

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS



**Compresibilidad y resistencia al corte de suelos
salinizados y sodificados por irrigación**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR

Telmo Cecilio Palancar

DIRIGIDA POR

**Laura Mónica Draghi
Mabel Vázquez**



Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos
Universidad Politécnica de Valencia
España

**Compresibilidad y resistencia al corte de suelos
salinizados y sodificados por irrigación**

Tesis Doctoral

2006

Doctorando: Ing. Agr. Telmo C. PALANCAR

Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Av. 60 y 119, cc 31, 1900, La Plata, Argentina. Fax: 0054 221 4252346. E-mail: telmo@ceres.agro.unlp.edu.ar

Directores:

Dr. Ing. Agr. Laura Mónica DRAGHI

Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Av. 60 y 119, cc 31, 1900, La Plata, Argentina. Fax: 0054 221 4236758. int. 405. E-mail: ldraghi@ceres.agro.unlp.edu.ar

Dr. Ing. Agr. Mabel Vázquez

Departamento de Ambiente y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Av. 60 y 119, cc 31, 1900, La Plata, Argentina. Fax: 0054 221 4236758. int. 428. E-mail: mvazquez@agro.unlp.edu.ar

1 ÍNDICES

1.1 ÍNDICE TEMÁTICO

Tema	Página
1 ÍNDICE	II
1.1 ÍNDICE TEMÁTICO	II
1.2 ÍNDICE DE TABLAS	IV
1.3 ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	VI
1.4 ÍNDICE DE FIGURAS	VII
1.5 ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	VIII
2 AGRADECIMIENTOS	X
3 TÍTULO Y AUTOR	1
4 RESUMEN	2
5 ABSTRACT	5
6 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	8
6.1 La importancia del riego	8
6.2 Importancia y difusión de los suelos salinos y sódicos. Su relación con el riego	10
6.3 Calidad del agua de riego	12
6.4 Efecto de la salinidad y sodicidad sobre las características de los suelos	16
6.4.1 Efecto sobre la estructura	16
6.4.2 Efecto sobre el espesor de la doble capa difusa y sobre la cohesión	21
6.5 Comportamiento mecánico de los suelos	22
6.5.1 Comportamiento de los suelos ante la compresión	23
6.5.2 Comportamiento de los suelos ante el corte	24
6.6 Teoría de Mohr-Coulomb	25
6.7 Teoría del estado crítico	27
6.8 Metodologías para evaluar la compresibilidad y la resistencia al corte de los suelos	36
6.8.1 Métodos de campo	36
6.8.2 Métodos de laboratorio	38
6.8.2.1 Ensayo triaxial	38
6.8.2.2 Caja de corte directo	40
7 HIPÓTESIS	42
7.1 Hipótesis básica	42
7.2 Hipótesis de trabajo	42
8 OBJETIVOS	43
8.1 Direccional ó General	43
8.2 Operacionales o Específicos	43
9 MATERIALES Y MÉTODOS	44
9.1 Ubicación geográfica	44

9.2 Características de los suelos estudiados	44
9.2.1 Procedencia y características químicas	44
9.2.2 Minerales de las arcillas	45
9.2.3 Taxonomía de los suelos	46
9.2.4 Textura de los suelos	46
9.3 Procedimiento utilizado en la salinización y sodificación de los suelos	47
9.4 Evaluación de las propiedades mecánicas	48
9.5 Procesamiento y análisis estadístico de los datos	48
10 RESULTADOS	50
10.1 Descripción de la metodología para la compresión y corte directo de suelos y pruebas preliminares de puesta a punto	50
10.1.1 Metodología empleada en las pruebas definitivas	50
10.1.1.1 Descripción de la caja de corte y de los sensores	50
10.1.1.2 Metodología para la preparación de los suelos para la compresión y el corte	52
10.1.1.2.1 Molido y tamizado	52
10.1.1.2.2 Humedecimiento	52
10.1.1.2.3 Formación de las muestras	52
10.1.1.2.4 Colocación de la muestra en la caja de corte	53
10.1.1.3 Compresión y corte de las muestras. Registro de los datos	53
10.1.1.3.1 Compresión	53
10.1.1.3.2 Estabilización de la muestra	54
10.1.1.3.3 Corte	54
10.1.1.3.4 Registro y almacenamiento de los datos	55
10.1.2 Pruebas preliminares	62
10.1.2.1 Pruebas a 400 kPa y 10% de relación de tensión	63
10.1.2.2 Pruebas de saturación y congelamiento	64
10.1.2.3 Pruebas de estabilidad de agregados en agua	65
10.1.2.4 Pruebas a 800 kPa	65
10.1.2.5 Pruebas de inmersión y secado	66
10.1.2.6 Pruebas de humectación y secado en Argese con corte a diversas relaciones de tensión	66
10.1.2.7 Pruebas de corte a diversa humedad en Argese	68
10.1.2.8. Pruebas de corte a 25% de humedad	68
10.2 Comportamiento a la compresión uniaxial	70
10.3 Comportamiento al corte	72
10.3.1 Densidad previa al corte	72
10.3.2 Tensión de corte, desplazamiento vertical y humedad	73
10.3.3 Comportamiento compresivo-expansivo	74
10.3.4 Densidad final alcanzada luego del corte	75
11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	77
11.1 Consideraciones previas	77
11.2 Análisis de la densidad alcanzada durante la compresión	78

uniaxial	
11.3 Análisis del comportamiento al corte	79
11.3.1 Densidad previa al corte	79
11.3.2 Comportamiento al corte	80
11.3.3 Análisis del comportamiento compresivo-expansivo	82
11.4 Análisis de los resultados en el marco de la teoría de Mohr-Coulomb	83
11.5 Análisis de los resultados en el marco de la Teoría del Estado Crítico.	89
11.5.1 Líneas de consolidación virgen	89
11.5.2 Regresiones entre las relaciones de tensión y las relaciones de volumen	94
11.5.3 Líneas de estado crítico	100
12 CONSIDERACIONES FINALES	107
13 CONCLUSIONES	110
14 BIBLIOGRAFÍA	111

1.2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1: Composición y características químicas de los suelos evaluados	45
Tabla 2: Clasificación taxonómica de los suelos a nivel de gran grupo	46
Tabla 3: Clasificación de las fracciones minerales del suelo de acuerdo a USDA e ISSS	46
Tabla 4: Fracciones granulométricas presentes en los 4 suelos de acuerdo a las clasificaciones de ISSS y USDA	46
Tabla 5: Salinidad y sodicidad de las soluciones empleadas en los tratamientos	47
Tabla 6: Composición iónica de las soluciones empleadas	47
Tabla 7: Tratamientos y nomenclatura utilizados en el ensayo	47
Tabla 8: PSI y pH de los suelos luego de los tratamientos	47
Tabla 9: Conductividad eléctrica ($dS \cdot m^{-1}$) de los suelos luego de los tratamientos	48
Tabla 10: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas a 400 kPa y 10% de relación de tensión.	63
Tabla 11: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de saturación y congelamiento.	64
Tabla 12: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas a 800kPa.	65
Tabla 13: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de inmersión y secado.	66
Tabla 14: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de humectación y secado de Argese a diversas relaciones de tensión.	67
Tabla 15: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas	68

