



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

PROPIEDADES FISICAS DE SUELOS SODICOS, SU IMPACTO EN EL
CRECIMIENTO Y ABSORCION RADICAL EN EL CULTIVO DE MAIZ
(*Zea mays* L)

MARCOS FEDERICO PITA

Trabajo Final
para optar al Grado Académico de
Especialista en Producción de Cultivos Extensivos

Córdoba - 2017

PROPIEDADES FISICAS DE SUELOS SODICOS, SU IMPACTO EN EL
CRECIMIENTO Y ABSORCION RADICAL EN EL CULTIVO DE MAIZ
(*Zea mays* L)

MARCOS FEDERICO PITA

Tutor: DR. (ING. AGR.) OMAR A. BACHMEIER

**Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Tribunal
Evaluador**

Nombre revisor	Antonio Aoki, MSc., Ing. Agr.
Nombre revisor	Juan P. Giubergia, MSc., Ing. Agr.
Nombre revisor	Marcelo G. Cantarero, MSc., Ing. Agr.

Presentación Formal Académica

23 de Junio de 2017
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Córdoba

Este humilde trabajo se los dedico a mis hijos Fausto y Felipe.

AGRADECIMIENTOS

A Adriana Rollán y Omar Bachmeier, los cuales fueron mis motivadores para el estudio de la ciencia del suelo y buenos amigos a lo largo de este camino.

A mi esposa Verónica por el apoyo en el desarrollo de esta tesis.

A mis Padres, Abuelos y Hermanos que de distintas maneras fueron pilares en mi desarrollo personal.

A los productores que me permitieron realizar este trabajo

A Claudia Vega por los consejos para la realización de este trabajo.

LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2. OBJETIVO ESPECIFICO	3
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
2.1. META-ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	4
2.2. EXPERIMENTACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS	4
3. RESULTADOS.....	6
3.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	6
3.2. LA INFILTRACIÓN EN SUELOS SÓDICOS	7
3.3. REDISTRIBUCIÓN DE AGUA DENTRO DEL SUELO.....	10
3.4. RESISTENCIA MECÁNICA	13
4. MANEJO AGRONÓMICO FRENTE A ESTA PROBLEMÁTICA Y ALGUNAS CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA.	22
4.1. EMPLEO DE YESO COMO ENMIENDA.....	22
4.2. EFECTOS DEL USO DEL PARATIL	25
4.3. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN	27
CONSIDERACIONES FINALES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Umbrales actuales y antiguos para definir salinidad y sodicidad en los suelos.

Tabla 2. Datos de algunas propiedades físicas y químicas de suelos analizados en este trabajo.

Tabla 3. Determinación de humedad gravimétrica hasta los 2 m de profundidad, en dos puntos dentro de un mismo lote, los cuales poseen valores de infiltración básica contrastantes. Círculo 1 y círculo 2 con valores de infiltración básica de 109 mm h^{-1} y 5 mm h^{-1} respectivamente.

Tabla 4. Textura, CaCO_3 , Materia Orgánica (MO), Capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de los suelos del ensayo de Lebron *et al.* (2002), en sus condiciones naturales.

Tabla 5. Parámetros físicos y químicos de un lote sometido a ensayo con tratamiento de arado de paratil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de puntos representativos de estudios sobre una imagen de Google Earth.

Figura 2. Efecto del PSI y yeso en la tasa de infiltración de un suelo franco limoso expuesto al agua de lluvia (Adaptado de Shainberg y Letey, 1984)

Figura 3. Relación entre la conductividad y la carga hidráulica. (adaptado de Bachmeier *et al.*, 2007).

Figura 4. Conductividad hidráulica promedio de 60 suelos de Israel en base al contenido de arcilla (Adaptado de Levy *et al.*, 2005).

Figura 5. Relación entre la conductividad hidráulica saturada (KSat) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) para tres tipos de suelos (adaptado de Lebrón *et al.*, 2002).

Figura 6. Relación entre la conductividad hidráulica saturada (Ksat) y el tamaño de agregados, expresado como área de agregado (A) sobre perímetro del agregado (P) (adaptado de Lebron *et al.*, 2002).

Figura 7 Patrón de crecimiento horizontal por parte de las raíces en un suelo sometido a siembra directa. A) plano vertical y B) plano horizontal de un terrón

Figura 8. Penetración de las raíces (%) como resultado de distintas resistencias de suelo, determinado por distintas densidades aparentes (adaptado de Unger y Kaspar, 1994)

Figura 9. Resistencia del suelo medida en N cm^{-2} , y como ésta es afectada por la densidad aparente y el potencial mátrico de agua (MPa) (adaptado de Unger y Kaspar, 1994).

Figura 10. Resistencia medida con penetrómetro en un suelo arenoso franco y como éste es influenciado por la densidad aparente y potencial mátrico (adaptado de Taylor y Brar, 1991).

Figura 11. Resistencia mecánica a la penetración (RMP), en estado húmedo y seco (del mismo suelo), en un Argiudol ácuico en siembra directa (adaptado de Wilson *et al.*, 2006).

Figura 12. Relación entre la resistencia mecánica medida con penetrómetro y el contenido hídrico de un suelo destinado a la agricultura continua durante más de 10 años. Las determinaciones corresponden al sitio ubicado en las siguientes coordenadas geográficas 063°14.931'W; 30°56.105'S. La condición física relativa en este caso es considerada muy buena.

Figura 13. Relación entre la resistencia mecánica medida con penetrómetro y el contenido hídrico de un suelo destinado a la agricultura continua durante más de 10 años. Las determinaciones corresponden al sitio ubicado en las siguientes coordenadas geográficas 063°10.239'W30°48.672'S. La condición física considerada es regular.

Figura 14. Relación entre la resistencia mecánica medida con penetrómetro y el contenido hídrico de un suelo con presencia de dos horizontes Bn. Las determinaciones corresponden al sitio ubicado en las siguientes coordenadas geográficas 063°20.077'W 30°53.522'S.

Figura 15. Respuesta de un suelo (Handford) al agregado de distintas cantidades de yeso (M1, M2 y M3). Se puede observar como varía el PSI y la Kh con los distintos tratamientos.

Figura 16. Cambios en el PSI y Kh de un suelo (Madera) frente al agregado de distintas cantidades de yeso (M1, M2 y M3).

Figura 17. Cambios en el PSI y Kh de un suelo (Handford) frente al agregado de distintas cantidades. Se observa un incremento de la Kh pero no hay cambios en el PSI.

Figura 18. Relación entre la resistencia mecánica y el contenido hídrico de un suelo antes de ser arado con un paratíl.

Figura 19. Relación entre la resistencia mecánica y el contenido hídrico de un suelo después de ser arado con un paratíl.

Figura 20. Efecto de la densidad aparente del suelo y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo de maíz en un Hapludol típico del oeste de la Región Pampeana (adaptado de Diaz Zorita, 2000).

LISTA DE ABREVIATURAS

Ce: Conductividad eléctrica (dS m^{-1})

CIC: Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg^{-1})

Kh: Conductividad hidráulica (cm hora^{-1} ó cm día^{-1})

Ksat: Conductividad hidráulica en suelos saturados (cm hora^{-1} ó cm día^{-1})

N cm^{-2} : Newton por centímetro cuadrado

MO: Materia orgánica (%)

MPa: Mega pascal

PSI: Porcentaje de sodio intercambiable

RAS: Relación de adsorción de sodio

RM: Resistencia mecánica (MPa; N cm^{-2})

RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad analizar algunas propiedades de los suelos sódicos de textura franca o más fina que normalmente limitan el crecimiento e indirectamente el rendimiento del cultivo de maíz. El problema de suelos salinos y sódicos es generalizado a nivel mundial y su superficie está en crecimiento. En particular, las áreas aledañas a la laguna de Mar Chiquita tienen una importante presencia de suelos salinos y sódicos que no han sido estudiados en detalle. Por lo tanto, la zona de estudio de este trabajo se centra en esa geografía. Los suelos se diagnosticaron a través de mediciones de parámetros físicos (resistencia mecánica, humedad actual, infiltración, densidad aparente) y químicos (materia orgánica, conductividad eléctrica del extracto de saturación, pH, cationes intercambiables, NT, $N-NO_3^-$). Los valores de los parámetros medidos coinciden con la literatura en indicar que la conductividad hidráulica y a la resistencia mecánica son las principales limitantes del normal crecimiento del cultivo en estas situaciones. Estos resultados destacan la necesidad de medir más exhaustivamente las principales propiedades físicas de suelos salinos y sódicos, así como también la importancia de ajustar la disponibilidad hídrica dado que esta podría ser inferior a la supuesta, teniendo esto un impacto en el manejo del cultivo. Se analizaron además las siguientes medidas para mitigar esta problemática: el impacto de aplicaciones de enmiendas (yeso) sobre la conductividad hidráulica (la cual puede aumentar transitoriamente o no variar de manera sustancial) y la utilización de reservas hídricas del suelo por parte del cultivo, factor directamente relacionado a variaciones de la conductividad hidráulica. Se estudió también la utilización de herramientas de remoción (arado de Paratil) lo cual redujo la resistencia mecánica en los suelos sódicos notablemente, teniendo esto un impacto directo en el crecimiento del cultivo. Como futura línea de investigación de técnicas de mitigación de suelos salinos y sódicos se plantea analizar el impacto positivo de la fertilización en el desarrollo de raíces y diferencias intraespecíficas de longitud radical las cuales podrían ser tenidas en cuenta en un plan de mejoramiento genético, ya que podrían tener un impacto productivo, considerando que un híbrido con mayor desarrollo de raíces es capaz de explorar mayor profundidad del perfil de suelo y por lo tanto disponer de mayor cantidad de agua.

Palabras clave: suelos sódicos, maíz, conductividad hidráulica, resistencia mecánica

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze some properties of loamy or fine-textured sodic soils that normally constrain the growth and indirectly the yield of maize crops.

The problem posed by saline and sodic soils is widespread worldwide and its extent keeps growing. In particular, the areas around the Mar Chiquita lagoon have an important presence of saline and sodic soils which have not been studied in detail. Therefore, the study area of this work focuses on that geography.

Soils were characterized by measuring physical (mechanical strength, real humidity, infiltration, bulk density) and chemical parameters (organic matter, saturation extract electrical conductivity, pH, exchangeable cations, NT, N-NO₃⁻). The values of the measured parameters coincide with the literature in indicating that the soils' hydraulic conductivity and the mechanical resistance are the main limits to the normal growth of crops in this situation. The parameter values obtained coincide with the literature in that the hydraulic conductivity and the mechanical resistance are the main limiters of the normal growth of the crop in this situation.

The following mitigation measures were analyzed: the impact of applications of amendments (gypsum) on hydraulic conductivity (which may transitorily increase or remain substantially invariable), and the crop's use of soil water reserves, which is factor directly related to variations in hydraulic conductivity. The application of break up tools (Paratill plow) reduced the mechanical resistance in the sodium soils significantly, which had a direct correlation with crop growth.

Future lines of investigation in mitigation techniques for saline and sodic soils include analysis of the influence of fertilization on root development and on intraspecific differences of radical length in a genetic improvement plan. This could have a productive impact considering that a hybrid with larger root development is able to explore a larger soil depth and therefore have access to more water.

Key words: Sodic soils, maize, hydraulic conductivity, mechanical strength

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos salinos-sódicos están ampliamente distribuidos en todo el planeta. Estadísticas a nivel mundial reflejan que los suelos salinos y sódicos cubren una superficie de 8.369.000 km² (FAO, 2011) es decir el equivalente a tres veces la superficie de Argentina. Flowers (2004) considera una superficie aproximada de 900 x10⁶ ha y argumenta que si bien la superficie de suelo afectada por sales a nivel mundial es imprecisamente conocida, esta extensión es suficiente para representar una amenaza para la agricultura.

