

Incremento de la resistencia mecánica de un suelo Udertic Ustochrepts tratado con agua enriquecida en sodio

Melani, Esteban^{1,4}; Laura Draghi²; Paolo Spugnoli³; Telmo Palancar²

¹INTA EEA Cuenca del Salado. Mitre n°202, Chascomús, Buenos Aires. ²Mecánica Aplicada. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Universidad Nacional de La Plata. Av. 60 y 119. ³Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali (DEISTAF). Facoltà di Agraria e Forestale. Università degli studi di Firenze. Piazzale delle Cascine 18. 50144 Firenze (FI). Italia; ⁴estebanmelani@hotmail.com

Melani, Esteban; Laura Draghi; Paolo Spugnoli; Telmo Palancar (2013). Incremento de la resistencia mecánica de un suelo Udertic Ustochrepts tratado con agua enriquecida en sodio. Rev. Fac. Agron. Vol 112 (2): 123-130.

Las altas concentraciones de sodio en la solución del suelo, contribuyen al incremento de la presencia de cargas repulsivas que provocan la dispersión de la arcilla y el aumento de los microporos y modifican la compresibilidad del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento a la compresión de agregados individuales de diferente tamaño así como de probetas de un suelo Udertic Ustochrepts tratado con dos soluciones de diferente concentración de sodio obteniéndose dos tratamientos: sódico y no sódico. Los agregados de suelo de ambos tratamientos fueron clasificados en tres fracciones granulométricas. Para el estudio de los agregados individuales, fueron sometidos a rotura 20 agregados de cada una de las clases. Asimismo se conformaron probetas de suelo con las distintas granulometrías para ser ensayadas a la compresión uniaxial. Con las curvas de compresión se determinó la tensión de preconsolidación. Se obtuvo la Línea Virgen en cada tratamiento y clase granulométrica. En el ensayo de agregados individuales, los de mayores dimensiones presentaron una menor resistencia a la rotura. La tensión de rotura del tratamiento sódico fue superior. En el ensayo a la compresión uniaxial, se registraron menores valores de Volumen Específico Inicial del tratamiento más sodificado. La reducción del Volumen Específico fue menos pronunciada en el tratamiento más sodificado. No se hallaron diferencias en la tensión de preconsolidación. Se hallaron mayores pendientes en las Líneas Vírgenes de las clases de agregados de mayor tamaño. El sodio disminuye la vulnerabilidad a la compresión de los suelos. Los agregados de mayores dimensiones son más susceptibles a la compresión.

Palabras clave: resistencia a rotura, tamaño de agregados, compresión uniaxial, tensión de preconsolidación, dispersión de arcillas.

Melani, Esteban; Laura Draghi; Paolo Spugnoli; Telmo Palancar (2013). Increment of mechanical strength of Udertic Ustochrepts treated with high concentration sodium water. Rev. Fac. Agron. Vol 112 (2): 123-130.

High sodium concentration in soil solution contributes to the increased of repulsive charges which cause the dispersion of the clay particles increasing of micropores and changing soil compactness. The purpose of this study was to evaluate the compression behavior of soil aggregates of different sizes as well as a Udertic Ustochrepts measurement soil cylinders treated with two different concentration solutions of sodium obtaining two treatments: sodic and non sodic. Aggregates of both treatments were classified in three size fractions by sieving. Twenty aggregates of each granulometric classes of both treatments were subjected to breakage. In addition measurement soil cylinders were formed with soil of different granulometries to be tested to the uniaxial compression test. The precompaction stresses were calculated with compression curves. Virgin lines of both treatments and all granulometric class were draw. Big aggregates showed lower breaking strength than those of smaller dimensions. Breaking strength of sodic treatment was higher than in non sodific treatment. In uniaxial compression test low values of initial specific volume were achieved by high sodium treatment. Reduction of specific volume was less pronounced in high sodium treatment. No differences in precompaction stress were found. High slope of virgin lines were found in larger aggregate classes. Sodium decrease soil compactness vulnerability. Bigger aggregates are more susceptible to compression.

Keywords: *tensile strength*, aggregate size, uniaxial compression test, precompaction stress, clay dispersion.

Recibido: 19/06/2013

Aceptado: 27/08/2013

Disponible on line: 20/09/2013

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCIÓN

La población mundial estimada en 9400 millones de personas para 2025, requerirá un aumento del 40-50% de la producción de alimentos (Lal, 2000). Se prevé el incremento de las 2/3 partes de la superficie arable incorporándose áreas desérticas mediante el riego. Un manejo inadecuado del mismo puede causar deterioros de la fertilidad química y especialmente física de los suelos con efectos muy difíciles de revertir (Vázquez et al., 2008). Todas las aguas de riego, superficiales o subterráneas, contienen en mayor o menor medida sales solubles, sodio, cloro y otros elementos (Rhoades, 1997). La existencia de altas concentraciones de Na^+ en la solución del suelo favorece el desplazamiento de otros cationes en los sitios de intercambio y contribuye al incremento de la presencia de cargas repulsivas que provocan la dispersión de las partículas de arcilla (Bronick y Lal, 2005).