con Argese a diversas humedades.	
Tabla 16: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de corte a 25% H.	69
Tabla 17a: densidades medias de las muestras de Argese antes del corte según tensión normal aplicada.	72
Tabla 17b: densidades medias de las muestras de Cardone antes del corte según tensión normal aplicada.	72
Tabla 17c: densidades medias de las muestras de Carpi antes del corte según tensión normal aplicada.	73
Tabla 17d: densidades medias de las muestras de Ozzano antes del corte según tensión normal aplicada.	73
Tabla 18a: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Argese.	73
Tabla 18b: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Cardone.	73
Tabla 18c: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Carpi	74
Tabla 18d: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Ozzano	74
Tabla 19a: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Argese	74
Tabla 19b: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Cardone	74
Tabla 19c: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Carpi	75
Tabla 19d: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Ozzano	75
Tabla 20a: Medias de densidad final en seco(g/cm^3) alcanzada por las muestras de Argese luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.	75
Tabla 20b: Medias de densidad final en seco(g/cm^3) alcanzada por las muestras de Cardone luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.	75
Tabla 20c: Medias de densidad final en seco(g/cm^3) alcanzada por las muestras de Carpi luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.	76
Tabla 20d: Medias de densidad final en seco(g/cm^3) alcanzada por las muestras de Ozzano luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.	76
Tabla 21: Comparación de regresiones de los valores de c y $\text{tg}\phi$ de las rectas de Coulomb	86
Tabla 22: Comparación de regresiones de los valores de N y λ de las líneas de consolidación virgen	93

Tabla 23: Comparación de regresiones de los valores de a y b de la líneas de regresión Relación de Volumen – Relación de Tensión	98
Tabla 24: Porcentaje de la tensión normal máxima a la que se alcanza el estado crítico	100

1.3 ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
Foto 1: Caja de corte. Celdas superior e inferior y tornillo de carga vertical	55
Foto 2: Aspecto general de la máquina	55
Foto 3: Brazo de palanca	55
Foto 4: Motor, reductor y convertidor	55
Foto 5: Motor, reductor y convertidor	56
Foto 6: Motor, reductor y convertidor	56
Foto 7: Reductor y convertidor	56
Foto 8: Placa superior unida a celda de carga	56
Foto 9: Prolongación de placa superior y tornillos de alineación	56
Foto 10: Sensores	56
Foto 11: Sensor de desplazamiento vertical	57
Foto 12: Celda de carga	57
Foto 13: Celda de carga y sensor vertical	57
Foto 14: Sensor de desplazamiento horizontal	57
Foto 15: Celda de carga y sensor horizontal	57
Foto 16: Los tres sensores	57
Foto 17: Espesímetro	58
Foto 18: Voltímetro	58
Foto 19: Tamiz con malla de 2 mm	58
Foto 20: Molino de suelos. Perfil	58
Foto 21: Molino de suelos. Planta	58
Foto 22: Formación de probetas. Placa metálica inferior ranurada	58
Foto 23: Cilindro de PVC con placa inferior	59
Foto 24: Circulo de papel de filtro inferior	59
Foto 25: Agregado de suelo	59
Foto 26: Cilindro plástico	59
Foto 27: Aplicación de la tensión normal inicial de 50 kPa	59
Foto 28: Suelo comprimido	59
Foto 29: Papel de filtro superior	60
Foto 30: Placa superior	60
Foto 31: Probeta terminada	60
Foto 32: Salida de parte de placa inferior	60
Foto 33: Introducción de probeta en la caja de corte	60
Foto 34: Probeta introducida totalmente	60
Foto 35: Ajuste del tornillo compresor a placa superior	61
Foto 36: Probeta lista para ser comprimida	61

Foto 37: Pesas utilizadas para la compresión	61
Foto 38: Extremo de la palanca para colocar los pesos	61
Foto 39: Probeta comprimiéndose	61
Foto 40: Corte de probeta	61
Foto 41: Corte de probeta	62
Foto 42: Corte de probeta	62
Foto 43: Corte de probeta	62
Foto 44: Corte de probeta	62
Foto 45: Registro y almacenamiento de los datos en Gould TA11 y ordenador portátil	62

1.4 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1: Sistema clasificatorio de la calidad del agua de riego del USDA	13
Figura 2: Nuevo sistema clasificatorio de la calidad del agua de riego del USDA.	16
Figura 3: Recta de Coulomb.	26
Figura 4: Rectas de Coulomb de suelos con distintas texturas.	27
Figura 5: Fronteras de estado en el espacio $p-q-v$	29
Figura 6: Pared de estado crítico	30
Figuras 7: Líneas de estado crítico, de consolidación normal y de recuperación en el plano $q = 0$	31
Figura 8: a) Caminos de estado en el espacio $p-q-v$ y b) Caminos de estado en el plano $v-\ln p$ c) Diagramas tensión-deformación de los caminos de estado	33
Figura 9: Proyección de una pared elástica en el espacio tensión normal-tensión de corte mostrando el comportamiento de expansión (C) y compresión (D)	35
Figura 10: Caja de torsión	37
Figuras 11: a) anillo de aletas radiales b) molinete torsor de paletas c) placa de corte traslacional	38
Figura 12: Equipo para ensayo triaxial	39
Figura 13: Determinación de los parámetros c y ϕ a partir de un conjunto de círculos de Mohr obtenidos en un ensayo triaxial	40
Figura 14: Italia. Con los marcadores se señalan los lugares de donde fueron extraídas las 4 series de suelos (Bari, Módena y Bolonia) y el lugar donde se efectuaron los ensayos (Florencia)	44
Figura 15: Sección en planta de la caja de corte (arriba) y vertical (abajo)	50
Figura 16: Sección vertical de la caja de corte	51
Figura 17: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Argese ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ LSD)	70

entre tratamientos.	
Figura 18: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Cardone ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ LSD) entre tratamientos.	71
Figura 19: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Carpi ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ LSD) entre tratamientos.	71
Figura 20: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Ozzano ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ LSD) entre tratamientos.	72
Figura 21: Rectas de Coulomb de Argese	84
Figura 22: Rectas de Coulomb de Cardone	84
Figura 23: Rectas de Coulomb de Carpi	85
Figura 24: Rectas de Coulomb de Ozzano	85
Figura 25: Líneas de Consolidación Virgen de Argese	90
Figura 26: Líneas de Consolidación Virgen de Cardone	91
Figura 27: Líneas de Consolidación Virgen de Carpi	92
Figura 28: Líneas de Consolidación Virgen de Ozzano	93
Figura 29: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Argese	95
Figura 30: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Cardone	96
Figura 31: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Carpi	97
Figura 32: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Ozzano	98
Figura 33 a 44: Líneas de estado crítico de todos los suelos y tratamientos	102 a 105

1.5 ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ϕ	Ángulo de rozamiento interno
c	Cohesión
σ	Tensión normal
τ	Tensión cortante
LEC, CSL	Línea de estado crítico, <i>Critical State Line</i>
LCN, NCL	Línea de consolidación normal, <i>Normal Consolidation Line</i>
v	Volumen específico del suelo ($1/Dap$)
p	Tensión normal

q	Tensión de corte
p_c	Tensión de preconsolidación (divide el comportamiento elástico del plástico)
N	Término independiente de la Línea de Consolidación Normal
Γ	Término independiente de la Línea de Estado Crítico
λ	Pendiente de la Línea de Estado Crítico y de la Línea de Consolidación Normal
κ	Pendiente de la Línea de Recuperación (<i>Rebound Line</i>)
RT	Relación de tensión (tensión normal / tensión de preconsolidación = p / p_c)
RV	Relación de volumen (vol. final – vol. inicial) / volumen inicial
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
RAS	Relación de adsorción de sodio
CE	Conductividad eléctrica
MO	Materia orgánica
Dap, δ_{ap}	Densidad aparente

2 AGRADECIMIENTOS

A las Doctoras Laura Draghi y Mabel Vázquez, por la intensa dedicación puesta en la dirección de este trabajo de Tesis, y por el importante aporte cognitivo realizado.

