitaciones severas por erosión laminar y en surcos, asociados con suelos moderadamente afectados por salinidad.

Serie MARCOS JUÁREZ

DATOS ANALÍTICOS DEL PERFIL TÍPICO

Situación: Latitud 32°35' S

Longitud 62°05' O

Altitud 107

Horizonte	Ap	B1	B21t	B22t	B3	C1	C2ca
Profundidad de la muestra, cm	4-14	19-26	29-40	52-64	74-85	95-112	140-160
Materia orgánica, %	3,26	2,23	1,20	0,68	0,34	0,27	0,10
Carbono orgánico, %	1,9	1,3	0,7	0,4	0,2	0,16	0,06
Nitrógeno total, %	0,18	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	
Relación C/N							
Arcilla, 2 µ, %	25,1	27,1	34,5	32,1	25,2	19,3	16,3
Limo, 2-50 µ, %	68,9	60,3	58,4	62,7	63,1	71,2	66,4
Arena muy fina, 50-100 µ, %	5,4	12,0	6,4	4,7	11,1	8,7	11,3
Arena fina, 100-250 µ, %	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6	0,8	1,1
Arena media, 250-500 µ, %							
Arena gruesa, 500-1.000 µ, %							
Arena muy gruesa, 1-2 mm, %							
Calcáreo, CaCO ₃ , %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
Equivalente de humedad, %	28,1	29,1	30,3	29,8	27,4	25,6	23,7
pH en pasta	6,0	6,4	6,5	6,5	6,9	7,0	7,8
pH en agua 1:2,5	6,4	7,0	6,9	7,1	7,3	7,7	8,3
Cationes de intercambio, m.e./100 gr:							
Ca ⁺⁺	10,4	11,6	14,0	15,3	13,7	13,1	
Mg ⁺⁺	4,3	4,4	5,2	5,4	4,9	5,2	
Na ⁺	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3
K ⁺	2,6	2,1	2,1	2,3	2,4	2,5	2,7
H ⁺	6,9	6,2	5,8	5,0	3,8	2,7	
Na ⁺ , % del valor T							
Conduct. (mmhos/cm)							
Suma de bases m.e./100 gr (S)	17,5	18,4	21,6	23,3	21,4	21,2	
Capacidad de intercambio catiónico, m.e./100 gr (T)	19,3	20,4	24,4	24,7	20,4	21,4	16,5
Saturación con bases, % (S/T)	91	90	89	94	100	99	



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Complejo RT4:

- Esta unidad ocupa la mitad inferior de las pendientes hacia la margen norte del río Carcarañá, donde el escurrimiento se hace más rápido, y los suelos que integran este complejo presentan ligeros truncamientos y en ciertos sectores pérdidas importantes de la capa superficial por arrastre.
- 30% serie Marcos Juárez – 70% Río Tercero
- Suelos con limitaciones graves por erosión laminar y en surcos, asociados con suelos moderadamente afectados por salinidad.
- Capacidad de Uso: VI es

Serie RÍO TERCERO

DATOS ANALÍTICOS DEL PERFIL TÍPICO

Situación: Latitud 32°45' S

Longitud 62°30' O

Altitud 110 m

Horizonte	Ap	A12	A2	B21t	B22t	B3ca	Cca
Profundidad de la muestra, cm	4-13	14-23	23-32	37-52	59-73	90-103	115-125
Materia orgánica, %	2,87	1,96	1,19	0,73	0,40	0,18	0,10
Carbono orgánico, %	1,677	1,143	0,698	0,431	0,240	0,112	0,060
Nitrógeno total, %	0,150	0,115	0,0856	0,0789	0,060	0,036	0,039
Relación C/N	11	10	8	5	4	3	1
Arcilla, 2 µ, %	18,2	19,5	20,1	30,2	25,1	20,7	16,9
Limo, 2-50 µ, %	61,6	60,1	56,6	54,0	52,6	53,3	53,6
Arena muy fina, 50-100 µ, %	19,6	19,9	22,2	15,2	21,1	22,8	23,2
Arena fina, 100-250 µ, %	0,6	0,5	1,1	0,6	0,9	1,0	2,3
Arena media, 250-500 µ, %					0,3	0,3	0,4
Arena gruesa, 500-1.000 µ, %							
Arena muy gruesa, 1-2 mm, %							
Calcáreo, CaCO ₃ , %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	3,6
Equivalente de humedad, %	24,2	25,4	23,7	27,5	26,0	24,4	23,3
pH en pasta	5,5	5,7	5,9	6,3	7,7	7,8	6,6
pH en agua 1 : 2,5	6,5	6,4	7,1	7,3	8,2	8,6	7,6
Cationes de intercambio, m.e./100 gr:							
Ca ⁺⁺	8,8	8,8	6,8	9,3	6,9		
Mg ⁺⁺	2,8	4,4	3,9	7,3	5,5		
Na ⁺⁺	0,3	0,5	0,8	2,6	7,4	11,3	4,1
K ⁺	2,8	2,3	2,1	3,0	3,0	3,1	3,0
H ⁺	7,3	6,0	4,5	3,9			
Na ⁺ , % del valor T			5,2	10,8	35,5	59,0	26,5
Conduct. (mmhos/cm)					25,9	20,4	11,5
Suma de bases m.e./100 gr (S)	14,7	16,0	13,6	21,2	22,8		
Capacidad de intercambio catiónico, m.e./100 gr (T)	17,5	18,0	15,2	23,9	20,9 (x)	19,2 (x)	17,4 (x)
Saturación con bases, % (S/T)	84	89	90	89	100		



UCA

Facultad de Ciencias Agrarias

Imágenes



Figura 7. Calicata realizada en zona 2 (Clase Vles) del establecimiento La Redención, Inrville, Córdoba.



Figura 8. Subsolador con dosificador para aplicación de enmienda en profundidad, utilizado para el ensayo de métodos de aplicación.