Nuestro país es el tercero con mayor superficie de suelos salinos alcalinos del mundo (Lavado y Taboada, 2009) ocupando una superficie de 516.000 km² (FAO, 2011); esto representa un 14 % de la superficie de Argentina. Otros países presentan también graves problemas de este tipo, entre ellos se destacan por su superficie Australia, con 1.580.000 km² de suelos afectados por problemas de salinidad y/o sodicidad y China, donde la superficie con estas limitantes alcanza los 750.000 km².

Aunque actualmente apenas el 17% del total de la superficie agrícola mundial cuenta con irrigación, en esas tierras se produce el 40 por ciento de los alimentos del mundo y la salinización está reduciendo la superficie irrigada del mundo entre 1 y 2 % por año, con mayor intensidad en las regiones áridas y semiáridas (25%) (FAO, 2002) También se ha informado que 600.000 ha de suelos irrigados de la Argentina se encuentran afectados por problemas de salinidad, aunque posiblemente tales datos subestimen la magnitud del problema (Taleisnik *et al.*, 2008).

Considerando este escenario, en el que la superficie útil para la actividad agropecuaria va disminuyendo a un ritmo precipitado, determinado en gran cantidad de casos por el mal manejo de los recursos, y que la demanda de alimentos sigue siendo cada vez mayor, se hace indispensable conocer más acerca de este tipo de suelos y su relación con los cultivos. Por un lado para evitar que se sigan propagando y por el otro para mejorar la producción.

Son amplias y complejas las dificultades para el desarrollo de los cultivos en estos escenarios; la magnitud de las limitantes va a depender de muchos factores y sus

interrelaciones; entre otras cosas de cuan salinos y/o sódicos son los suelos, cual es la clase textural y que especie se cultiva.

En el caso puntual de los suelos sódicos, los de textura franca o aún más fina, presentan características particulares que imponen un techo a la producción y en muchos casos no permiten que determinadas plantas logren alcanzar su madurez fisiológica debido a una muerte prematura. Algunas de ellas son: pH muy elevado (valores cercanos a 10 en algunos casos), escasa oxigenación, fertilidad química lo suficientemente baja como para cubrir los requerimientos de los cultivos y baja fertilidad biológica. Sin embargo, existen otros dos factores que serán tenidos en cuenta en este trabajo, ya que, de acuerdo a estudios realizados a nivel zonal, serían los más representativos en lo que a la limitación del crecimiento del cultivo se refiere. Estos factores guardan una relación directa entre ellos debido a que uno depende en parte del otro. El primero es la conductividad hidráulica, expresada esta en un orden general, es decir haciendo referencia no solo a la conductividad hidráulica en la fase suelo-suelo (flujo interno), sino también en la interfase aire-suelo (infiltración). El otro parámetro es la resistencia mecánica, que puede generar un menor desarrollo radical (Phillips y Kirkham 1962). Específicamente, el maíz es uno de los cultivos que muestra mayor sensibilidad a este parámetro (Alvarez *et al.*, 2009)

La problemática de los suelos sódicos abarca diversos ambientes dentro de la provincia de Córdoba (Tassile *et al.*, 2006). Dentro de estos, hay uno denominado Depresión del Arrollo Tortugas-San Antonio. Esta constituye una faja deprimida y alargada con orientación Norte Sur, ubicada al sur del Mar de Ansenusa, paralelo al límite con la provincia de Santa Fe, lindando al Oeste con la pampa loésica plana y al Este con los Altos de Morteros o Planicie Santafecina. El drenaje en general es deficiente y son tierras que se anegan con facilidad. Los materiales superficiales sobre los que se han desarrollado los suelos son esencialmente de origen fluvial o eólico redepositado por corrientes fluviales, con salinidad y alcalinidad sódica. La vegetación natural es fundamentalmente halófila e hidrófila. A pesar de esto, muchos campos de este ambiente, son destinados a la producción agrícola de cultivos extensivos, tales como maíz, soja, trigo, sorgo, alfalfa, ya que presentan una gran variabilidad en cuanto a la aptitud productiva. Esta variabilidad se da tanto de manera temporal como espacial, observándose un paisaje de suelos “overos”, como se los denomina de manera vulgar.

Teniendo presente estos antecedentes, surge la inquietud de evaluar la situación actual en la mencionada zona que históricamente ha sido ganadera-agrícola en la cual, la conservación del recurso suelo no ha sido tenida en cuenta con el énfasis necesario. Pueden citarse indicadores avalando esta problemática tales como salinización de campos (salitre blanco), disminución de la producción agrícola en algunos establecimientos (aumentos en otros), marcado escurrimiento y encharcamientos.

En virtud de lo expuesto, se propusieron como objetivos de este trabajo final integrador:

1.1. OBJETIVO GENERAL

Integrar conocimientos teórico-prácticos en la temática de suelos salinos/sódicos para una mejor comprensión de su problemática.

1.2. OBJETIVO ESPECIFICO

Analizar la limitación impuesta por dos propiedades físicas edáficas: la conductividad hidráulica (flujo interno), incluyendo la interface atmósfera-suelo, (infiltración), y la resistencia mecánica inducida por la dispersión coloidal.

Entender cómo estas propiedades afectan el normal crecimiento del cultivo de maíz en suelos sódicos de textura franca o más fina.

Analizar distintas alternativas tecnológicas tendientes a mejorar el desempeño de suelos sódicos como soporte del cultivo de maíz, como lo son las aplicaciones de yeso y su efecto sobre el PSI porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la conductividad hidráulica; la labranza con Paratil y su impacto en la resistencia mecánica y la fertilización nitrogenada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. META-ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

La búsqueda bibliográfica se enfocó en la obtención de información en distintos ambientes del mundo con problemática semejante, esto es: Argentina, Israel, Australia, Estados Unidos, Reino Unido. La fuente de esta información fue obtenida a partir de la Biblioteca Electrónica de Ciencia y Tecnología, Red Argentina de Salinidad, INTA, bibliografía de referentes nacionales en la temática, biblioteca electrónica de la Universidad de Johns Hopkins (USA), páginas científicas de suelos y cultivos (Crop Science; Soil Physics; Soil & Tillage Research; Soil Science Society of America, Agronomy Journal, Field Crops Research, entre otros). Una problemática en este aspecto, fue la escasa información que relaciona el desarrollo radical del cultivo de maíz en suelos sódicos considerando básicamente la resistencia mecánica. El periodo investigado tendió a obtener información relativamente reciente limitando la búsqueda desde el año 1990. Por motivos de escasez de bibliografía y considerando que algunos autores fueron pioneros y referentes en algunos temas, este periodo se amplió con trabajos puntuales. Para discriminar parte de la bibliografía en un primer momento obtenida, se analizaron las conclusiones e introducciones, posteriormente si era conveniente se analizaba todo el artículo. Una vez que la estructura del trabajo estuvo configurada, se procedió a la búsqueda de más bibliografía para complementar lo analizado previamente, de la misma manera.

2.2. EXPERIMENTACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Desde el año 2008 en adelante, se realizaron muestreos en distintos establecimientos ubicados en los departamentos Rio Primero y San Justo, entre las coordenadas $62^{\circ}45'58,6''W$, $30^{\circ}55'07,3''S$ y $063^{\circ}20'34,3''W$, $30^{\circ}53'42,8''S$, particularmente en las localidades de La Para, Villa Fontana, La Puerta, Santa Rosa y Marull. (Figura 1).

Esto se llevó cabo en campos que están destinados a la producción fundamentalmente agrícola con la finalidad de identificar algunas limitantes en el crecimiento de los cultivos. Se determinaron variables físicas y químicas. Con respecto a las primeras se midió densidad aparente (Dap), resistencia mecánica (RM), contenido hídrico (W%) e

infiltración (I). La densidad aparente se determinó a través del cilindro de Kopecki en 2 profundidades: 0-5 cm y 10-15 cm. Las dimensiones de este fueron de 4,65 cm de diámetro por 5 cm de alto. La resistencia mecánica se determinó mediante un penetrómetro marca Tornomar SA Versión 2.0.8.0. (Desarrollo del Hardware por INTI Rafaela y desarrollo del Software por TinySoft Desarrollos); el diámetro del cono fue de 20,27 mm y el área basal de 9,62 cm². La RM se determinó hasta los 70-75 cm de profundidad y fue expresada en MPa. La humedad se determinó hasta los 2 metros a través del método gravimétrico, aunque se utilizaron los primeros 80 cm para relacionarlo con la RM. Las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C durante 48 h. La infiltración se determinó mediante infiltrómetros de anillo (USDA, 1999). Esta técnica permite determinar la infiltración básica.

Con respecto a las mediciones químicas, se determinaron: Materia orgánica (Walkey-Black), pH (1:1), Conductividad eléctrica del extracto de saturación, Fosforo (Bray Kurtz 1 y Olsen dependiendo del pH), N-NO₃⁻(Ac fenoldisulfonico), S-SO₄²⁻(turbidimetría) Nitrogeno total (kjeldahl), Cinc (Mehlich III), Boro (colorimetría) Calcio y Magnesio (titulación con EDTA), sodio y potasio (fotometría de llama). A partir de los cationes intercambiables se calculó el porcentaje de sodio intercambiable (PSI)



Figura 1. Ubicación de puntos representativos de estudios sobre una imagen de Google Earth.

3. RESULTADOS

A partir de la clasificación de suelos realizada por la Soil Science Society of America (2001), un suelo se denomina salino y/o sódico cuando posee las características detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1. Umbrales actuales y antiguos para definir salinidad y sodicidad en los suelos: CE: Conductividad Eléctrica, RAS: Relación de Adsorción de Sodio, PSI: Porcentaje de sodio intercambiable.

	CE dS m ⁻¹ (25 ° C)	RAS	pH	PSI %
Actual				
Suelos salinos	> 4 (2-8)		< 8.5	
Suelos sódicos		> 13		
Antiguas				
suelos alcalinos	<4		> 8.5	> 15
Suelos salinos sódicos	> 4		< 8.5	>15

3.1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

El movimiento del agua del suelo está regulado por la ecuación de Darcy, extendida por Richards (1931) para suelos insaturados, esto es:

$$q = -K_h \frac{dH}{dz} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

q =Flujo (cm hora⁻¹ o cm día⁻¹)

dH/dz= Gradiente Hidráulico

Kh= Conductividad Hidráulica (cm hora⁻¹ o cm día⁻¹)

La conductividad hidráulica puede ser analizada en sucesivos pasos: En una primera etapa haciendo referencia a la interface atmosfera- suelo denominada infiltración. Posteriormente, existe una redistribución de la solución dentro de la matriz de suelo. En los suelos sódicos tanto la infiltración como la redistribución normalmente están disminuidas comparada con un suelo no sódico. En la Ecuación 1 se puede apreciar que a pesar de que exista un gradiente hidráulico muy grande el flujo puede ser ínfimo a causa de que la K_h presente valores muy bajos. Hay distintos estudios en los cuales la disminución de la conductividad hidráulica a saturación (K_{sat}) ha sido relacionada con incrementos en el contenido de Na (Lebrón *et al.*, 2002).