Al Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria, especialmente al Dr. Carlos Gracia López por haber llevado adelante el programa ALFA, al Dr. Montano Pérez Teruel por su trabajo de tutoría y a la Sra. María del Carmen Reverté, por facilitar todas las gestiones administrativas.

Al Dipartimento di Agraria e Forestale de la Università degli Studi di Firenze, especialmente al Dr. Paolo Spugnoli por su trabajo de tutoría y su valioso aporte cognitivo, y a los señores Marino Piva y Valter Bedetti, integrantes del plantel técnico del taller del Dipartimento, por la colaboración prestada en la construcción de los aparatos de medición utilizados.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, por haber facilitado los medios para la finalización de este trabajo.

Al Profesor Daniel Jorajuría, por todo el apoyo brindado en este proyecto.

A los gigantes que me subieron a sus hombros para que pudiese ver más lejos, citados en la Sección 14.

“τα παντα ρει” (Todo fluye).

Heráclito. Filósofo griego. (540-475 A. de C.)

“Si he visto más lejos que los otros hombres es porque me he subido a hombros de gigantes”
Sir Isaac Newton. Astrónomo, matemático y físico inglés. (1642-1727)

3 TÍTULO Y AUTOR

Tesis Doctoral

COMPRESIBILIDAD Y RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS SALINIZADOS Y SODIFICADOS POR IRRIGACIÓN

Doctorando: Ing. Agr. Telmo C. PALANCAR

*Departamento de Ingeniería Rural, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales,
Universidad Nacional de La Plata, Av. 60 y 119, cc 31, 1900, La Plata, Argentina.
Fax: 0054 221 4252346. E mail: telmo@ceres.agro.unlp.edu.ar*

4 RESUMEN

El riego se ha transformado en el método más exitoso para poner en producción las tierras marginales, incrementando de esta manera la productividad para dar alimentos a una población mundial cada día mayor. Cuando se utilizan aguas de mala calidad puede incrementarse el riesgo de salinización y sodificación del suelo y del acuífero subterráneo. Los problemas asociados con suelos salinos y sódicos se incrementarán en el futuro debido al uso indiscriminado del riego y al empobrecimiento de la calidad de las aguas usadas, como consecuencia del uso de las aguas de buena calidad para consumo humano e industrial. La calidad del agua de riego se define en función de su contenido total de sales (evaluado a través de la conductividad eléctrica, CE) y de su contenido de sodio (evaluado con respecto al contenido de calcio y magnesio a través de la Relación de Adsorción de Sodio, RAS). La salinidad aumenta el potencial osmótico de la solución del suelo limitando la absorción de agua por parte de las plantas. El sodio, por sus características iónicas, es poco retenido por el complejo de intercambio del suelo generando sistemas con tendencia a la dispersión (debido a aumentos en el espesor de la doble capa difusa), que se traducen en una arquitectura porosa pobre e inestable con la consiguiente mala circulación del agua y los gases del suelo, formación de costra, disminución de la infiltración y aumento de la erosión. Estas consecuencias ocasionan la reducción en el crecimiento de las plantas. La mayor salinidad del agua, en cambio, más allá de la problemática osmótica, tiende a la floculación de los coloides, contrarrestando el efecto negativo del sodio. Los cambios producidos en la matriz del suelo a causa de la salinidad y sodicidad se reflejan en sus propiedades químicas, físicas, mecánicas y biológicas. El aumento en el contenido de arcilla dispersa generado por el sodio causa el aumento de la resistencia del suelo a las tensiones externas.

Numerosos trabajos de investigación han demostrado las consecuencias negativas para la producción agrícola, producto de la salinidad-sodicidad de los suelos, priorizando el estudio de sus propiedades químicas y biológicas. Sin embargo, aún persiste el problema relativo a la relación existente entre distintos niveles de salinidad-sodicidad y parámetros físicos básicos de gran importancia en el comportamiento mecánico del suelo frente al tráfico y la labranza. La respuesta de los suelos a las tensiones externas puede ser estudiada en el marco de la teoría clásica de Mohr-Coulomb que relaciona las tensiones normales y tangenciales que puede soportar el suelo antes de adquirir deformaciones plásticas y también en el marco de la Teoría del Estado Crítico que abarca además el cambio de volumen que recibe el suelo ante la aplicación de estas tensiones, aspecto sumamente relevante en traficabilidad y laborabilidad. La compresibilidad de los suelos en laboratorio puede ser estudiada realizando pruebas de compresión uniaxial y la resistencia al corte mediante el ensayo triaxial, o el ensayo de corte directo a tensión normal constante, o a volumen constante. La prueba de compresión uniaxial y el ensayo de corte directo a tensión normal constante fueron los métodos empleados en este trabajo para analizar el problema planteado y aportar posibles soluciones. Se plantea como hipótesis que la alteración química sufrida por los suelos regados con aguas de mala calidad los vuelve menos compresibles y más resistentes al corte, provocando variaciones en