El tránsito y laboreo del suelo agrícola, implica su deformación y posible rotura por compresión y/o corte. El estudio de la susceptibilidad de los suelos a la compresión y sus posibles consecuencias agronómicas, puede hacerse ensayando agregados individuales o probetas de suelo conformadas artificialmente con agregados de igual tamaño. La resistencia de los agregados es un indicador clave para explicar los atributos estructurales del suelo y su comportamiento cuando es sometido a tratamientos de labranza, operaciones de cultivo y aplicación de cargas externas. En un Alfisol sometido a diferentes rotaciones de cultivos (desde suelo virgen hasta siembra de trigo todos los años), se observó en 3 niveles de CE (Conductividad Eléctrica) combinados con 7 niveles de RAS (Relación de adsorción de Sodio), que la resistencia a rotura de los agregados (*tensile strength*) aumentó con el incremento de la RAS (Barzegar et al. 1994). Asimismo, el módulo de ruptura de agregados de un Natracuol se incrementó con el incremento de la RAS (Taboada y Lavado 1996). En contraposición, Rahimi et al. (2000) indagaron en el comportamiento de suelos sodificados artificialmente y sometidos a ciclos de humectación – desecación, con una duración de 48 horas por ciclo, observando que la resistencia a rotura de los agregados disminuye con el aumento de las arcillas dispersas debido a la RAS. Los autores explican que estas diferencias de comportamiento son debidas a los ciclos humectación – desecación los cuales reducen la estabilidad de los agregados. Nanucci (2009) en cambio, encontró una mayor resistencia a la rotura en agregados y una menor sensibilidad a la compresión de los suelos con mayor contenido de sodio, atribuyendo estos resultados a la presencia de arcilla dispersa que forma fuertes uniones.

La resistencia a la rotura de los agregados de un Cambisol disminuye con el aumento del diámetro de los mismos y los agregados de mayores dimensiones son más susceptibles a la compresión respecto aquellos más pequeños con el mismo grado de humedad (Willat 1987). Utomo y Dexter (1981) encontraron que los agregados de un suelo sometido a humidificación – desecación sufrieron micro – fracturas que redujeron su resistencia a rotura, siendo más notable este efecto en agregados de mayor tamaño. Draghi et al. (2009)

obtuvieron los mismos resultados trabajando sobre un Ustic Endoaquert sodificado mientras que no encontraron diferencias en la resistencia a la rotura entre tamaño de agregados en el tratamiento testigo. Esto pudo deberse al elevado contenido de arcillas de los suelos ensayados (73%) que generaría un valor de cohesión molecular muy alto en seco, no permitiendo manifestar el efecto de la variación del tamaño.

Falciani (2009) encontró diferencias significativas en la resistencia a la rotura de agregados pertenecientes a dos tratamientos, sodificado y testigo, en la clase granulométrica comprendida entre 3,35mm – 2mm. En dicho trabajo el suelo sodificado presentó valores medios de resistencia a rotura de 255 kPa mientras que en el testigo fue de 123 kPa. Sin embargo el mismo autor no halló diferencias en la resistencia a rotura entre tratamientos para la clase de tamaño de agregados < 2mm. El autor concluye que el crecimiento radical implica una compresión del suelo, por lo tanto una menor susceptibilidad a la compresión limita en mayor medida dicho crecimiento.

Los suelos afectados por sodio se caracterizan por un aumento de su densidad (Rengasamy y Olsson, 1991; Amiotti y Bravo, 2006; Kaur et al., 2006; Jassogne et al., 2006; Currie et al., 2006). Existen antecedentes suficientes que permiten afirmar que un elevado PSI (Porcentaje de Sodio de Intercambio) conduce a un reordenamiento poroso, aumentando los microporos (Waldrom y Constantin, 1968; Costa y Aparicio, 2000; Varallyay, 2002; Ruiz Vera y Wu, 2006). Varallyay (2002) afirma que un alto PSI ocasiona una significativa modificación de la estructura y más concretamente de la conformación del espacio poroso, modificando la compresibilidad de los suelos. Mitchell (1976) halló que una estructura de partículas floculadas presenta grandes poros, mientras que una dispersa tiene numerosos microporos; y a tensiones mayores que la tensión de preconsolidación (P_c) el efecto de incrementos de tensiones es mayor sobre las estructuras floculadas que sobre las dispersas. Ante un incremento dado de tensión, los poros de mayor tamaño son comprimidos primero (Delage y Lefebvre, 1984; Griffiths y Joshi, 1989). Rengasamy y Olsson (1991) concluyeron que la presencia de arcillas dispersas en los agregados del suelo produce diversos efectos asociados a incrementos de la fuerza de tracción necesaria para la labranza, la formación de costras que impiden la emergencia de las plantas y facilitan la erosión, menor porosidad y mayor resistencia de los agregados a ser penetrados por las raíces.