3.2. LA INFILTRACIÓN EN SUELOS SÓDICOS

La infiltración se define como el flujo de agua que ingresa al suelo a través de un área determinada en la interface atmósfera-suelo. Los suelos sódicos en general presentan una gran sensibilidad a la caída en la infiltración debido a los fenómenos de encostramiento y dispersión de arcillas. La formación de una costra (delgada capa de 0,1 mm o más) en suelos expuestos al impacto de las gotas de lluvia es debido a dos mecanismos: 1) Ruptura de los agregados por el impacto directo de las gotas de lluvia y el humedecimiento de los agregados y 2) Dispersión fisicoquímica de las arcillas, las cuales luego migran dentro del suelo con el agua que infiltra y obstruyen los poros del horizonte suyacente (Shainberg y Singer, 2012). En la Figura 2 se observa como los distintos valores de PSI para un suelo determinado afectan la infiltración de un suelo cuando la intensidad de lluvia se mantiene constante y el efecto que tiene el agregado de yeso

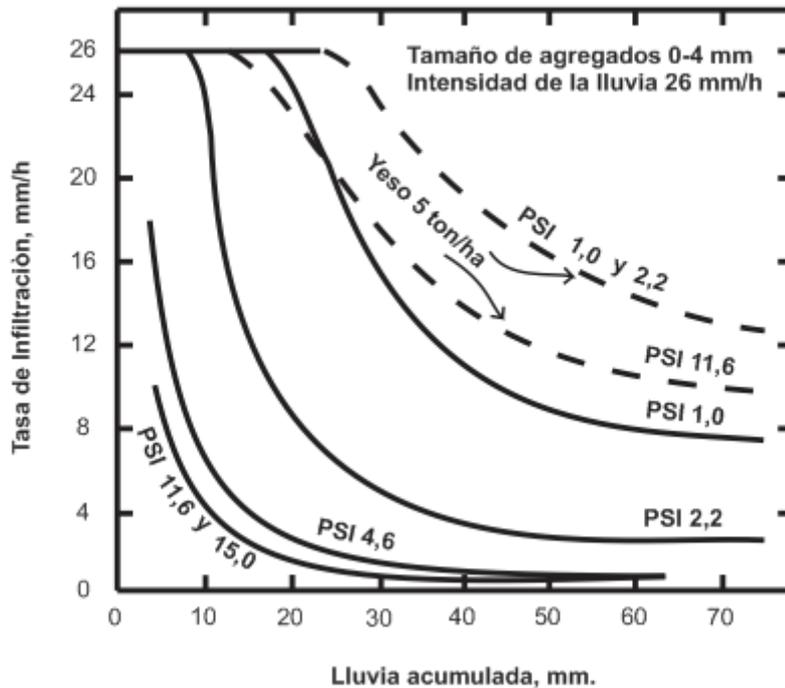


Figura 2. Efecto del PSI y tratamiento con yeso en la tasa de infiltración de un suelo franco limoso expuesto al agua de lluvia (adaptado de Shainberg y Letey, 1984)

Por otro lado, los fenómenos que regulan la infiltración son muchos y complejos, así la conjunción de estos puede generar valores muy diferentes de infiltración para un PSI determinado. Algunos de ellos son: cambio continuo en el gradiente hidráulico; floculación determinada por electrolitos en la solución; cantidad y tipo de arcilla, siendo las esmécticas las más susceptibles a la dispersión por efecto del Na; estabilidad estructural; cobertura de suelo. Mediciones realizadas en el área de influencia antes mencionada, arrojaron valores de infiltración básica muy variable, que fueron desde los 8 mm h⁻¹ a más de 300 mm h⁻¹ (Tabla 2).

Tabla 2. Datos de algunas propiedades físicas y químicas contrastantes de los suelos medidos y analizados en este trabajo. (Datos propios)

Sitio N°	Infiltración Básica (mm h ⁻¹)	D Ap (Mg m ⁻³) 0-10 (Cm)	D Ap (Mg m ⁻³) 10-15 (Cm)	PSI (%)	CE (dS m ⁻¹)	pH	Suma de bases (Cmol kg ⁻¹)
31	8,6	1,48	1,45	21	2,3	9,49 *	28,7
67	122,9	1,37	1,41	1,6	0,3	6,81	17,9
17	19,7	-	-	10,9	5,3	7,13 *	Extracto
45	349,5	1,61	1,55	3,3	0,3	6,37	11,1

(* pH hidrolítico).

Otro dato a destacar, que se pudo observar en esta serie de mediciones, es la gran variabilidad que existe dentro de un mismo predio (y dentro de un mismo lote, es decir, con la misma historia de manejo) en cuanto a la humedad almacenada se refiere. Así, a partir de infiltraciones contrastantes (en el orden de los 100 mm h⁻¹ vs 5 mm h⁻¹) se realizaron mediciones de humedad almacenada hasta los 2 metros de profundidad en el mes de mayo, posterior a la cosecha de soja. Los valores de humedad medidos se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Determinación de humedad gravimétrica (W %) hasta los 2 metros de profundidad, en dos círculos de riego, dentro de un mismo lote, los cuales poseen valores de infiltración básica contrastantes. Círculo 1 y círculo 2 con valores de infiltración básica de 109 mm h⁻¹ y 5 mm h⁻¹ respectivamente (Datos propios).

Círculo 1		Círculo 2	
Prof., cm	W %	Prof., cm	W %
0-20	25,9	0-20	22,7
20-40	22,5	20-40	21,1
40-60	19,8	40-60	15,4
60-80	22,0	60-80	13,3
80-100	21,8	80-100	14,3
100-120	20,7	100-120	13,2
120-140	21,2	120-140	12,3
140-160	22,0	140-160	12,1
160-180	21,6	160-180	11,3
180-200	21,4	180-200	11,4

Se realizó un cálculo de lámina hídrica a partir de los datos de la Tabla 4, la densidad aparente medida (0-10 cm) fue 1,38 Mg m⁻³ y una constante hídrica de capacidad de marchitez permanente de 11,5 % para todas las profundidades. Se determinó que la lámina en el círculo 1 fue de 282 mm y en el círculo 2 fue de 89 mm (ambos puntos están separados 400 metros aproximadamente). Esto refleja la gran variabilidad que puede existir en los lotes, aun con la misma historia agrícola. Análisis químicos y físicos (conductividad eléctrica del extracto de saturación, PSI, clase textural, pH) de muestras de suelo de situaciones semejantes a las mencionadas, reflejan que se

está en presencia de distintos tipos de suelo. Correspondería un manejo agronómico diferente en ambas zonas, cuestión no siempre posible de lograr debido a un factor de operatividad y debido a lo intrincado que se presentan normalmente estos complejos de suelo. Por ejemplo, considerando realizar un balance para ajustar una fertilización nitrogenada, las expectativas de rendimiento variarían completamente, por lo tanto la respuesta productiva y económica será muy diferentes en ambos sectores del campo para las mismas unidades de nitrógeno. El mismo análisis se podría realizar con densidades de siembra, elección de híbridos, control de malezas. Por lo expuesto, se observa que es sumamente importante medir estos parámetros a campo para poder tener dimensión de las pérdidas que se pueden generar, además de tratar de corregir esta problemática.

3.3. REDISTRIBUCIÓN DE AGUA DENTRO DEL SUELO

Posterior al ingreso de agua en la matriz del suelo, comienza la redistribución, donde fundamentalmente la conductividad hidráulica (K_h) regula este proceso. La máxima conductividad hidráulica de un suelo se da cuando está saturado; en la medida que el contenido hídrico disminuye, también lo hace la K_h . Esta depende de la porosidad, o, más exactamente, de la geometría de los poros, que, a su vez, es función de la composición granulométrica y estructuración del material poroso (Bachmeier *et al.*, 2007) (Figura 3 y 4). Además, depende de la composición de los cationes intercambiables, composición y concentración de los electrolitos en la solución del suelo (Levy *et al.*, 2005). Es por esto que los valores de K_h están directamente relacionados con el PSI; esto es, a mayor valor de PSI menor valor de K_h (Figura 5), aunque el impacto adverso de la sodicidad sobre la conductividad hidráulica depende fuertemente de la textura del suelo (Levy *et al.*, 2005). Por lo expuesto, se observa que son muchos los factores que afectan la K_h de un suelo, los cuales conjugados con el sodio pueden generar mayores problemas.

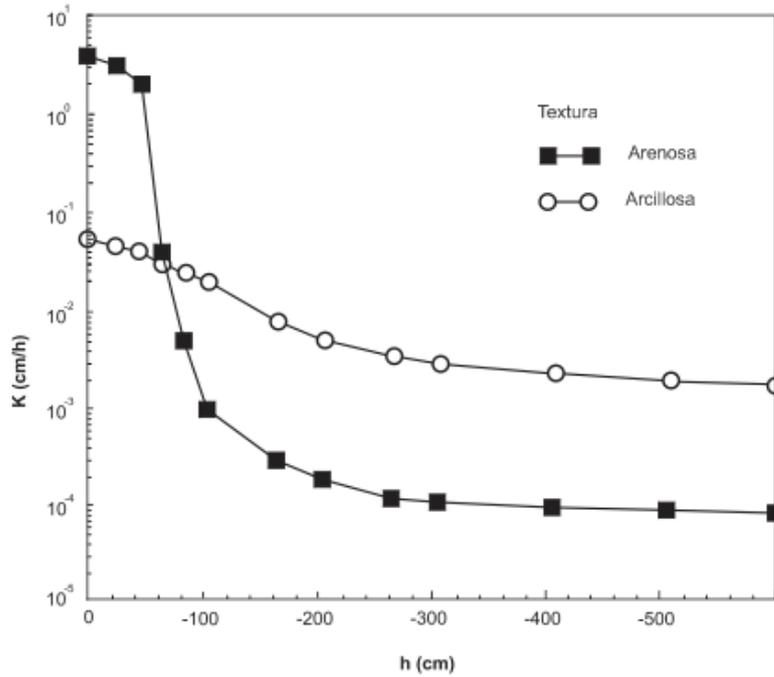


Figura 3. Relación entre la Conductividad y la Carga Hidráulica (adaptado de Bachmeier *et al.*, 2007).

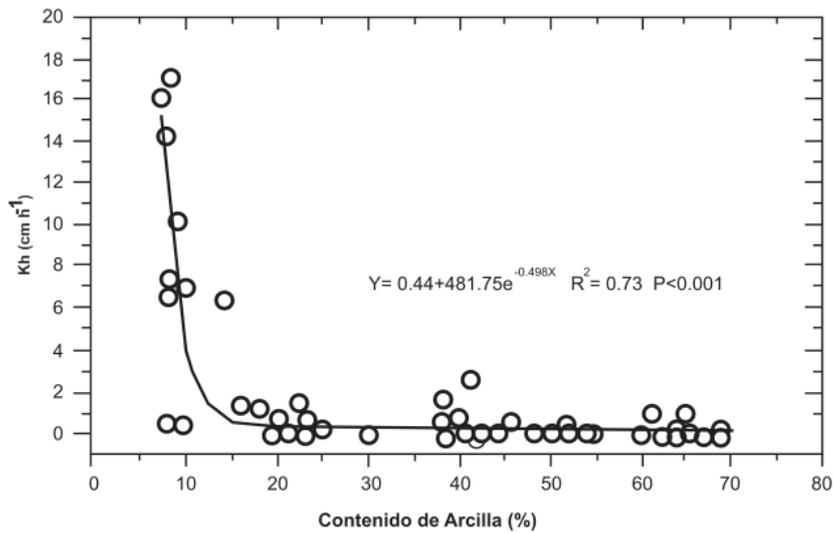


Figura 4. Conductividad Hidráulica promedio de 60 suelos de Israel en base al contenido de arcilla (adaptado de Levy *et al.*, 2005).