la recta de Coulomb y en la posición de la línea de estado crítico. Los objetivos que se plantean se basan en aportar a la comprensión de la problemática para fundamentar la generación de soluciones, desarrollando una metodología que permita evaluar la compresibilidad y resistencia al corte de los suelos, cuantificando la incidencia de la calidad del agua de riego en dichas propiedades, analizándolas en el marco de la teoría clásica de Mohr-Coulomb y del estado crítico y estimando su impacto agronómico. En la *Facoltà di Agraria e Forestale* de Florencia, Italia, se realizaron ensayos de compresión uniaxial y de corte directo a tensión normal constante sobre 4 series de suelos que fueron regados artificialmente con aguas de distinta calidad. Se utilizaron 3 tratamientos. El tratamiento 1-5 (3) consistió en bañar al suelo tres veces con una solución de 1mmol/litro de salinidad y 5 de RAS. El 100-45 (3) resultó de tratar 3 veces al suelo con una solución de 100mmol/litro y 45 de RAS. Por último, en el tratamiento 100-45 (5) se realizaron 5 baños con la solución de 100mmol/litro y 45 de RAS. Los suelos fueron secados, molidos y tamizados con malla de 2 mm, humedecidos al 23% de humedad y comprimidos en sucesivos pasos hasta una tensión normal de 600kPa. Durante la compresión se registró la altura de la muestra para poder calcular la densidad alcanzada por el suelo ante las diferentes tensiones normales impuestas. Luego de comprimidas, las muestras permanecieron 24 horas descargadas y se permitió una pérdida de humedad del 3%, arribando al momento del corte con un 20% de humedad. Las muestras fueron cortadas a tres tensiones normales: 60, 240 y 480kPa correspondientes a un 10, 40 y 80% respectivamente de la tensión normal máxima de compresión. Durante el corte se registró el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal y vertical de la muestra. Con los datos obtenidos se calcularon las tensiones cortantes y las densidades previas y posteriores al corte y se realizaron los análisis de la varianza y la comparación de las medias de cada tratamiento por la metodología de las diferencias mínimas significativas con un nivel de significancia del 5% (DMS 5%). Posteriormente se efectuaron las regresiones tensión normal-tensión de corte con las que se determinaron los parámetros cohesión y ángulo de rozamiento interno de la recta de Coulomb, realizando luego la comparación entre regresiones. En el ámbito de la teoría del estado crítico se realizaron regresiones para determinar la posición de la línea de consolidación virgen y la línea de estado crítico en el plano volumen másico – \ln (tensión normal). En el análisis del comportamiento compresivo se encontraron diferencias entre tratamientos en pocos casos, verificándose una tendencia a la mayor densidad para el tratamiento 1-5 (3) atribuida a una mayor facilidad de compresión de sus poros de mayor tamaño en comparación de los del tratamiento 100-45 (5). La resistencia al corte del tratamiento 100-45 (5) fue significativamente superior que la del 1-5 mostrando 100-45 (3) un comportamiento intermedio. La mayor resistencia al corte del tratamiento 100-45 (5) se adjudicó a un mayor contenido de arcilla dispersa. Trazadas las rectas de Coulomb, se comprobó que la mayor tensión cortante experimentada por el tratamiento 100-45 (5) se debió a un aumento en el parámetro cohesivo, sin experimentar cambios en el ángulo de rozamiento interno. La hipótesis *ad-hoc* que se enuncia para explicar el aumento de la cohesión es que dicho aumento se debería a un incremento de los fenómenos de tensión superficial del tratamiento de mayor sodicidad debido a un reordenamiento poroso en el que se

incrementarían el número de poros pequeños en desmedro de los poros grandes como consecuencia de la dispersión de los coloides. En el ámbito de la teoría del estado crítico no se encontraron diferencias evidentes entre la posición de las líneas de consolidación normal de los distintos tratamientos, resultado coherente con el análisis del comportamiento compresivo. Se verificó, en cambio, un evidente desplazamiento de la línea de estado crítico hacia la línea de consolidación normal del tratamiento 100-45 (5) con respecto al 1-5 (3), aumentando con esto el dominio supercrítico del mismo, es decir el espacio en el cual el suelo se expande al ser cortado. La menor posibilidad de compresión con el corte del suelo más sódico, se adjudicó nuevamente a su predominancia de pequeños poros, incapaces de alojar partículas mayores o microagregados, es decir permitir reacomodamientos. Los resultados encontrados permiten extrapolar ciertas implicancias agronómicas. Los suelos sódicos demandan un mayor gasto energético para ser labrados siendo mayor el efecto de la sodicidad cuanto más fina sea la textura. Asimismo, la mayor resistencia al corte les brinda una mayor capacidad portante, es decir mejor transitabilidad dado que a una rueda le demandará mayor esfuerzo tangencial cortar dicho suelo y patinar. También resultan más difíciles de comprimir al presentar poros de menor tamaño. Si bien estos aspectos pueden resultar en principio positivos para aspectos tales como la transitabilidad, debe tenerse en cuenta que se tornan contraproducentes a la hora de evaluar la capacidad productiva de los mismos toda vez que las condiciones edáficas óptimas para la producción de cultivos (poros grandes, densidad aparente baja, suelo mullido y friable) se contraponen con las características óptimas de un suelo para su transitabilidad (suelo con poca porosidad, de alta densidad aparente, indeformable). Existen evidencias que indican una disminución en la friabilidad de los suelos sódicos con lo que se reduciría su ventana de labor. La mayor tendencia a la expansión de dichos suelos con la labranza resultará de una efectividad limitada debido a que se tratará de una estructura con agregados masivos y de poros interagregados inestables. El riego indiscriminado, sin un análisis exhaustivo de la calidad del agua de riego y del componente edáfico puede resultar en la falta de sustentabilidad del sistema en el corto plazo. Finalmente, se concluye que la metodología desarrollada ha permitido evaluar adecuadamente las propiedades estudiadas. Dichas propiedades dependen de la calidad del agua de riego, siendo el sodio el responsable del aumento del parámetro cohesión y en consecuencia de la resistencia al corte. Por otra parte, la densidad aparente resulta un parámetro de menor sensibilidad que la resistencia al corte. Por último, las propiedades de estado crítico del suelo son afectadas por la degradación química aumentando el espacio super-crítico.

Palabras clave: riego, aguas salino-sódicas, estado crítico, cohesión, propiedades mecánicas.

5 ABSTRACT

Irrigation appears as the most important technique to improve agricultural production in dry weather marginal areas. Utilization of not qualified water could increase either, soil and underground water salinization or sodification risk. Actual figures related to good quality water resources, show that in the future, a concurrence with human consumption could easily be hypothesized. Water's quality is defined as a function of total salt content, assessed as EC (electric conductivity), and sodium content, assessed as SAR (Sodium Adsorption Rate). Salinity increases osmotic water potential and diminishes plants water absorption capacity. Sodium, due to its ionic characteristics, has a low retention in the soil interchange complex generating dispersion systems (for double layer thickness increase), resulting in a poor and unstable porosity architecture with the consequent bad water and air soil circulation, crust formation, infiltration diminishes and erosion increases. All these consequences attempt to normal vegetal growth. Changes in soil matrix for salinity and sodicity, modify chemical, physical, mechanical and biologic properties. Soil sodium content improves percentage of dispersed clay, and it improves soil resistance to external strength. The soil response to the external stress can be studied in the classical Mohr-Coulomb theory framework, relating normal and shear soil stresses to be admitted, before the state of plastic deformation. In the same direction, the Critical State Theory framework, including soil deformation due to received tensions, could be used as well. This latter condition is a quite important variable to be considered in traffic and tillage problems analysis. Soil compressibility can be studied, either using uniaxial compression test, either shear resistance in triaxial test, or direct shear test at constant normal stress or constant volume. The uniaxial compression test and direct shear test at constant normal stress were the employed methods in this work for analyze the problem and found possible solutions. The hypothesis of this thesis was that soil chemic alteration due to irrigation with bad quality water, diminishes its compressibility and increases its shear stress resistance, changing Coulomb and Critical State Lines position. The main objective was to improve knowledges in order to explain soil behavior irrigated with waters of different qualities. Another objective was to develop a method to evaluate soil compressibility and shear strength, quantifying the incidence of irrigation water quality in these properties. Classical Mohr-Coulomb and Critical State theories frameworks, were used and a prediction of agronomical impact included as well. In *Facoltà di Agraria e Forestale* of Florence, Italy, test of uniaxial compression and direct shear strength at constant normal stress were made in 4 soils, artificially irrigated with diverse quality waters. Three treatments were used. For 1-5 (3) treatment, soils we immerse 3 times in solution with 1mmol/liter concentration and 5 of SAR. In 100-45 (3) soils were immerse 3 times in solution with 100mmol/liter concentration and 45 of SAR. Finishing, the 100-45 (5) treatment soils were immerse 5 times in solution with 100mmol/liter concentration and 45 of SAR. The soils were dried, grinded and sieved through a 2 mm sieve, wetted till reach 23% (w/w) water content and compressed in successive steps arising 600 kPa of normal tension. During compression, height sample were measured in order to quantify bulk density, related to each normal tension. After compression, the