La Línea de Consolidación Virgen (también llamada línea de consolidación normal) responde a la ecuación $y = N + \lambda \ln x$ donde “y” es el Volumen específico y “x” es la Tensión Normal aplicada. El trazado de la curva de compresión permite visualizar la tensión normal a partir de la cual el suelo adquiere deformaciones irreversibles, denominada tensión de preconsolidación. La línea virgen se inicia en la tensión de preconsolidación y muestra cuál es la velocidad de compresión del suelo (Figura 1).

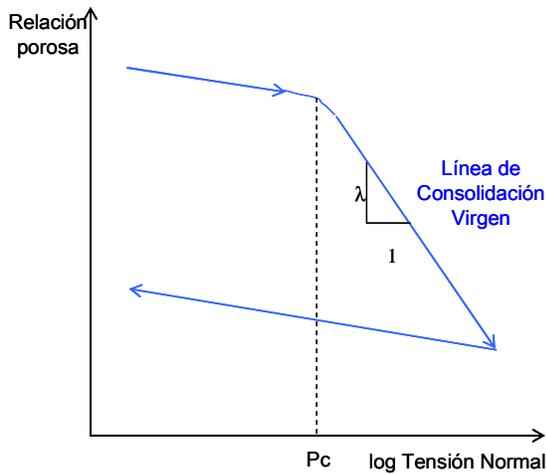


Figura 1: Curva de Compresión donde se ubica la Línea Virgen y la tensión de preconsolidación (Pc) siendo λ la pendiente.

Pareciera que los estudios sobre las implicancias de la posible sodificación de los suelos, se han orientado a las propiedades químicas que se modifican en el sustrato. Sin embargo no resultan suficientes los estudios que cuantifican las propiedades mecánicas del suelo a partir de ensayos comparables y repetibles. La física de los suelos sódicos y más concretamente las propiedades que los mismos manifiestan ante la aplicación de cargas externas, tiene un desarrollo menor y posterior en el tiempo que la química. Es muy probable que a consecuencia del incremento del área regada mundial, la superficie de suelos afectados por sodio se incremente, por lo cual es importante profundizar el conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los mismos para determinar las implicancias sobre aspectos tales como la labranza y el tránsito.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento a la compresión de agregados individuales de diferente tamaño así como de probetas de suelo de un horizonte superficial perteneciente a un Udertic Ustochrepts tratado con dos soluciones de diferente concentración de sodio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó material reconstituido en laboratorio de un suelo Udertic Ustochrepts correspondiente a la serie Ozzano (Italia). Las muestras fueron extraídas del horizonte Ap. Este suelo se caracteriza por poseer materiales no salinos, ricos en arcilla, pobre en sesquióxidos de hierro y aluminio, no calcáreo, con presencia de arcillas gris – amarillentas, próximas a la clase de colores 2,5Y. Los tipos de minerales de arcillas presentes son vermiculita, illita, esmectita y caolinita. (Patruno *et al.*, 2002; Cavazza *et al.*, 2002).

La composición química se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición y características químicas del suelo evaluado.

Análisis		Unidad	Ozzano
Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C.)		cmol _c kg ⁻¹	29,54
Materia Orgánica		g/kg	15,93
Carbonatos		g/100g secos	3,90
Conductividad (CE _{25°C})	Eléctrica	dS/m	0,03
Na ⁺		cmol _c kg ⁻¹	0,053
Na ⁺ /C.I.C		%	0,179
Ca ⁺⁺		cmol _c kg ⁻¹	26,06
Ca ⁺⁺ /C.I.C		%	88,21
pH en H ₂ O		-log[H ⁺]	7,30

La clase textural es franco-arcillo-limosa, presentando un 13,7 % de arena, 47,7 % de limo y 36,6 % de arcilla. El suelo fue tratado con soluciones conteniendo ClNa y Cl₂Ca, utilizando dos RAS (Relación de Adsorción de Sodio) y un nivel de salinidad (Tabla 2).

Tabla 2: Salinidad y sodicidad de las soluciones empleadas en los tratamientos.

	Salinidad (moles/litro)	Sodicidad (RAS)
Solución 1 (salino-sódica)	0,1	5
Solución 2 (salino-sódica)	0,1	45

El material original, seco y tamizado por malla de 2 mm, fue sumergido en una solución sodificante conteniendo CaCl₂ y NaCl durante 24 horas hasta su aparente saturación. A continuación se retiró del baño y se dejó drenar durante una hora para ser luego secado en estufa a 45°C durante 24 horas. Luego el material fue separado a mano en grandes piezas y secado en estufa durante 48 horas adicionales. Posteriormente fue roturado manualmente hasta lograr agregados de 2 - 3cm de diámetro y se repitió el proceso de inmersión en una nueva solución sodificante. Este ciclo se repitió 5 veces. Esta metodología se encuentra ampliamente detallada en Patruno *et al.* (2002).