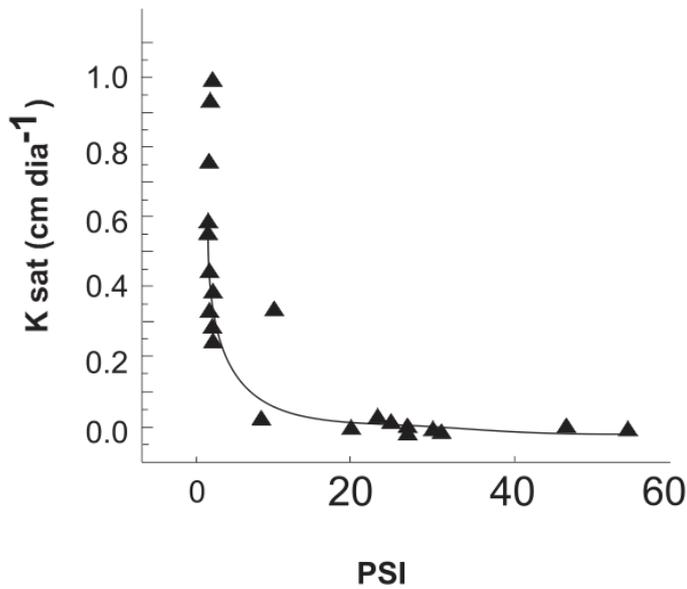
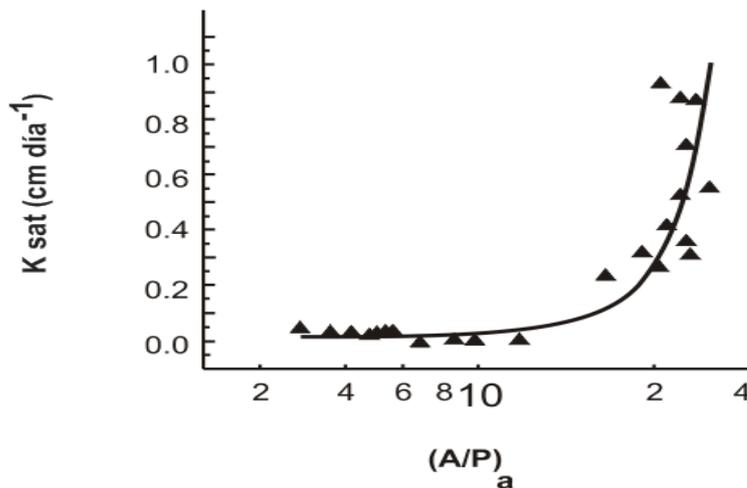


Figura 5. Relación entre la Conductividad Hidráulica Saturada (Ksat) y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) (adaptado de Lebrón *et al.*, 2002).

Es importante remarcar que otros parámetros del suelo también tienen influencia en la conductividad hidráulica, entre ellos el tamaño de agregados, como puede observarse en la Figura 6, expresado este como la relación Área/Perímetro (A/P) de los agregados. En la medida que esta relación sea mayor (mayor tamaño de agregados), mayor será Ksat.



3.4. RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia mecánica es una propiedad del suelo que a menudo no es tenida en cuenta o no se la considera como se debiera a pesar de que en muchas situaciones limita el crecimiento radical y el rendimiento (Unger y Kaspar, 1994). El PSI tiene un efecto directo y uno indirecto con respecto a la resistencia mecánica del suelo. En el caso del efecto directo, fue demostrado que suelos saturados con sodio poseen mayor resistencia que los saturados con Ca o Al (Mathers *et al.*, 1966; Unger y Kaspar, 1994). Con respecto al efecto indirecto (quizás el más importante) la resistencia mecánica guarda una estrecha relación a los parámetros antes analizados, infiltración y redistribución del agua; estas propiedades, como fue demostrado previamente, están muy vinculados al PSI. Por otro lado, el contenido hídrico posee una relación directa con la resistencia mecánica.

Hay otros factores que afectan la resistencia mecánica, entre ellos están el contenido de arcilla, densidad aparente, (Mathers *et al.*, 1966) y el tráfico de maquinarias. En concordancia con esto, ha sido suficientemente documentada la influencia negativa que ejerce la compactación excesiva sobre la emergencia de las plántulas, la exploración radical, la producción de biomasa y los rendimientos de los cultivos (Alvarez *et al.*, 2009).

Se considera que un suelo es sódico cuando el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es igual o superior a 15 %, aunque actualmente, el parámetro utilizado para definir problemas de sodicidad es la relación de adsorción de sodio del extracto de saturación del suelo (RAS) y los suelos sódicos deben poseer un RAS no menor a 13 (Richards, 1954; Taboada y Lavado, 2009). A pesar de esto, el PSI entre 5 y 15 es tradicionalmente el rango de valores que aparece en la literatura como el umbral en que los dominios de tactoides o arcillas se separan (Lebron *et al.*, 2002). Es decir que los problemas físicos y químicos empiezan aún antes del valor arbitrario de PSI 15 %. En estas situaciones la dispersión de partículas se ve favorecida, afectando seriamente varias propiedades del suelo. Una de estas es el tamaño y persistencia de los agregados.

Generalmente, se acepta que cuando una impedancia mecánica aumenta, la penetración de las raíces se reduce. Esto fue demostrado para poroto, soja, sorgo, pastos, cebada, avena, centeno, trigo, caupí, papa, maíz, maní (Taboada y Micucci, 2004).

Phillips y Kirkham (1962) determinaron una correlación inversa entre la resistencia mecánica y el crecimiento radicular, que en este caso fue la propiedad física que correlacionó mejor con el crecimiento de las plántulas en maíz. Posteriormente se demostró que el maíz es uno de los cultivos que muestra mayor sensibilidad a sufrir daños en sus raíces y descenso de rendimiento a causa de la compactación (Alvarez et al., 2009).

Existe un umbral crítico por arriba del cual las raíces dejan de crecer. En el caso específico del maíz, de acuerdo a ensayos citados por Bachmeier *et al.* (2007) se determinó que este cultivo es capaz de desarrollar presiones de 10,2 bares en el sentido axial y 6,2 bares en sentido radial. A pesar de esto, las raíces pueden desarrollarse aun cuando la resistencia medida con penetrómetro supere estas presiones. Esto es debido (al menos en parte) a que las raíces son capaces de crecer a través de grietas o zonas de menor resistencia dentro del suelo (Taylor y Burnett, 1964), (Fotos 2 y 3) mientras que el penetrómetro se introduce de manera vertical en el suelo independientemente de la existencia de grietas. Así, Veen y Boone (1990), en una de sus experiencias, encontraron que la relación entre el valor de resistencia mecánica obtenido por penetrómetro y el ejercido realmente por las raíces de maíz fue de aproximadamente 2,5 (Veen y Boone, 1990). Es decir, que las raíces podían crecer con resistencias 2,5 veces superiores (expresado en la medición del penetrómetro) a las del valor en el que teóricamente las raíces detenían su crecimiento.

En una serie de mediciones realizadas en distintos establecimientos agrícolas en zona norte de Córdoba, Rollan y Bachmeier (2013) demostraron el incremento creciente en la densificación de suelos sometidos a siembra directa a distintas profundidades. Este aumento en la densificación provocó, entre otras cosas, un incremento en la resistencia mecánica. En las Figuras 7 puede observarse un patrón de crecimiento horizontal por parte de las raíces producto de la resistencia mecánica en busca de grietas o zonas de menor resistencia.



Figuras 7 Patrón de crecimiento horizontal por parte de las raíces producto de la resistencia mecánica. Se observa una estructura laminar bien definida y existencia de barnices recubriendo los agregados. A) plano vertical y B) plano horizontal de un mismo terrón (Fuente: Rollan y Bachmeier, 2013).

El valor crítico de la resistencia mecánica a la penetración que impide la elongación de los cultivos es muy discutido, variando entre 0,9 y 3 MPa (Wilson *et al.*, 2006) además depende de la etapa de desarrollo de las plantas (Taboada y Micucci, 2004). A pesar de esto, en general el valor más aceptado es 2 MPa, dependiendo del penetrómetro utilizado (Wilson *et al.*, 2006). Esto es debido a que existen distintos tipos de penetrómetro. Estos poseen un vástago que se introduce en el suelo ya sea por caída libre de una pesa en una distancia determinada (penetrómetro de golpes), por la fuerza ejercida por un dinamómetro (Taboada y Micucci, 2004) y electromecánicos. La punta del vástago puede ser cónica (con distintos ángulos de incidencia) o planos. Esta variabilidad de

penetrómetros y sus partes determinan valores de resistencias diferentes para la misma dureza del suelo.

En la Figura 8 se puede observar la relación encontrada por Taylor (Unger y Kaspar, 1994) a través de distintos ensayos en el que compara la resistencia de suelo y la penetración de las raíces, como así también, el patrón de comportamiento de estas últimas frente a un aumento gradual de la densidad aparente.

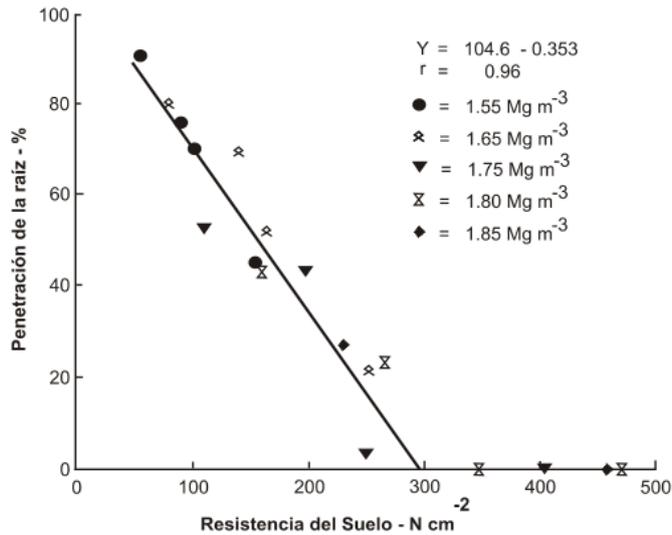


Figura 8. Penetración de las raíces (%) como resultado de distintas resistencias de suelo, definidas por distintas densidades aparentes (adaptado de Unger y Kaspar, 1994)

La resistencia mecánica es una propiedad física directamente afectada por la densidad aparente, por el contenido hídrico del suelo y por la relación entre éstas (entre otros factores). El efecto conjugado de estos dos parámetros tiende a generar un aumento en la resistencia de manera exponencial (Figuras 9y 10).

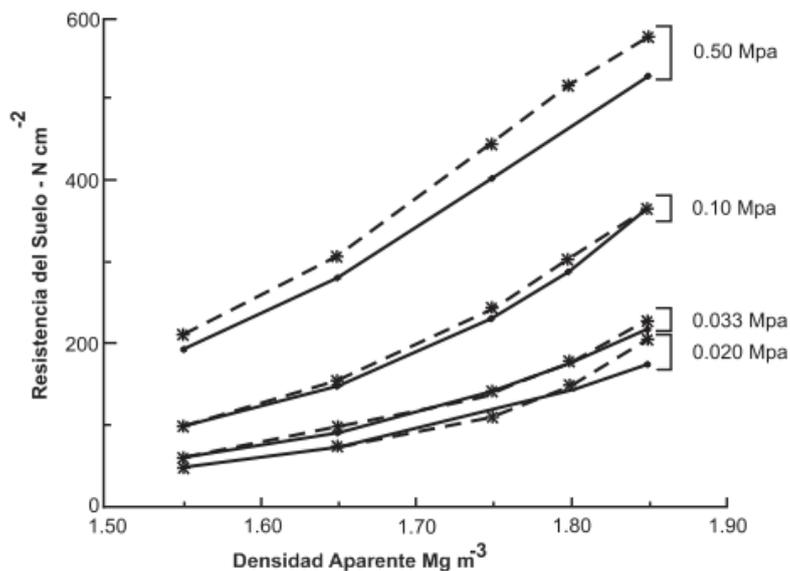


Figura 9. Cambios en la resistencia del suelo debidos a distinta densidad aparente y potencial mátrico hídrico en dos tipos de suelo (casos con líneas de trazo y continua) (adaptado de Unger y Kaspar, 1994).