samples were unloading for 24 hours and dried till 20% (w/w) water content was reached. The samples were sheared at three normal tensions: 60, 240 and 480 kPa (corresponding to 10, 40 and 80% of the maximum normal compression tension 600kPa). In the shear test, were measured, not only shear resistance, but horizontal and vertical movement of samples, as well. With these values were calculated shear stress and bulk density before and after shear test and variance analysis and means comparison with least statistical differences method with level significance of 5% (LSD 5%), were made. After this, normal tension – shear tension regression for determining cohesion and internal friction angle of the Coulomb straight, were made, comparing regression lines. Regressions, determining normal consolidation and critical state lines position in the massic volume versus \ln (normal tension) plane, were made. In the compressive behaviour were found only few differences among treatments, only one tendency with higher bulk density for the 1-5 (3) treatment. It could be explained as a higher compressibility of its bigger pores in comparison with smaller pores of 100-45 (5) treatment. The shear strength of 100-45 (5) treatment was higher of the 1-5 (3) treatment, having 100-45 (3) treatment, a behaviour with values ranging between previously quoted treatments. The bigger shear strength of 100-45 (5) treatment could be explained by its bigger content of dispersed clay. After outline Coulomb straights, was verify that, larger shear stress in the 100-45 (5) was due to increase in the cohesion parameter, without changes in friction internal angle. This larger cohesion could be attributed to superficial tension increments in higher sodicity treatment, as a result of pore rearrangement, increasing small pores and diminishing big pores as a consequence of colloid dispersion. In the critical state theory framework no significative differences between normal consolidation lines position of diverse treatment, were found, in agreement with compressive analysis. On the other hand, evident displacement of critical state line toward the normal consolidation line of the 100-45 (5) treatment with respect of 1-5 (3) was found, increasing supercritical domain (increasing expansion possibility with the shear). The small possibility of compression post shear of sodic soil is due to small pores, unable to lodge big particles or microaggregate, avoiding too, the possibility of particle rearrangement. Having these results in mind, some agricultural predictions could be made. The sodic soils demands higher energetic costs for tillage and the effect is highlighted in fine texture soils. Likewise, the big shear strength of sodic soils gives greater load capacity, then better trafficability could be predicted, due to it higher strength to be sheared. Consequently lesser slippage could be expected. In the same direction, lesser compactness of those soils could be expected, as rheology of smaller pores indicates. These parameters can be positives in principle for trafficability but will be negatives for plant growth. Parameters good for the former, normally are the opposite for the latter. We have evidence indicating diminishing of friability of sodic soils, limiting their tillage opportunity. The largest tendency from expansion of sodic soil after tillage will result in limited effectiveness due to one structure with massive aggregates and interaggregate pores of short life. The indiscriminate irrigation, without exhaustive analysis of quality of the irrigation water and soil capacity, could lead to a non sustainability system in short-term. Finally, developed method allows suitably assessment of the studied properties. These properties depend on water irrigation quality, being the sodium

the responsible of cohesion increase and consequently of shear stress increments. On the other hand, the bulk density is less sensitive parameter than shear strength. Finally, the critical state properties of soil are affected by chemical degradation, increasing supercritical space.

Keywords: irrigation, brackish water, critical state, cohesion, mechanical properties.

6 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

6.1 La importancia del riego

El agua es un elemento fundamental para la vida y su presencia en la naturaleza asume características *sine qua non*. Tanto el defecto como el exceso hídrico pueden alterar la vida del hombre, los animales y las plantas. Los ambientes caracterizados por su déficit, como son las regiones áridas o semiáridas, o aquellos que sufren exceso, como ocurre en vastas áreas inundables o anegables, plantean dificultades y severas limitaciones para la vida humana, el crecimiento de las plantas y la producción agropecuaria en general (Vázquez, 2003).

La mayor parte de los cultivos se desarrollan con la precipitación natural y, por tanto, dependen de las características climáticas para el suministro de agua. El hombre puede hacer poco para modificar el clima y la manera más segura de evitar deficiencias de agua en los cultivos es la irrigación. El hombre lleva miles de años regando en regiones áridas, donde las plantas no pueden cultivarse de otra manera, pero en los últimos años también ha crecido notablemente el interés por la irrigación suplementaria en regiones húmedas con la finalidad de aumentar el rendimiento de los cultivos. La irrigación es costosa, pero también lo es el fallo de las cosechas. Se tiende a regar los cultivos que dan productos más valiosos porque son los que con mayor facilidad compensan los gastos del riego. Sin embargo, muchos agricultores provistos de un suministro de agua conveniente, han comprobado que la irrigación es rentable incluso con los cultivos extensivos ordinarios. (Chambouleyron, 1980).

Wiedenfeld y Enciso (2006) afirman que con la expansión de la población y la industria, el agua para riego se torna cada vez más limitada. Chambouleyron, (1980) sostiene que el recurso hídrico está cada día más comprometido, por lo que el uso adecuado del agua se ha vuelto importante. Esto ha determinado que en lugares en los que en algunos momentos el recurso era abundante hoy no lo sea y lo mismo sucederá en algunos otros en donde actualmente el recurso abunda. Es por ello que se piensa que en un futuro próximo, la expansión de la agricultura de regadío no se podrá realizar usando más agua sino usando mejor el agua y deberá realizarse un gran esfuerzo a nivel técnico para mejorar los niveles de aprovechamiento del recurso. Das *et al.* (2006) afirman que la rápida degradación del suelo, la pérdida de la masa de suelo y la disminución de las reservas de agua dulce son los mayores impedimentos de la agricultura. No obstante, para alimentar a billones de seres humanos es necesario prosperar en términos de cantidad y calidad de producción y para alcanzar dicho objetivo la expansión de la agricultura de regadío es un prerrequisito y usar recursos marginales como aguas cloacales, efluentes industriales, aguas de drenaje en materia de riego asegurando la calidad del suelo y agua, será apropiado e inevitable.

Se estima que la población mundial pasará de las 6300×10^6 personas de la actualidad a 8500.10^6 en 2025 (Rhoades, 1997) lo que demandará un aumento en la producción de alimentos y fibras del 40-50%. Se prevé que en las próximas décadas, el incremento de las 2/3 partes de la superficie arable se producirá incorporando áreas desérticas mediante la irrigación. Las tierras irrigadas, representan aproximadamente el 15% de las tierras cultivables en la actualidad y producen el 36% de los productos alimenticios mundiales. Esto demuestra la importancia de la práctica, en este marco de necesidades crecientes (Vázquez, 2003). De acuerdo a datos de FAO (2006) el porcentaje de tierras arables regadas aumentó de un 16% en 1980 a un 20% en 2002 con 277×10^6 ha.