Como resultado se obtuvieron dos tratamientos: Ozzano A (OZA) y Ozzano B (OZB), presentando OZA un mayor contenido de Na⁺ en solución que OZB. Los resultados de los análisis químicos de ambos tratamientos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: pH, Conductividad Eléctrica (CE) Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y Porcentaje de Sodio de Intercambio (PSI) de los tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico).

	pH (-log[H ⁺])	CE (dS/m)	RAS (%)	PSI (% de Na de Intercambio)	Humedad (%)
OZA	8,1	0,982	9,85	5,21	5,0
OZB	7,3	1,370	2,86	1,26	5,6

Los análisis químicos y los tratamientos fueron efectuados en el D.I.S.T.A. (*Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroforestali de la Università di Bologna, Italia*).

Los agregados de ambos tratamientos fueron clasificados en tres fracciones granulométricas mediante tamizado, obteniéndose las siguientes clases: I. agregados de 5 – 3,36 mm de diámetro.

II. agregados de 3,36 – 2 mm de diámetro.

III. agregados de 2 – 0,5 mm de diámetro.

Los agregados de un tamaño superior a la clase I fueron pasados por un molino para su trituración y vueltos a tamizar.

La humedad se calculó mediante método gravimétrico introduciendo las muestras en estufa a 105°C durante 48hs.

Pruebas de resistencia a rotura de agregados individuales

Fueron sometidos a rotura 20 agregados de cada una de las clases granulométricas de ambos tratamientos (OZA y OZB). Cada uno de los agregados fue pesado y colocado sobre un plato que se elevó por la acción de un pistón accionado por un motor eléctrico hasta romper el agregado al alcanzar el plato superior. Este último estaba conectado a una celda de carga utilizada para medir la fuerza (F) de rotura (Utomo y Dexter, 1981; Barzegar *et al.*, 1995).

La metodología que se empleó para el cálculo de la resistencia a rotura (Y), corresponde a aquella utilizada por Dexter y Kroesbergen (1985).

Se utilizaron las siguientes relaciones:

$$Y = 0,576 F/d^2 \quad (1)$$

$$d = d_m(m/m_0)^{1/3} \quad (2)$$

$$d_m = (s_1 + s_2)/2 \quad (3)$$

$$m_0 = (\sum m)/n \quad (4)$$

Donde F es la fuerza polar de rotura (medida a través de la celda de carga) y d es el diámetro esférico efectivo del agregado (ecuación 1); d_m es el diámetro medio de la clase de agregados calculado a partir de s_1 y s_2 que son el diámetro de la apertura de malla del tamiz superior e inferior utilizados en la formación de cada una de las clases de agregados (ecuación 3), m representa el valor individual de masa del agregado (obtenido con una balanza de precisión) y m_0 es la masa media de los agregados dentro de una misma clase (ecuación 2); n es el número de agregados evaluados por clase de agregados (20) (ecuación 4).

Pruebas de Compresión

Se comparó el comportamiento a la compresión de las diferentes clases granulométricas y la respuesta de ambos tratamientos (OZA y OZB) en las condiciones de humedad iniciales (Tabla 3).

Se utilizaron muestras de 100 g de suelo, en número de 4, para cada clase granulométrica de cada tratamiento, menos para el OZB clase I, que debido a la poca cantidad de dicha granulometría, solo se pudieron realizar 3 muestras.

Las muestras se comprimieron hasta alcanzar una presión de 605 kPa, valor con el cual Palancar (2007) encontró mayores diferencias de comportamiento en suelos salinizados - sodificados. Para tal fin se utilizó la celda de una caja de corte con un transductor de desplazamiento vertical (con una sensibilidad de 130 mV/mm) que permitió la medición de la altura de la muestra durante la compresión y a partir de allí el cálculo del Volumen Específico (valor inverso a la densidad aparente, su unidad es cm³/g de material). Las dimensiones de la celda fueron 40 mm de altura y 63,5 mm de diámetro. La compresión de las muestras se logró mediante un tornillo acoplado al sistema de la caja de corte. Dicho tornillo se encontraba unido al brazo de una palanca (donde fueron colocados los pesos discretos) con un factor multiplicativo de 5. El peso total a colocar en el extremo de la palanca para alcanzar los 605 kPa de presión fue de 39 kg. Los pesos parciales agregados fueron 5, 7, 9, 14, 19, 29 y 39 kg correspondientes con tensiones normales de 77, 108, 139, 217, 294, 449 y 605 kPa. El tiempo total empleado para la compresión fue de 195 segundos por lo que existió un lapso de tiempo de 30 segundos entre la colocación de los sucesivos pesos para permitir el reacomodamiento de la muestra.