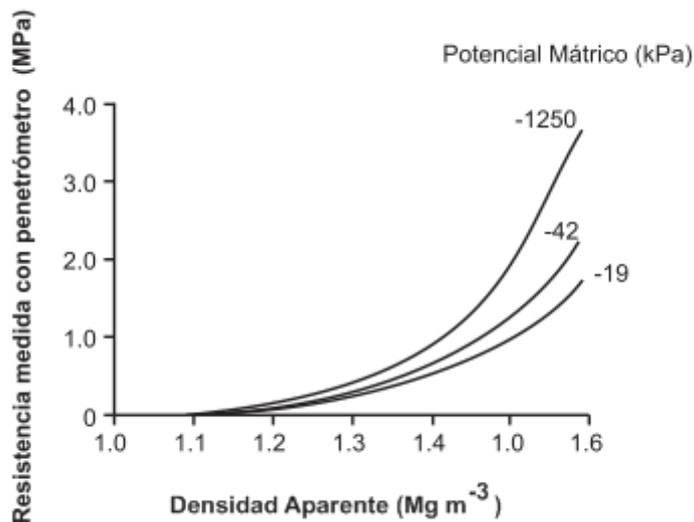


Figura 10. Resistencia medida con Penetrómetro en un suelo arenoso franco y cómo influyen sobre ella la densidad aparente y el potencial mátrico (Adaptado de Taylor y Brar, 1991).

Wilson *et al.* (2006), en un análisis de resistencia mecánica para un mismo suelo (Argiudol ácuico, serie Tezanos Pinto, provincia de Santa Fe), sometido a siembra directa durante los últimos 7 años, con una secuencia trigo/soja-Maíz, en el que solo se varió el

contenido hídrico, observaron que el rango de variación es muy importante, fundamentalmente en las capas superficiales, y que esta puede cambiar a lo largo del año dependiendo de las precipitaciones (Figura 11). En el ensayo, logró correlacionar el contenido hídrico del suelo con su resistencia mecánica. La ecuación que mejor explicó este comportamiento fue la siguiente:

$$Y = ax^b \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Y= Resistencia Mecánica (MPa).

X= Contenido Hídrico Actual del Suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

a y b= Coeficientes de la ecuación (0,33 y -4,48 respectivamente entre 6 a 15 cm de profundidad).

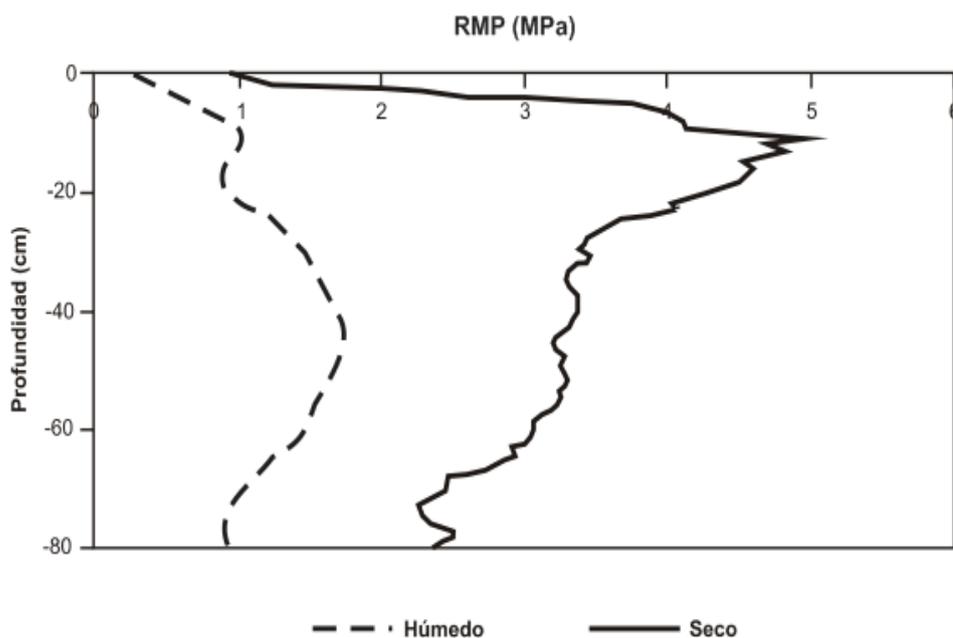


Figura 11. Resistencia mecánica a la penetración (RMP), en estado húmedo y seco (del mismo suelo), en un Argiudol ácuico en Siembra Directa (adaptado de Wilson *et al.*, 2006).

Mediciones de RM realizadas en la zona de influencia de este trabajo, permitieron observar un patrón que se repite en casi todos los suelos destinados a la producción agrícola de cultivos extensivos de la región, variando el valor concreto de resistencia en los primeros 25 cm de profundidad. Este aumento de la RM está relacionado con una

estructura laminar antes mencionada (Figuras 7). Es posible observar el patrón de crecimiento horizontal por parte de las raíces y una disminución en la tasa de infiltración producto de esta estructuración de las partículas de suelo. En las Figuras 12 y 13 se observa lo mencionado, con dos ejemplos contrastantes en cuanto a la condición física de suelo en los primeros centímetros de profundidad (30 cm).

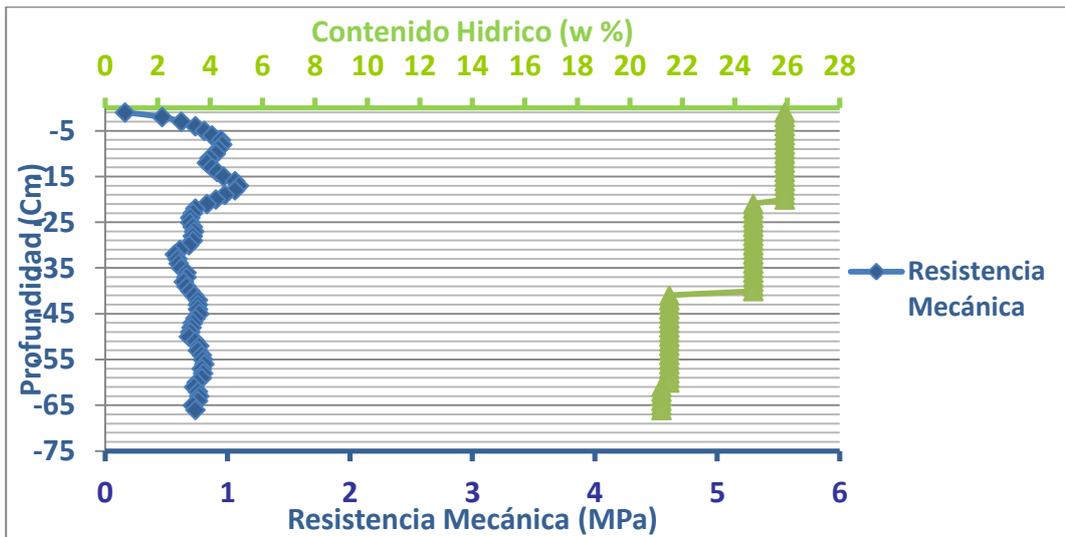


Figura 12. Relación entre la resistencia mecánica medida con penetrómetro y el contenido hídrico de un suelo destinado a la agricultura continua durante más de 10 años. Las determinaciones corresponden al sitio ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: 063°14.931'W; 30°56.105'S. (Datos Propios)

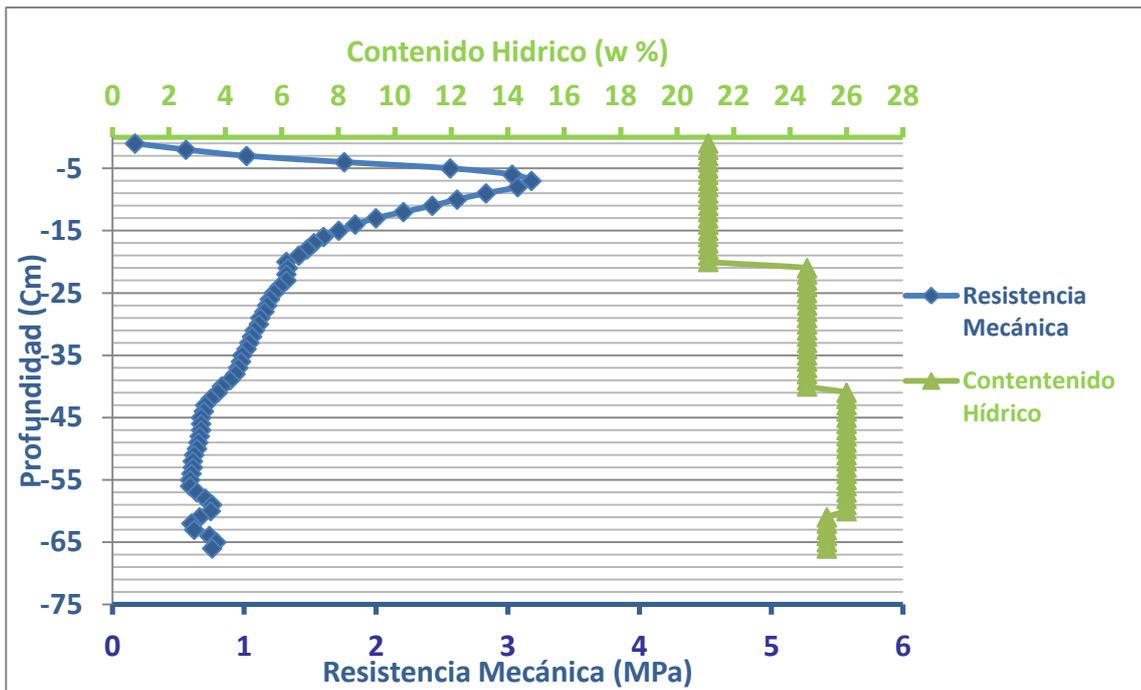


Figura 13. Relación entre la resistencia mecánica medida con penetrómetro y el contenido hídrico de un suelo destinado a la agricultura continua durante más de 10 años. Las determinaciones corresponden al sitio ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: 063°10.239'W30°48.672'S. (Datos Propios)

En la zona de estudio, existen además, situaciones en donde la resistencia principal se encuentra en horizontes subsuperficiales, determinada por la presencia de horizontes iluviales con un alto contenido de sodio en el complejo de intercambio (horizontes Bn). A continuación, se detalla la descripción representativa de un perfil (Zamora, 2005) donde se determinó la resistencia mecánica, cuyos resultados se muestran en la Figura 14.

Clasificación taxonómica: Natrustol típico franca fina mixta térmica.

A 0-20 cm Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro, franco limoso, bloques subangulares medios moderados, friable en húmedo, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, pH 6,5-7, raíces muy abundantes, límite inferior claro suave.