No obstante el enorme esfuerzo tecnológico que se ha desarrollado últimamente para el riego y la experiencia acumulada, quedan aún enormes brechas tecnológicas para desarrollar. El peligro que aparece sobre toda área regada es la salinización y sodificación del suelo, así como del acuífero subterráneo. (Chambouleyron, 1980).

De acuerdo a Scher (1999), estudios globales recientes estiman que la calidad del suelo en el 75% de los terrenos agrícolas, se ha mantenido relativamente estable desde mediados del siglo XX. Sin embargo en el 25% restante, la degradación ha avanzado en los últimos 50 años a un ritmo acelerado, entre 5 y 12 millones de hectáreas por año. Davis (2006) afirma que la degradación del suelo es un problema mundial de importancia considerable citando un reporte reciente del International Food Policy Research Institute que establece que el 40% de las tierras cultivadas se encuentran seriamente degradadas. Las fuentes de esta degradación incluyen la erosión del suelo, la pérdida de materia orgánica, el endurecimiento, la contaminación química, la reducción de nutrientes y el exceso de salinidad. La tierra arable *per cápita* fue disminuyendo progresivamente a lo largo del tiempo. En 1979 era de 0,38 ha, en el 2000 de 0,23 ha y la proyección para el 2050 es de 0,15 ha. Esta disminución se produce en parte por el aumento poblacional, pero también a través del deterioro de la tierra. Esta situación ha propiciado que algunos investigadores desarrollaran el concepto de producción sostenible o sustentabilidad de los sistemas definido por Hail y Runge – Metzger (1992) como la "gestión y conservación de la base de los recursos naturales y la orientación del campo tecnológico para asegurar el logro y la continuidad de la satisfacción de las necesidades humanas – alimento, agua, techo, abrigo y combustible – para las generaciones presentes y futuras". Hillel, (2006) adjudica el éxito o fracaso de ciertas civilizaciones a la sostenibilidad o no de las prácticas de manejo del suelo que llevaron adelante. Corwin *et al.* (2006) sostienen que actualmente, resulta una necesidad global desarrollar herramientas que evalúen la calidad global del suelo para determinar la efectividad y sostenibilidad de las prácticas de manejo agrícola. Ruiz Vera y Wu (2006) sostienen que comprender la relación entre las propiedades del suelo, la calidad del agua de riego y las prácticas de manejo de los suelos resulta vital para la sostenibilidad de la agricultura de irrigación. Pla (2006) afirma que los beneficios derivados del riego de tierras agrícolas pueden no ser sostenibles debido al desarrollo de suelos afectados por sales, salinos o

sódicos, con una pérdida parcial o completa de la capacidad productiva. Adicionalmente, las tierras irrigadas mediante aguas de drenaje provenientes de zonas de regadío aguas arriba, incrementan la contaminación de suelos y aguas por sales, nitratos, y otros poluentes (provenientes de productos orgánicos e inorgánicos usados en los campos regados) pudiendo causar cambios drásticos en el régimen y balance de agua y solutos en el perfil del suelo.

6.2 Importancia y difusión de los suelos salinos y sódicos. Su relación con el riego

Lentz *et al.* (1996) estimaron para mediados de la década del 90 la superficie mundial bajo riego, en alrededor de 250×10^6 ha. Gran parte de esta superficie se halla afectada en su productividad. La expansión anual de la práctica del riego ha ido disminuyendo en las últimas décadas, estimándose en la actualidad una expansión de alrededor del 1% anual. La razón de ello sería la combinación de varios factores, su alto costo, su manejo ineficiente, y la degradación de los recursos naturales suelo y agua (Rhoades, 1997).

Según Umali (1993) citado por Rhoades (1997), la salinización de las tierras bajo riego crece a razón de 1 a 2×10^6 ha/año. Ghassemi *et al.* (1995) citado por Rhoades (1997) realizó una extensa revisión sobre la salinización del agua utilizada por el riego, lo que conduce a la salinización de las napas y de los cursos superficiales, aguas abajo en las cuencas hidrográficas. Esta revisión demostró que este fenómeno también está ampliamente difundido.

Tanto en la antigüedad como en la actualidad, regiones agrícolas muy fértiles se tornaron totalmente improductivas a consecuencia del riego. Extensas áreas del Mediterráneo, tanto en países europeos como africanos, regiones áridas asiáticas y americanas, por ejemplo en los EEUU, sufrieron severos deterioros de la fertilidad química y física de los suelos a causa de un mal empleo de esta práctica (Ayers y Westcot, 1987).

Vincent *et al.* (2006) afirman que la salinidad del suelo se encuentra presente en la mayoría de los esquemas de riego alrededor del mundo bajo los efectos conjuntos de baja calidad del agua de riego, aridez y falta de drenaje natural de los suelos y acuíferos. Mientras que los productores pueden controlar la salinidad, el peligro de sodicidad es más difícil de comprender y manejar. La salinización es la consecuencia de varios procesos complejos de redistribución de sales que dependen de las condiciones naturales, características del sistema, prácticas agrícolas y manejo del riego y del drenaje. Amiotti y Bravo (2006) señalan que a pesar del escaso tiempo transcurrido desde que parte de las tierras del Valle del Río Colorado en Argentina, han sido liberadas al riego por gravedad, se han observado evidentes signos de deterioro del recurso entre los que se citan degradación física superficial y subsuperficial con génesis de densipanes, erosión eólica e hídrica, elevación de la freática, presencia de manantiales de agua salina y salinización y alcalinización de la freática y de los suelos endosaturados con posterior abandono de tierras. Según Prasad *et al.* (2006) el riego induce la

elevación de la napa freática y la salinidad siendo estos últimos los principales factores que conducen a la declinación de los rendimientos de los cultivos en el Estado de Andhra Pradesh, India. El impacto del riego continuo a lo largo de los años ha causado en este lugar el ascenso de la napa freática hasta la zona de raíces llevando a una reducción de los rendimientos. Singh *et al.* (2006) afirman que los suelos sódicos ocupan extensas áreas y aparecen en todo el globo. La recuperación de los suelos sódicos es un problema costoso y requiere la utilización adicional de enmiendas, agua e infraestructura para drenaje. Qadir *et al.* (2006) afirman que los suelos afectados por el sodio, de amplia distribución mundial, están caracterizados por la aparición de altos niveles de sodio que causan problemas de fertilidad y propiedades físicas pobres y por lo tanto afectan de manera adversa el crecimiento y rendimiento de la mayoría de los cultivos. Estos suelos pueden ser mejorados por la provisión de una fuente de calcio soluble para reemplazar el exceso de Na en el complejo de intercambio catiónico.

Del total de la superficie cultivada mundial ($1,5 \times 10^7$ km²) (Massoud, 1981), aproximadamente un 23% es salina mientras que un 10% es salina y sódica existiendo este problema en aproximadamente 100 países (Szabolcs, 1989). De acuerdo a Zinck (2000), cerca del 20% del total de tierras irrigadas son afectadas por sales y esta proporción tiende a incrementarse. El total de superficie afectada por salinización primaria alcanza 955 millones de ha y las afectadas por salinización secundaria totalizan 77 millones de ha encontrándose el 58% de estas últimas en zonas irrigadas. Wong *et al.* (2006) afirman que aproximadamente 932 millones de ha de tierra alrededor del mundo se encuentran degradadas por salinidad y sodicidad, usualmente coincidente con la tierra usada por la agricultura.