Tanto la adquisición como el registro y almacenamiento de los datos recibidos desde el transductor de movimiento se llevó a cabo con el colector de datos Gould TA11. Dicho colector almacenó los datos de voltaje que luego fueron transferidos a un ordenador portátil. A partir de estos procedimientos fueron obtenidas las curvas de compresión y realizado el cálculo de P_c mediante el método de Casagrande (1936). A continuación se obtuvo la Línea Virgen (LV) de cada clase granulométrica y tratamiento a fin de evaluar la susceptibilidad a la compresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas de resistencia a rotura de agregados

En la Tabla 4 se presentan los valores de resistencia a la rotura comparando las medias de las distintas clases dentro de cada uno de los tratamientos.

En la Tabla 5 se presentan los valores de resistencia a la rotura comparando las medias de las distintas clases entre ambos tratamientos.

Los resultados de las pruebas mostraron que los agregados de mayores dimensiones presentaron resistencia a rotura menor a aquellos de dimensiones inferiores (Tabla 4). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Utomo y Dexter (1981) y Willat (1987) y parcialmente con los obtenidos por Draghi *et al.* (2009) quienes encontraron este efecto sólo en los suelos sodificados.

Tabla 4: Comparación de la resistencia a la rotura “Y” (kPa) entre clases de agregados individuales sometidos a tracción para ambos tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico). Letras diferentes denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Tratamiento	Y (kPa)
OZA I	181,5 b
OZA II	234,9 b
OZA III	440,9 a
OZB I	68,7 b
OZB II	121,0 b
OZB III	277,5 a

Tabla 5: Comparación de la resistencia a la rotura “Y” (kPa) entre tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico) para las tres clases de agregados. Letras diferentes denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Tratamiento	Y (kPa)
OZA I	181,5 a
OZB I	68,7 b
OZA II	234,9 a
OZB II	121,0 b
OZA III	440,9 a
OZB III	277,5 b

En lo referente a la resistencia a la rotura en función de la sodicidad, se observó que el tratamiento OZA presentó valores superiores al tratamiento menos sodificado (OZB). En el caso del tratamiento OZA, las arcillas dispersas por efecto del sodio según lo afirmado por Bronick y Lal (2005), habrían conferido mayor resistencia a la rotura respecto a los agregados del tratamiento OZB. Estos resultados son respaldados por Barzegar *et al.* (1994) en relación a la acción dispersiva del sodio en un suelo fino. Estos autores observaron también una correlación negativa entre la resistencia a la rotura y el Diámetro Medio Efectivo denominado MWD (*mean weight diameter*), siendo este último un indicador de su estabilidad. Agregados más estables presentaron mayores valores de MWD y agregados menos estables a causa del tratamiento con soluciones de mayor RAS presentaron menores MWD y por ende menor estabilidad y mayor resistencia a rotura. En igual sentido Nanucci (2009) encontró mayor resistencia a la rotura en agregados con mayor contenido de sodio y menor sensibilidad a la compresión debida a la presencia de arcilla dispersa.

Falciani (2009) registró mayores valores de resistencia a la rotura en suelos sodificados en la clase granulométrica comprendida entre 3,35mm – 2mm. Sin embargo, los resultados no coinciden con Rahimi *et al.* (2000) quienes encontraron que en suelos sodificados artificialmente y sometidos a ciclos de humectación – desecación, la resistencia a rotura de los agregados disminuye con el aumento de las arcillas dispersas debido a la RAS.

Debe, por lo tanto, prestarse especial atención a la sodificación que se provocaría en el suelo a causa del riego debido a las implicancias que esto puede tener en

sus propiedades físicas (Rhoades, 1997). Un incremento en el contenido de sodio implicará un aumento en la resistencia a la rotura de los agregados y en consecuencia en las operaciones de laboreo con el consiguiente aumento del consumo de combustible. Asimismo, la mayor resistencia de los agregados conllevará a una mayor impedancia para el crecimiento de las raíces y la emergencia de los cultivos producto del posible encostramiento (Falciani, 2009).

Pruebas de Compresión

Curvas de Compresión

El análisis estadístico de los valores de Volumen Específico Inicial (que se corresponde con la tensión normal nula) y Final (que se corresponde con la mayor tensión normal aplicada) permiten conocer el comportamiento de los suelos a la aplicación de tensiones normales y por ende su susceptibilidad a la compresión. Otro aspecto fundamental para conocer dicho comportamiento es el análisis de las Líneas de Consolidación Virgen, especialmente su pendiente (λ), analizado más adelante.