B21t (na)-Bn1: 20-40 cm, color en húmedo pardo oscuro a pardo amarillento oscuro, franco arcilloso limoso a franco arcilloso, columnar media fuerte y prismas

regulares medios fuertes, ligeramente firme en húmedo, plástico, adhesivo, pH 7,94, barnices de arcilla sódicas muy abundantes en las caras de los agregados, vestigios de raíces, límite inferior gradual.

B2t (na)- Bn2: 40-65 cm: color en húmedo pardo oscuro a pardo amarillento oscuro, franco arcillo limoso, prismas regulares medios fuertes, ligeramente firmes en húmedo, plástico, adhesivo, pH 8,22, barnices abundantes en las caras de los agregados, carencia total de raíces, límite inferior gradual.

B3: 65 cm a mas: Color en húmedo pardo amarillento oscuro, franco arcillo limoso a franco limoso, prismas y bloques débiles a moderados, barnices arcillosos escasos.

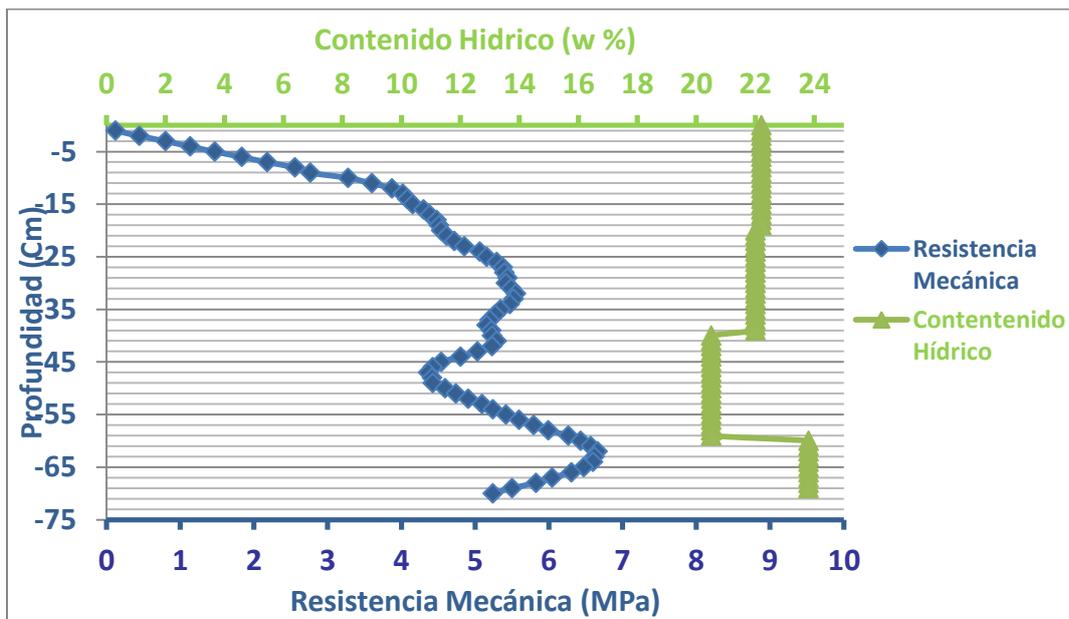


Figura 14. Relación entre la resistencia mecánica medida con penetrómetro y el contenido hídrico de un suelo con presencia de dos horizontes Bn. Las determinaciones corresponden al sitio ubicado en las coordenadas geográficas 063°20.077'W 30°53.522'S. (Datos Propios)

Debido a la elevada resistencia mecánica que hay en este perfil, se observa una escasa cantidad de raíces hasta los 50 cm aproximadamente y casi nula por debajo de esta profundidad. Esto guarda estrecha relación con los conceptos teóricos antes mencionados. Por la misma problemática, la capacidad de absorción de agua por parte de las raíces

también es limitada, obligando a regar de manera frecuente. En el caso que exista riego complementario en situaciones semejantes a estas, alta frecuencia y escasos milímetros (15-20 mm) generan mejores respuestas productivas.

4. MANEJO AGRONÓMICO FRENTE A ESTA PROBLEMÁTICA Y ALGUNAS CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA.

4.1. EMPLEO DE YESO COMO ENMIENDA

Una práctica difundida en los agrosistemas donde predominan los suelos sódicos es la aplicación de yeso. Para explicar el efecto correctivo de esta enmienda se expone un ensayo sobre suelos salinos-sódicos, extractado de Lebron *et al.* (2002); a continuación se detallan sus características: Handford (H) es un Xerotent típico, clase textural Arenoso-franco del Estado de California (EUA); Madera (M) es un Durixeralf abruptic, clase textural Franco-Arcillo-Arenoso del estado de California (EUA) y Las Animas (LA) es un Fluvaquent típico, clase textural Franco-Franco Limoso del Estado de Colorado (EUA). En la Tabla 4 se especifican características analíticas de los suelos.

Tabla 4: Composición granulométrica, CaCO₃, Materia Orgánica (MO), Capacidad de intercambio Catiónico (CIC) y Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) de los suelos del ensayo de Lebron et al. (2002), en sus condiciones naturales. Handford (H) Las Animas (LA) Madera (M).

Suelos	Arena	Limo	Arcilla	CaCO ₃	MO	CE	CIC	PSI	RAS	pH
	%	%	%	%	%	dSm ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹	%		
H	78,96	14,78	6,26	0,07	0,41	10,44	59,2	46,6	45,2	7,06
LA	31,97	50,76	17,27	6,04	1,27	12,08	145	54,5	44,5	8,1
M	52,4	25,74	22,22	0,06	0,61	10,57	150	45,3	43	7,64

A partir de estos suelos fueron preparadas 24 muestras a las cuales se les agregó determinadas cantidades de yeso. Este fue mezclado completamente con las muestras de

suelo y almacenado en columnas de 5 cm de diámetro por 18 cm de largo y comprimido hasta lograr una densidad aparente entre 1,3 a 1,6 Mg m⁻³. Los requerimientos de Yeso (RY) fueron calculados a partir de la siguiente ecuación, elaborada por Oster y Jayawardane (Lebrón *et al.*, 2002).

$$RY = 0,00086 \cdot F \cdot Ds \cdot Da \cdot (CIC) \cdot (PSI_i - PSI_f) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

RY= Requerimiento de Yeso

F= Factor de eficiencia de intercambio Ca-Na (valor considerado en este caso 1)

Ds= Profundidad de suelo a corregir

Da= Densidad aparente

CIC= Capacidad de intercambio catiónico

PSI_i = % de Na intercambiable inicial

PSI_f = % de Na intercambiable final

Con los datos obtenidos en dicho ensayo, se observó que existe una gran variabilidad en cuanto a las respuestas obtenidas a partir de esta práctica. En la Figura 15 se observa una marcada reducción en el PSI, cuyo valor tiende a hacerse asintótico frente a distintas cantidades de correctivo y un incremento en los valores de la Kh.

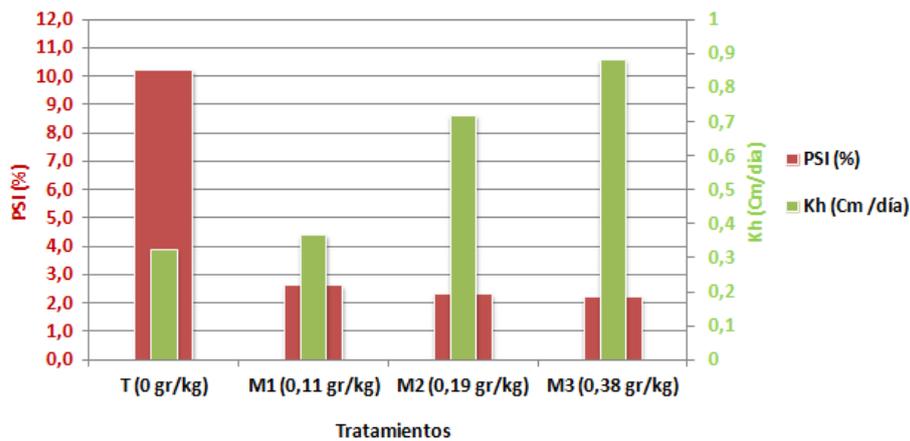


Figura 15. Cambios en el PSI (porcentaje de sodio intercambiable) y Kh (conductividad hidráulica de un suelo (Handford) frente al agregado de distintas cantidades de yeso (M1, M2 y M3)

En la Figura 16, correspondiente al suelo Madera, se observan leves modificaciones en los valores de PSI y Kh, no significativas desde un punto de vista práctico.

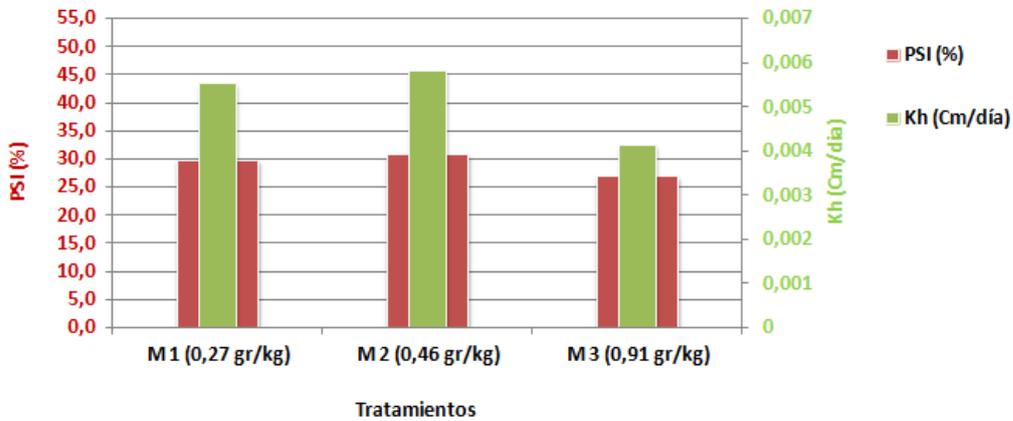


Figura 16. Cambios en el PSI y Kh de un suelo (Madera) frente al agregado de distintas cantidades de yeso (M1, M2 y M3)

En la Figura 17 se observa un incremento en la Kh a pesar de que el PSI no presenta cambios importantes. Esto puede deberse a que el yeso aporta electrolitos, que floculan el suelo (o evita que se sigan dispersando las partículas) generando en una primera etapa una mayor Kh y, posteriormente, cobra importancia el intercambio de Na^+ por Ca^{2+} .

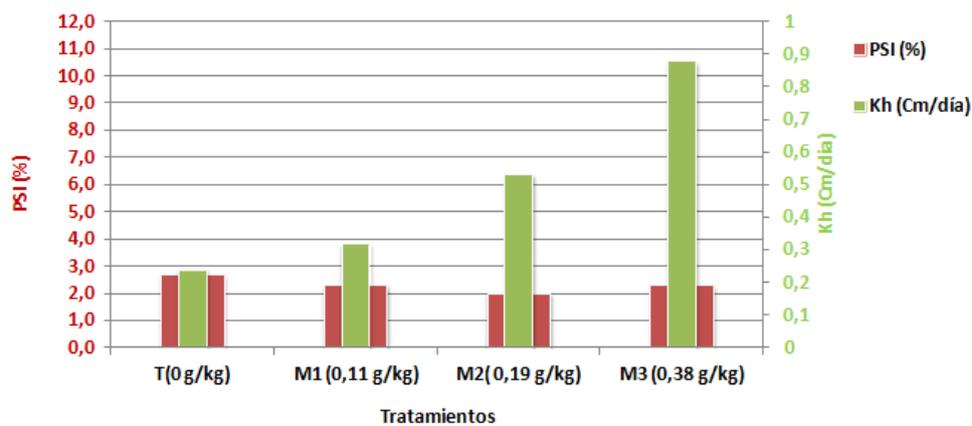


Figura 17. Cambios en el PSI y Kh de un suelo (Handford) frente al agregado de distintas cantidades. Se observa un incremento de la Kh pero no hay cambios en el PSI.