Los suelos sódicos cubren 210 millones de hectáreas. Las mayores áreas de suelos sódicos se encuentran concentradas en Australia y ex-URSS (Bui *et al.*, 1998).

Se estima que en Australia el 25-30% del área está ocupada por suelos sódicos con una amplia dispersión (Northcote y Skene, 1972). En América del Norte, existen suelos sódicos en las grandes planicies del oeste de Canadá y el oeste de Estados Unidos, con climas fríos, semiáridos y subhúmedos (FAO, 1991). En Sudamérica, los suelos sódicos están concentrados en la pampa Argentina y Paraguaya y en el noreste de Brasil (FAO, 1991), mientras que en Europa se dan en Hungría, en la región del Danubio, Rumania, Serbia, Eslovaquia, Ucrania y Georgia. (Bui *et al.*, 1998). En el Norte y centro de Asia, los suelos sódicos están concentrados principalmente en el oeste del Mar Caspio en Kazakhstan, Turkmenia, Uzbekistan, Tadjikistan y Kirghizia (FAO, 1978), en el sur de las montañas de Tien Yan (China), en la república rusa de Yakutia y en el oeste de Siberia. En el sudeste de Asia y en Medio Oriente se encuentran dispersos en India, Siria, Irán, Pakistán y Bangla Desh. En África, los suelos sódicos ocupan sólo el 0,9 % del área y están concentrados en Túnez, Chad, Nigeria, Somalia, Sudán, Tanzania y sudeste de África. (Bui *et al.*, 1998).

La salinidad-alcalinidad de los suelos causada por factores naturales ó por actividades humanas es un perjuicio ambiental significativo que resulta en un incremento de los riesgos ecológicos a la biosfera, limita el potencial agroecológico y representa un considerable obstáculo socio-económico para el desarrollo sustentable (Varallyay, 2002).

Se espera que los problemas asociados con suelos salinos y sódicos se incrementen en el futuro debido al empobrecimiento de la calidad de las aguas de riego como consecuencia del uso de las aguas de buena calidad para consumo humano e industrial (Levy, 2000). Por todo esto se vuelve relevante el estudio de las consecuencias del riego con aguas de distinta calidad sobre las propiedades de los suelos con el fin de conocer las implicancias y alcances de la problemática.

6.3 Calidad del agua de riego

La creciente necesidad de proveer alimentos a una población en crecimiento, junto con el incremento de la demanda de aguas de buena calidad para uso urbano e industrial resulta en un empobrecimiento de la calidad de las aguas y suelos para la producción. De acuerdo a datos de la FAO (2006) en la distribución del uso del agua por el hombre corresponde un 70% a la agricultura, 20% a la industria y 10% al consumo doméstico

Los procesos principales por los cuales las sales solubles se incorporan al suelo son meteorización de minerales primarios y secundarios y la aplicación de aguas conteniendo sales (Keren, 2000). La importancia de cada uno depende del tipo de suelo, condiciones climáticas y manejo agrícola (Sumner, 2000).

Todas las aguas de riego, superficiales o subterráneas, contienen en mayor o menor medida sales solubles, sodio, cloro, boro y otros elementos que en ciertas situaciones pueden llegar a ser tóxicos (Ayers y Westcot, 1987). La calidad del agua de riego según numerosos autores, entre ellos Richards (1956), Suarez (1981), Pizarro (1985), Ayers y Westcot (1987), se define en función de tres parámetros: salinidad en sentido restringido, sodicidad y toxicidad. A pesar de la aparente unificación de criterios para calificar el agua de riego, los diferentes autores emplean distintas escalas, relaciones entre parámetros y cálculos de indicadores de estos parámetros. Es probable que en cada caso, esta diferencia surja de la naturaleza particular de los sistemas productivos y edafo-climáticos a partir de los cuales se originaron estos criterios (Vázquez, 2003).

Un sistema clasificatorio muy difundido y utilizado es el elaborado por el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Richards, 1956). En el mismo se tiene en cuenta la salinidad y sodicidad del agua de riego empleada (Figura 1).