En la Tabla 6 se visualizan los menores valores de Volumen Específico Inicial del tratamiento más sodificado (OZA). Numerosos trabajos han encontrado que los suelos afectados por sodio se caracterizan por una disminución de su porosidad y por lo tanto presentan un aumento de su densidad (Rengasamy y Olsson, 1991; Amiotti y Bravo, 2006; Kaur *et al.*, 2006; Jassogne *et al.*, 2006; Currie *et al.*, 2006). Rengasamy y Olsson (1991) manifestaron que la presencia de arcillas dispersas en los agregados del suelo produce diversos efectos verificados en la respuesta mecánica de los suelos. Dichos efectos son asociados, principalmente, a incrementos de la fuerza de tracción necesaria para la labranza, a la formación de costras que impiden la emergencia de las plantas debido a la menor porosidad y a una mayor resistencia de los agregados a ser penetrados por las raíces y facilitan la erosión.

Puede hipotetizarse que los agregados de los tratamientos OZB estaban a su vez constituidos por la unión de agregados más pequeños, otorgándoles mayor porosidad lo que redundaría en valores de Volumen Específico Inicial mayores. Por otro lado los agregados de los tratamientos OZA presentarían una constitución masiva, densa y fuertemente cementada por acción de las arcillas dispersas, otorgándole mayor densidad (menor Volumen Específico Inicial).

En general, la reducción de Volumen Específico ante la aplicación de tensiones normales fue menos pronunciada en el tratamiento OZA, debido posiblemente a la mayor densidad y cementación de las uniones intra-agregados. En el tratamiento OZB, la mayor porosidad de sus agregados, y por ende mayor friabilidad, habría conferido menor resistencia a la compresión uniaxial y por lo tanto mayores reducciones de Volumen Específico.

Un suelo más poroso y con agregados menos tenaces es más fácilmente compresible debido a que ante la aplicación de tensiones normales, sus agregados se romperán con mayor facilidad en agregados de menor tamaño. A su vez esos agregados más pequeños encontrarán más fácilmente poros donde reacomodarse y alojarse presentando menor resistencia a la

compresión (Delage y Lefebvre, 1984; Griffiths y Joshi, 1989).

Tabla 6: Comparación de Volumen Específico Inicial y Final entre tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico) para todas las clases de agregados. Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Tratamiento	Volumen Específico Inicial (cm ³ /g)			Volumen Específico Final (cm ³ /g)		
	I	II	III	I	II	III
	OZA	1,01 b	0,98 b	0,94 b	0,89 a	0,87 a
OZB	1,21 a	1,15 a	0,99 a	0,81 b	0,82 b	0,85 a

Comparando las diferentes clases granulométricas de OZA se observa que los valores de Volumen Específico Inicial presentaron un gradiente desde la clase I a la III, manteniendo el mismo gradiente en los valores de Volumen Específico Final (Tabla 7).

Para el caso de OZB la disminución de diferencias entre los valores de Volumen Específico Final entre clases granulométricas denotaría la mayor susceptibilidad a la compresión de los agregados de mayor tamaño con respecto a los más pequeños ya que los primeros, partiendo de valores iniciales más altos, arriban a situaciones similares de éste parámetro acortando sus diferencias (Tabla 7).

Tabla 7: Comparación de Volumen Específico Inicial y Final entre Clases granulométricas (I a III) para ambos tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico). Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Clase Granulométrica	Vol. Esp. Inicial (cm ³ /g)		Vol. Esp. Final (cm ³ /g)	
	OZA	OZB	OZA	OZB
I	1,01 a	1,21 a	0,89 a	0,81 a
II	0,98 b	1,15 b	0,87 b	0,82 a
III	0,94 c	0,99 c	0,84 c	0,85 a

Tensión de pre-consolidación (Pc)

No se hallaron diferencias significativas de tensión de preconsolidación (Pc) entre ambos tratamientos (Tabla 8). Numerosos autores han discrepado en la incidencia que tiene la densidad inicial del suelo sobre la Tensión de preconsolidación. Alexandrou y Earl (1998) encontraron que en suelos franco – arenosos los valores de Pc fueron directamente proporcionales a la densidad inicial, mientras que en suelos arcillosos Pc

dependió únicamente del contenido hídrico. Mosaddeghi et al. (2003) sostuvieron que el incremento de la Tensión de Preconsolidación fue marcadamente independiente de la densidad inicial del suelo pero marcadamente dependiente de la humedad. Lebert y Horn (1991) indicaron que la relación existente entre Pc y la densidad del suelo disminuye a medida que aumenta el contenido de arcilla.

Tabla 8: Comparación del parámetro Tensión de preconsolidación (Pc) entre tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico). Letras diferentes denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Tratamiento	Tensión de Preconsolidación (Pc (kPa))	
	Pc (kPa)	p < 0,05
OZA I	61,16	a
OZB I	56,69	a
OZA II	53,81	b
OZB II	63,45	a
OZA III	51,26	a
OZB III	54,93	a

Línea Virgen

Los valores de λ (pendiente de la Línea Virgen), valor del término independiente (N) y las diferencias estadísticas entre tratamientos se visualizan en la Tabla 9. Las diferencias encontradas en el término independiente de la Línea Virgen (N) confirman el análisis de los resultados realizado precedentemente, al comparar los valores de Volumen Específico Inicial entre ambos tratamientos.