A partir de estos ensayos se observa que la respuesta del suelo a la aplicación de yeso es muy variable. Los suelos analizados en el presente trabajo, difieren en cuanto a clase textural y PSI (entre otros parámetros) aunque la variabilidad encontrada (datos no publicados) en la respuesta a la aplicación de esta enmienda también es muy amplia, observándose una menor eficiencia de intercambio de Ca por Na en la medida que el suelo se encuentra más degradado (valores elevados de PSI, menores niveles de materia orgánica, menor estabilidad estructural).

4.2. EFECTOS DEL USO DEL PARATIL

El Paratil es una herramienta que tiene como objetivo disminuir la resistencia mecánica y generar mayor infiltración en los suelos. Para observar el beneficio de este laboreo se llevó a cabo un ensayo en el que se midió la resistencia mecánica y el contenido gravimétrico de humedad antes y después del laboreo. Entre la primera medición y la segunda, hubo una secuencia de cultivos de trigo/soja-maíz; por lo tanto, transcurrieron 2 años entre las sucesivas mediciones. Se determinaron otros parámetros físicos y químicos previos a la remoción de suelo, los cuales se detallan en la Tabla 5. Estos datos analíticos reflejan una pobre condición para la producción de maíz, al igual que para cualquier cultivo extensivo tradicional de la región. La baja infiltración guarda relación con el elevado PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable) y las elevadas, aunque frecuentes, densidades aparentes. La conductividad eléctrica, al no ser elevada, no favorece la floculación de partículas coloidales, lo cual mejoraría la infiltración.

Tabla 5: Parámetros físicos y químicos de un lote sometido a ensayo con tratamiento de arado de Paratil, en la localidad de La Puerta. La densidad Aparente fue determinada a 2 profundidades 0-10 Cm y 10-15 Cm. PSI: Porcentaje de Sodio Intercambiable; Ce: Conductividad eléctrica del extracto de saturación. (Datos propios)

Infiltración Básica (mm/h)	Densidad aparente 0-10 (Cm)	Densidad Aparente 10-15 (Cm)	PSI (%)	CE (dS/m)	pH	Suma de bases (Meq 100 g ⁻¹)
8,6	1,48	1,45	21	2,3	9.49 (hidro)	28,75

* pH Hidrolítico.

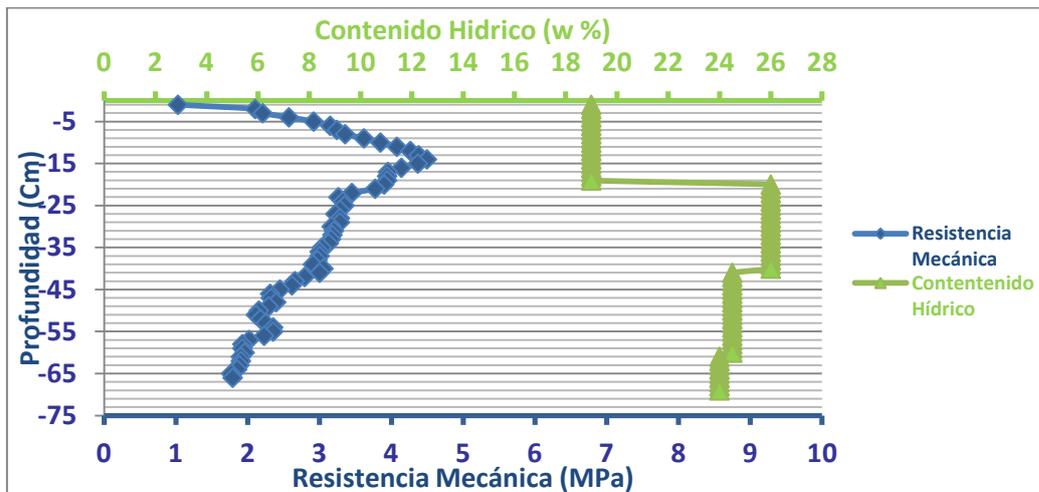


Figura 18. Relación entre la resistencia mecánica y el contenido hídrico de un suelo antes de ser arado con un paratil en la localidad de La Puerta. (Datos propios)

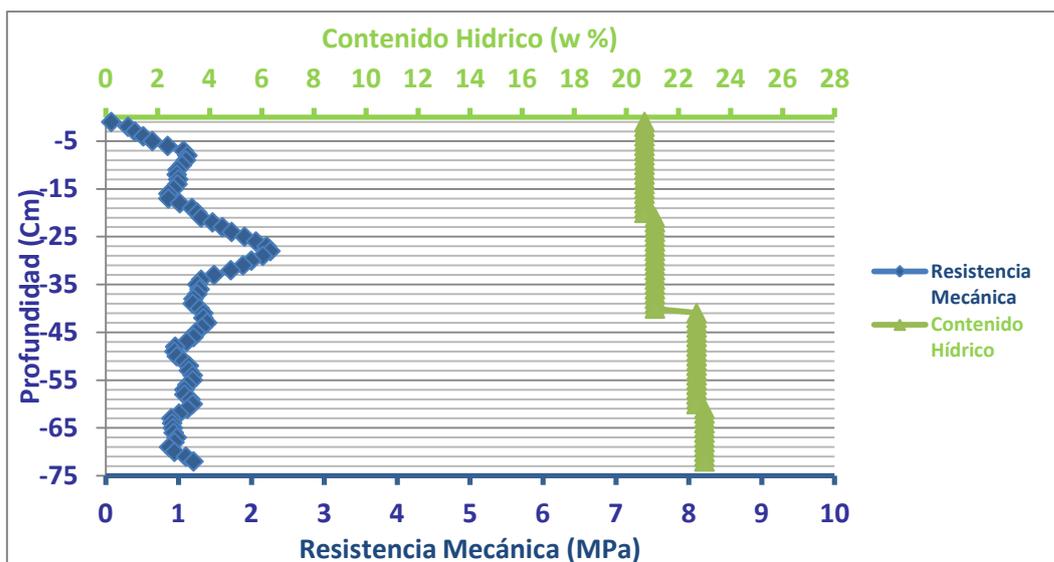


Figura 19. Relación entre la resistencia mecánica y el contenido hídrico de un suelo después de ser arado con un paratil en la localidad de La Puerta. (Datos propios)

En las Figuras 18 y 19 se observa la comparación de un lote, donde se reflejan la resistencia mecánica antes y después de ser laboreado con un arado de paratil. La resistencia disminuyó un 51 % en los primeros 25 cm luego de ser arado (4.5 vs 2.2 MPa) sin una modificación significativa en el contenido hídrico en los primeros cm de suelo (19 % vs 20,7 %) Estos resultados coinciden con experiencias realizadas previamente (Alvarez *et al.*, 2009) donde determinaron cambios inmediatos en la resistencia mecánica

(y en la infiltración) luego de ser arado con un implemento de labranza profunda. Existe evidencia bibliográfica que la disminución en la resistencia mecánica, si bien no asegura un aumento en el rendimiento del cultivo siguiente (ya que el rendimiento es multifactorial), puede aumentarla de manera significativa (Díaz Zorita, 2000; Álvarez *et al.*, 2009).

La profundidad hasta la cual tiene efecto directo esta labranza llegó a 25-30 cm y es comúnmente en estas profundidades donde se encontraron las mayores resistencias a la penetración en las mediciones llevadas a cabo en la zona de influencia de este trabajo.

4.3. EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN

Otra práctica para contrarrestar los efectos perjudiciales de la resistencia mecánica y lo que ella representa para el crecimiento radical, es el aporte de N, ya que éste mejora la longitud y superficie expuesta de la raíz (Costa *et al.*, 2002). Otros autores encontraron que la aplicación de Nitrógeno estimuló la producción de raíces superficiales en un estadio temprano de crecimiento del maíz (Oikeh *et al.*, 1999). Estos mismos autores también sostienen que con moderados valores de este nutriente (0,56 g/planta) se produjo el mayor crecimiento y distribución de raíces. Con una densidad de 65000 plantas/ha esta cantidad representa 36,4 kg de N/ha. También Costa *et al.* (2002) determinaron que el aporte de 127,5 kg de N ha⁻¹ ocasionó la mayor longitud y superficie expuesta de distintos tipos de maíces (maíz *leafy* normal, maíz *leafy* estatura reducida y un híbrido comercial Pioneer), aunque esta dosis fue intermedia dentro del ensayo planteado.

Es preciso destacar que en situaciones de impedancias mecánicas este nutriente puede ser escaso, ya sea por la falta del oxígeno necesario para la mineralización del nitrógeno orgánico y la consecuente producción de nitratos, por desnitrificación o por no poder llegar a las raíces por la baja conductividad hidráulica, entre otras razones.

Un estudio realizado por Díaz Zorita (2000) combina la dosis de N, la densidad aparente y su influencia en el rendimiento de maíz (Figura 20). Si bien estos ensayos no fueron efectuados en suelos sódicos, sus resultados marcan una tendencia que sería interesante ajustar en estas situaciones.

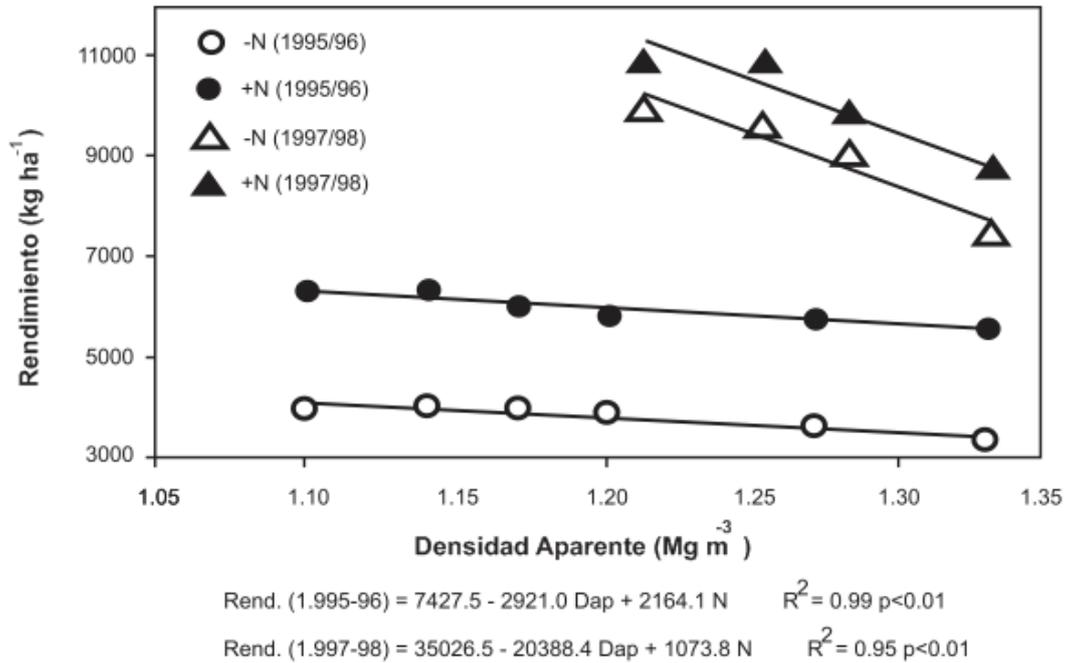


Figura 20. Efecto de la densidad aparente del suelo y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo de maíz en un Hapludol típico del oeste de la Region Pampeana (Adaptado de Diaz Zorita, 2000).