Tabla 9: Comparación de pendientes de Línea Virgen (λ) y término independiente (N) entre tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico) para todas las clases granulométricas. Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Tratamiento	Pendientes de LV	
	λ	N
OZA I	-0,047 a	1,194 b
OZB I	-0,158 b	1,834 a
OZA II	-0,040 a	1,133 b
OZB II	-0,125 b	1,638 a
OZA III	-0,036 a	1,083 b
OZB III	-0,050 a	1,177 a

Se hallaron mayores λ en las LV (Línea Virgen) de las clases I y II entre ambos tratamientos pero no en la clase III debido posiblemente al menor contenido de macroporos de la clase menor respecto aquellas de agregados mayores, lo que conferiría a los tratamientos una pendiente similar (Tabla 9).

Existen antecedentes suficientes que permiten afirmar que un elevado PSI conduce a un reordenamiento poroso, aumentando los microporos (Waldrom y

Constantin, 1968; Costa y Aparicio, 2000; Varallyay, 2002; Ruiz Vera y Wu, 2006). Esto explicaría las diferencias halladas entre tratamientos en las clases de agregados I y II.

Si bien en el material utilizado no existe estructura como tal, debido a que se partió de suelo molido y tamizado, puede suponerse que la acción del sodio en el tratamiento OZA ha conducido a un reordenamiento poroso en el material remanente, disminuyendo el número de poros mayores, más compresibles. Varallyay (2002) afirma que un alto porcentaje de sodio intercambiable (PSI) ocasiona una significativa modificación de la estructura y más concretamente de la conformación del espacio poroso, modificando la compresibilidad de los suelos. Mitchell (1976) estudió la incidencia de la aplicación de tensiones normales sobre la estructura determinando que aquellas con partículas floculadas presentan mayor susceptibilidad a la compresión por la existencia de grandes poros, mientras que en estructuras dispersas con numerosos microporos el efecto de incrementos de tensiones es menor. Ante un incremento dado de tensión, los poros de mayor tamaño son comprimidos primero (Griffiths y Joshi, 1989). Si los agregados mayores poseen poros de mayor tamaño que los agregados chicos, los suelos donde predominen agregados mayores tendrían una menor resistencia a la compresión uniaxial. Las pendientes de las Líneas Virgen siguen un orden claro en función del tamaño de agregados de cada una de las clases. Las clases superiores (mayor cantidad de macroporos y menor resistencia a rotura) presentaron pendientes mayores que las clases con agregados de menores dimensiones (Tabla 10).

Tabla 10: Comparación de pendientes de Línea Virgen entre todas las clases granulométricas (I a III) para ambos tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico). Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Clase Granulométrica	Pendientes de LV (λ)	
	OZA	OZB
I	-0,047 b	-0,158 c
II	-0,040 a	-0,125 b
III	-0,036 a	-0,050 a

El comportamiento del término N en las diferentes clases granulométricas para un mismo tratamiento (Tabla 11), sigue la misma tendencia que la hallada en los valores de Volumen Específico Inicial (Tabla 7). Los agregados de mayor tamaño presentaron mayor porosidad inicial y mayor N, independientemente del tratamiento.

Tabla 11: Comparación de Términos Independientes de la ecuación de LV entre todas las clases granulométricas (I a III) para ambos tratamientos (OZA sódico y OZB no sódico). Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD $p < 0,05$).

Tratamiento	Término Independiente de LV (N)	
	OZA	OZB
Clase I	1,194 a	1,834 a
Clase II	1,133 b	1,638 b
Clase III	1,083 c	1,177 c

CONCLUSIONES

El sodio aumenta la resistencia a la rotura de los agregados independientemente de su tamaño. Los agregados de mayores dimensiones son menos resistentes a la rotura.

El sodio disminuye la vulnerabilidad a la compresión de los suelos.

Son más susceptibles a la compresión los suelos con agregados de mayores dimensiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Alexandrou, A., R. Earl.** 1998. The Relationship among the Pre-compaction Stress, Volumetric Water Content and Initial Dry Bulk Density of Soil. Journal of Agricultural Engineering Research. 80, 71-75.
- Amiotti, N., O. Bravo.** 2006. Suelos de las terrazas del río Colorado: Características e impacto del riego por gravedad. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19 al 22 de septiembre de 2006. Salta, Argentina
- Barzegar, A.R., J.M. Oades, P. Rengasamy, L. Giles.** 1994. Effect of sodicity and salinity on disaggregation and tensile strength of an Alfisol under different cropping systems. Soil and Tillage Research. 32, 329-345.
- Barzegar, A.R., P. Rengasamy, J.M. Oades.** 1995. Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soil. Geoderma. 68, 39-45.
- Bronick, C.J., R. Lal.** 2005. Soil Structure and management: a review. Geoderma. 124: 3-22
- Casagrande, A.** 1936. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Proc. Of ICSMFE. Cambridge. vol. 3, 60-64.
- Cavazza, L.; A. Patruno, E. Cirillo.** 2002. Soil traits and structure stability in artificially sodicated soils. Ital.J. Agron. 6 (1) 15-25.
- Costa, J.L., V. Aparicio.** 2000. Efecto del sodio en la degradación de los suelos del sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. 11ava Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del Suelo. 22 al 27 de Octubre de 2000. Buenos Aires, Argentina.
- Currie, D.R., C.D. Grant, R.S. Murria, M. McCarthy.** 2006. Does drip irrigation degrade soil structure in vineyards. 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, USA.

- Delage, P., G. Lefebvre.** 1984. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*. 21, 21-35.
- Dexter, A.R., B. Kroesbergen.** 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 31, 139-147.
- Draghi, L., D. Jorajuria, T. Palancar, P. Spugnoli, F. Guillino.** 2009. Enriquecimiento en sodio e impedancia mecánica del suelo. Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR. Editores Di Leo N.; Montico S.; Nardón G. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario. ISBN 978-950-673-748-1. 347-354.
- Falciani, S.** 2009. Effetti della sodicità sull'impedanza meccanica di un suolo agrario. Tesis doctoral.
- Griffiths, F.J., R.C. Joshi.** 1989. Change in pore size distribution due to consolidation of clays. *Geotechnique*. 39, 159-67.
- Jassogne, L.T.P., R. Davidson, A. McNeill, D. Chittleborough.** 2006. How do roots cope with sodic hostile subsoils?. 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, USA.
- Kaur, J., O.P. Choudhary, B. Singh.** 2006. Microbial biomass and different extractable organic carbon pools as influenced by sodic water irrigation, gypsum and organic amendemnts under rice-wheat system. 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, USA.
- Lal, R.** 2000. Soil management in the developing countries. *Soil Science*. 165 (1) 57-72.
- Lebert, M., R. Horn.** 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 19, 275-286.
- Mitchell, J.K.** 1976. *Fundamentals of Soil Behaviour*. 222-223. Wiley: New York.
- Mosaddeghi, M.R., A. Hemmat, M.A. Hajabbasi, A. Alexandrou.** 2003. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*. 70, 53-64.
- Nanucci, L.** 2009. Resistenza meccanica in suoli a diversa sodicità. Tesis doctoral.
- Palancar, T.** 2007. Compresibilidad y resistencia al corte de suelos salinizados y sodificados por irrigación. Tesis doctoral.
- Patruno, A., L. Cavazza, E. Cirillo.** 2002. Experiments on Soil Sodication. *Ital.J. Agron.* 6 (1) 3-13.
- Rahimi, H., E. Pazira, F. Taji.** 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil and Tillage Research*. 54, 145-133
- Rengasamy, P., K. A. Olsson.** 1991. Sodicy and Soil Structure. *Australian Journal of Soil Research*. 29, 935-952.
- Rhoades, J.D.** 1997 Sustainability of irrigation: An overview of salinity problems and control strategies. Annual Conference : Footprints of Humanity. Reflection on fifty years of water resource developments. Lethbridge, Alberta, Canadá, p.1- 42.
- Ruiz Vera, V. M., L. Wu.** 2006. Influence of sodicity, clay mineralogy, prewetting rate, and their interaction on aggregate stability. *Soil Science Society of American Journal*. 70, 1825-1833.
- Taboada, M.A., R.S. Lavado.** 1996. Interactive effects of exchangeable Sodium and water content on soil modulus of ruptura. *Soil Technology*. 8, 345-349.
- Utomo, W.H., A.R. Dexter.** 1981. Soil friability. *European Journal of Soil Science* 32, 203-213.
- Varallyay, G.** 2002. Environmental stresses induced by salinity/alkalinity in the Carpathian Basin (Central Europe) Symposium N° 33 Paper N° 1570. 17th World Congress of Soil Sciences. Tailandia. 14-21.
- Vázquez, M., G. Millán, P. Gelati,** 2008. Simulación del efecto del riego complementario en un suelo Udipsament típico. *Ciencia del Suelo*. 26 (2) 195-203.
- Waldrom, L.J., C.K. Constantin.** 1968. Bulk volume and hydraulic conductivity changes during sodium saturation test. *Soil Science Society of America Journal*. 32, 175-179.
- Willat, S.T.** 1987. Influence of aggregate size and water content on compactability of soil using short-time. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 37, 107-115.