La resistencia mecánica genera que la profundización de raíces se vea afectada en forma proporcional al valor de la misma, aunque usualmente no todas las partes del sistema radical son equitativamente expuestas a la compactación bajo condiciones de campo (Unger y Kaspar, 1994). Por lo tanto, debido al crecimiento compensatorio en las partes sin obstáculos al sistema radical, solamente la distribución será alterada y no la longitud total de raíces. Incluso si la compactación limita el crecimiento de las raíces, algunos eventos meteorológicos (lluvias, napas) pueden mejorar o disminuir los efectos de la limitación en la raíz sobre el crecimiento del cultivo (Unger y Kaspar, 1994). Por esta razón es que en años donde las precipitaciones son abundantes las raíces pueden atravesar capas densas cuando normalmente no lo podían lograr. En estas situaciones puede observarse que un cultivo no presenta tanta variabilidad fenotípica (homogeneidad del cultivo) como cuando las condiciones hídricas son escasas.

A pesar de esto, la distribución de raíces no es un tema menor. Estudios de modelado en el cinturón maicero de Estados Unidos sugieren que los cambios en la arquitectura del sistema radical (del maíz) y captura de agua, tienen mayor efecto en la

tasa de crecimiento y acumulación de biomasa del cultivo que cambios en la arquitectura del canopeo y captura de luz por parte del cultivo. Tanto la tasa de crecimiento como la acumulación de biomasa y su interacción con la densidad de plantas están asociadas a incrementos históricos de rendimientos en el cinturón maicero estadounidense (Hammer *et al.*, 2009).

Frente a este comportamiento es indispensable una mejor cuantificación del agua disponible del suelo en el cultivo de maíz (Hammer *et al.*, 2009). No se podrá obtener el valor máximo de agua útil diaria (mm de agua por m de perfil de suelo por día) en suelos donde existen limitaciones para la distribución uniforme de las raíces, aun cuando se alcancen valores de densidad radical por encima del valor crítico (Dardanelli *et al.*, 2008). Es decir, que el cultivo de maíz puede tener una gran cantidad de raíces y no poder utilizar el agua útil disponible. Por lo expuesto, se puede ver que es muy común sobrevaluar la disponibilidad hídrica sin tener presentes los conceptos antes mencionados.

Con respecto a absorción de nutrientes, éstos también se ven afectados, fundamentalmente aquellos poco móviles. Más aun, muchos modelos de absorción de agua e iones disponibles para el sistema radical involucran el supuesto de que las raíces están uniformemente distribuidas en el perfil del suelo. Esta suposición rara vez se cumple en forma natural (Taylor y Brar, 1991).

En otros cultivos se ha encontrado también que el ángulo de las raíces puede variar. Así, en trigo encontraron que variedades más adaptadas a zonas más secas producían raíces más verticales que aquellas adaptadas a zonas con anegamientos periódicos (Dardanelli *et al.*, 2008).

Cuando se evalúe la tolerancia a la sequía (y eficiencia de uso del N ya que este elemento se mueve a través de flujo masal en el suelo) en la selección de híbridos de maíz, deberían considerarse diferencias en la morfología de sus raíces (y el efecto de N sobre el sistema radical) al enfrentar suelos con capas duras (Oikeh *et al.*, 1999), ya que las plantas con raíces profundas generalmente sobreviven mejor en sequía que plantas con sistema radical superficial porque acceden a más agua. Por lo tanto, en las regiones semiáridas, donde es común que los cultivos estén sujetos a sequías ocasionales, las especies o variedades que poseen raíces más profundas, demuestran mayor potencial de

rendimiento (Taylor y Klepper, 1973). Diversos resultados ratifican este comportamiento; por ejemplo, Gaggioli *et al.* (2010) lo observaron en la zona semiárida pampeana al comparar híbridos de maíz de distintos ciclos y distinta profundización de raíces.

No obstante, debe considerarse que la densidad de raíces de un cultivo no es un factor aislado del resto de la planta, por lo que no hay que dejar de tener en cuenta otros parámetros tales como índice de cosecha y costo de mantenimiento radical, ya que el desarrollo de un sistema difuso requiere cantidades importantes de asimilados para su crecimiento y mantenimiento.

CONSIDERACIONES FINALES

La Infiltración de agua en el suelo es una propiedad que, en general, no es evaluada y en muchos casos genera grandes pérdidas de rendimiento, fundamentalmente en suelos sódicos. De la misma manera, la redistribución de la solución en estos suelos (sódicos de textura franca o más fina) es baja a muy baja, por lo que el suelo no es capaz de compensar la demanda hídrica ni de nutrientes por parte del cultivo en los distintos estadios fenológicos. Esto se manifiesta aún más en épocas de siembras tempranas (Setiembre-Octubre) donde posteriormente, el periodo crítico coincide con un alto déficit de presión de vapor y con las mayores demandas por parte del cultivo (Diciembre-Enero).

En suelos sódicos la disponibilidad hídrica puede ser muy inferior a la estimada. Una mejor cuantificación del agua del suelo disponible en el sistema de cultivo de maíz y su extracción por las raíces en profundidad, son factores críticos para el avance del rendimiento (Hammer *et al.*, 2009).

En los suelos sódicos existe un importante nivel de resistencia mecánica, el cual dificulta la exploración por parte de las raíces, la absorción de agua y los nutrientes con los cual se ve afectado el rendimiento.

El Paratil es una herramienta de resultados comprobados en los casos que existe una capa con alta resistencia mecánica. El agregado de yeso como enmienda cálcica, en suelos sódicos, tuvo respuestas positivas o nulas, lo que demuestra la complejidad en el manejo de esta práctica.

Se relevó la existencia de algunos canales de investigación en lo que respecta a maíces con tolerancia a salinidad, sodicidad y anegamiento. Existe variabilidad genética intraespecífica, lo que permitiría desarrollar cultivos con cierta tolerancia a algunos ambientes de este tipo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, C.R., M. Torres Dugan, E.R. Chamorro, D. D'ambrosio y M. A. Taboada. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: Efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo*, 27(2): 159-169.
- Bachmeier, O.A., E.V. Buffa y S.B. Hang, A.A. Rollan. 2007. *Temas de Edafología*. SIMA Editora, Córdoba. 310 pp.
- Costa, C., L. M. Dwyer, X. Zhou, P. Dutilleul, C. Hamel, L.M. Reid and D. L. Smith. 2002. Root development. Root morphology of contrasting maize genotypes. *Agronomy Journal*, 94: 96-101.
- Dardanelli, J., D. Collino, M. E. Otegui y V. Sadras. 2008. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Ed. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires.
- Diaz Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil & Tillage Research*, 54: 11-19.
- FAO. 2002. La sal de la tierra: peligro para la producción de alimentos. Disponible en www.fao.org/worldfoodsummit/spanish/newsroom/focus/focus1.htm. Verificado: 08/2011.
- FAO. 2011. TERRASTAT: Major soil constraints (Sodicity, Shallowness, Erosion Risk) Disponible en www.fao.org/ag/agl/agll/terrastat/. Verificado: 08/2011.
- Flowers, T.L. 2004. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 55, No. 396, pp. 307±319.
- Gaggioli, C., D. Funaro, E. Noellemeyer y, M. Juan. 2010. Abundancia de raíces y rendimiento de diferentes híbridos de maíz en la región semiárida pampeana. IX congreso nacional de maíz y simposio nacional de sorgo. Rosario. 17 al 19/11/2010, 82-84.

- Hammer, G. L., Z.Dong, G. McLean, A. Doherty, C. Messina, J. Schussler, C. Zinselmeier, S. Paszkiewicz, and M. Cooper. 2009. Can change in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. corn belt? *Crop Science*, 49: 299-312.
- Lavado, R. S. y M. A. Taboada. 2009. Los procesos de salinización globales y específicos de la pampa húmeda. 1er Congreso de la Red Argentina de Salinidad. Córdoba 11 al 13 de marzo.
- Lebron, I., D.L. Suarez and T. Yoshida. 2002. Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soil under reclamation. *Soil Science Society of America Journal*, 66:92-98.
- Levy, G. J., D. Goldstein, and A. I. Mamedov. 2005. Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: combined effects of salinity, sodicity, and rate of wetting. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 653-662.
- Mathers, A.C., F.B. Lotspeich, G.R. Laase and G.C. Wilson.1966. Strength of compacted Amarillo fine sandy loam as influenciaded by moisture, clay content and exchangeable cation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:788-791
- Oikeh, S.O., J.G. Kling, W.J. Horst, V.O. Chude, R.J. and R. J. Carsky.1999. Growth and distribution of maize roots under nitrogen fertilization in plinthite soil. *Field Crops Research*, 62: 1-13.
- Phillips, R. E. and D. Kirkham.1962. Mechanical impedance and corn seedling root growth. *Soil Science Society of America*, 26, 319-322.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *American Institute of Physics*
- Richards, L. A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Agriculture Handbook No. 60. United State Departament of Agriculture.
- Rollán, A. A., y O. A. Bachmeier. 2013. Siembra directa: Evaluación de la densidad aparente como indicador de la necesidad de labores de descompactación. *Nexo Agropecuario Vol 1- N° 2*.

- Shainberg, I and J. Letey .1984. Response of soil to sodics and saline conditions. *Hilgardia*, 52, 1-57.
- Shainberg, I and M. J. Singer. 2012. *Agricultural salinity Assessment and Management*, Second edition. 1077 pp.
- Soil Science Society of America. 2001. *Glossary of soil science terms*. Soil Science Society of America, Inc Madison, Wisconsin. 135 p.
- Taboada, M. A., y F. G. Micucci. 2004. *Fertilidad física de suelos*. Ed. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires. 79 pp.
- Taboada, M. A., y R.S. Lavado.2009. *Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El Halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones*. Ed. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires. 163 pp.
- Taleisnik, E., K. Grunberg y, G. Santa Maria. 2008. *La salinización de suelos en la argentina: Su impacto en la producción agropecuaria*. Ed. Universidad Católica. 118 pp.
- Tassile, J., B. Jarsúm, J. Gorgas, E. Zamora, H. Bosnero, E. Lovera y E. Ravelo. 2006. *Los Suelos. Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba*. Gobierno de Córdoba.612 pp.
- Taylor, H. M. and E. Burnett. 1964. Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. *United States Department of Agriculture*. 174-180.
- Taylor, H.M. and B. Klepper.1973. Root density and water extraction patterns for corn (*Zea mays* L.). *Agronomy journal*, 65: 965-968.
- Taylor, H. M. and G.S Brar.1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, 19:111-119.
- Unger, P.W. and T. C. Kaspar. 1994. Soil compaction and root Growth: A review. *Agronomy Journal*, 86: 759-766.
- USDA.1999. *Soil Quality Test Guide*. 82 pp.

- Veen, B. W. and F.R. Boone. 1990. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil and Tillage Research*, 16: 219-226.
- Wilson, M., O. Papparotti, A. Paz Gonzalez y E. Díaz Ucha. 2006. Ecuaciones de ajuste entre la resistencia a la penetración y el contenido hídrico en un lote en siembra directa. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Actas en CD ROM.
- Zamora, E. 2005. Reconocimiento de suelo en establecimiento El cortijo. Informe técnico. 50 pp.