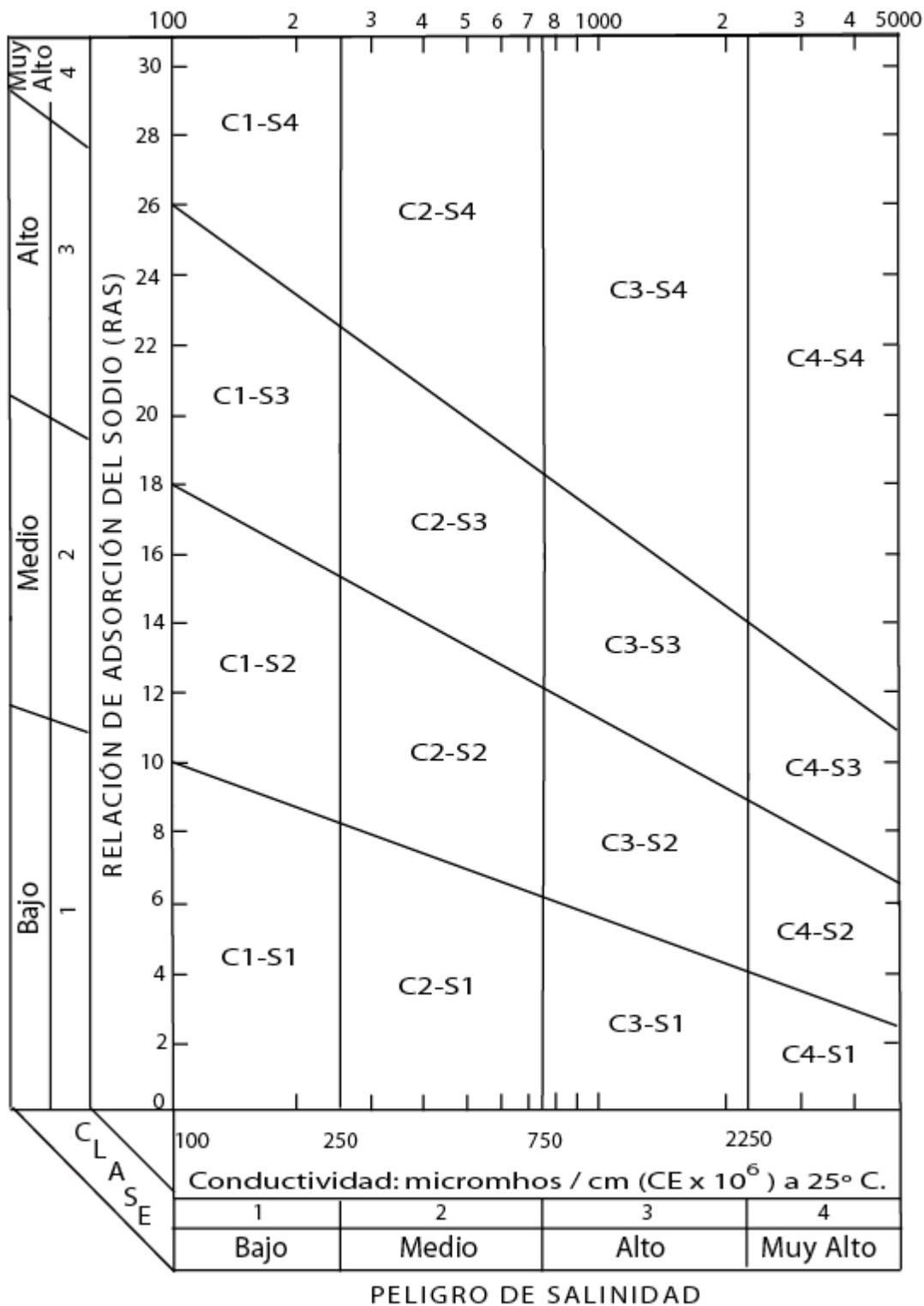


Figura 1: Sistema clasificatorio de la calidad del agua de riego del USDA (Richards, 1956)

En cuanto a la salinidad, a partir de cierta concentración, las sales reducen la disponibilidad del agua para las plantas, debido a que aumentan el potencial osmótico, impidiendo que el agua sea absorbida por las plantas. En estas circunstancias el suelo puede contener agua pero las plantas no pueden generar la diferencia de potencial necesaria para tomarla (Vázquez, 2003). Para cuantificar

la salinidad del agua, la literatura científica ha coincidido en la utilización de la conductividad eléctrica (CE) como medida de evaluación. Sin embargo existe una notable discrepancia acerca de los umbrales calificadorios de la misma.

Singh *et al.* (1996) reconocieron la necesidad de evaluar la CE crítica discriminando entre las diferentes condiciones de textura, precipitación y tolerancia de los cultivos a la salinidad. Según el criterio desarrollado por estos autores, en las condiciones más adversas, alto contenido de arcilla (> 30%), cultivos sensibles a la salinidad y menos de 350 mm año⁻¹ de precipitación, consideraron admisibles aguas de hasta 1,00 dS m⁻¹ de CE. Así establecieron una serie de valores máximos de acuerdo a las diferentes combinaciones de los parámetros discriminatorios hasta la situación extrema de suelos con menos de 10% de arcilla, con cultivos tolerantes a la salinidad y con una precipitación de más de 550 mm año⁻¹, donde aceptaron como aguas aptas a aquellas con CE de hasta 12,00 dS m⁻¹.

De acuerdo a Dos Santos *et al.* (2006) los efectos adversos de la salinidad varían con la especie vegetal y el estado de desarrollo, con el tiempo de exposición y la concentración salina, y con la naturaleza de las sales presentes en el medio de crecimiento.

Desde el punto de vista de la sodicidad, la problemática es aún más compleja. Los primeros trabajos fueron del Laboratorio de Salinidad de Riverside, California. Sus investigadores reconocieron la necesidad de evaluar el riesgo potencial de daño causado por el contenido de sodio del agua, a través del contenido relativo de este catión respecto del calcio y el magnesio. Esta medida ha sido denominada "Relación de Adsorción de Sodio" (RAS) y es comparable a la utilizada en extractos de saturación de suelo. La RAS posee la siguiente expresión de cálculo $RAS = [Na^+] / \{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] / 2\}^{1/2}$.

La razón de ser de la RAS deriva de los mecanismos de adsorción de estos iones en el complejo intercambiador edáfico. La capacidad de intercambio de un catión en un determinado suelo depende tanto de las propiedades de dicho catión como de los intercambiadores del suelo. Desde el punto de vista de los cationes, estas propiedades son: la carga electrostática, el radio iónico, el agua de hidratación y la polaridad del ion (Summer, 2000). En cuanto a los intercambiadores, existe una afinidad particular de los mismos respecto de los iones en intercambio por razones estéricas y electrostáticas. El sodio por su baja carga, elevada capa de hidratación y baja polaridad, es poco retenido por el complejo de intercambio, representado principalmente por arcillas y materia orgánica. Esto deriva en sistemas con tendencia a la dispersión coloidal, susceptibilidad a la erosión, una arquitectura porosa intrincada e inestable con la consiguiente mala circulación del agua y los gases del suelo. Frente a este comportamiento, otros iones como calcio y en menor medida magnesio, fundamentalmente por su carga, se manifiestan como elementos agregantes, causantes de una estructura edáfica muy apropiada para el crecimiento de las plantas (Richards, 1956; Suarez, 1981). Es decir que la calificación de la

peligrosidad sódica del agua no puede utilizar como único criterio evaluador el contenido de sodio, sino que necesariamente debe cuantificar dicho contenido relativizándolo respecto de otros iones, fundamentalmente calcio y magnesio. Estos conceptos han sido ampliamente aceptados, sin embargo, tanto la expresión de esa relación como los umbrales calificadorios, y aún más la necesidad de confrontar dichos umbrales con otras propiedades del agua e incluso propiedades edáficas, son controvertidos (Richards, 1956; Suarez, 1981; Pizarro, 1985; Ayers y Wescot, 1987; Minhas y Gupta, 1992).

Un factor reconocido como importante en la evaluación del peligro de sodificación causada por el agua de riego, ha sido el contenido salino general de dicha agua (Richards, 1956; Pizarro, 1985, Ayers y Wescot, 1976; Minhas y Gupta, 1992). Inicialmente el Laboratorio de Salinidad de los EEUU (Richards, 1956) estableció que a mayor salinidad del agua, un mismo valor de RAS implica mayor contenido de sodio, catión dominante en las sales de la mayor parte de las aguas. Atendiendo a este razonamiento, a una determinada RAS mayor es el peligro de sodificación a mayor CE. Ayers y Wescot (1976) advirtieron que si bien es cierto que a mayor salinidad existiría mayor contenido de sodio en el agua, la incidencia adversa del mismo en el suelo podría estar controlada por el contenido salino. Si se reconoce que el mayor efecto perjudicial del sodio es la dispersión de los coloides, debe reconocerse también que una mayor salinidad tiende a la floculación de dichos coloides, contrarrestando su efecto más eficientemente en aguas de mayor salinidad. A partir de estos conceptos la FAO elaboró un nuevo sistema clasificatorio de la calidad del agua de riego (Ayer y Wescot, 1976). Este sistema puede observarse en la Figura 2 y en el mismo puede verse que a mayor nivel de salinidad en el agua de riego disminuyen los riesgos de sodicidad. Es decir que independientemente del cálculo de la RAS que se utilice para la evaluación de la peligrosidad sódica, aún se plantean interrogantes sobre cuáles deben ser los umbrales calificadorios de esta medida y en que proporción serán modificados según la salinidad del agua. Es muy probable que para contestar a esta pregunta deba contemplarse la proporción y naturaleza de los coloides edáficos en cada situación. Esto implicaría una evaluación particular para diferentes condiciones texturales lo que implica diferente contenido de arcilla, mineralogía de las mismas, contenido y tipo de materia orgánica, entre otros factores (Vázquez, 2003).

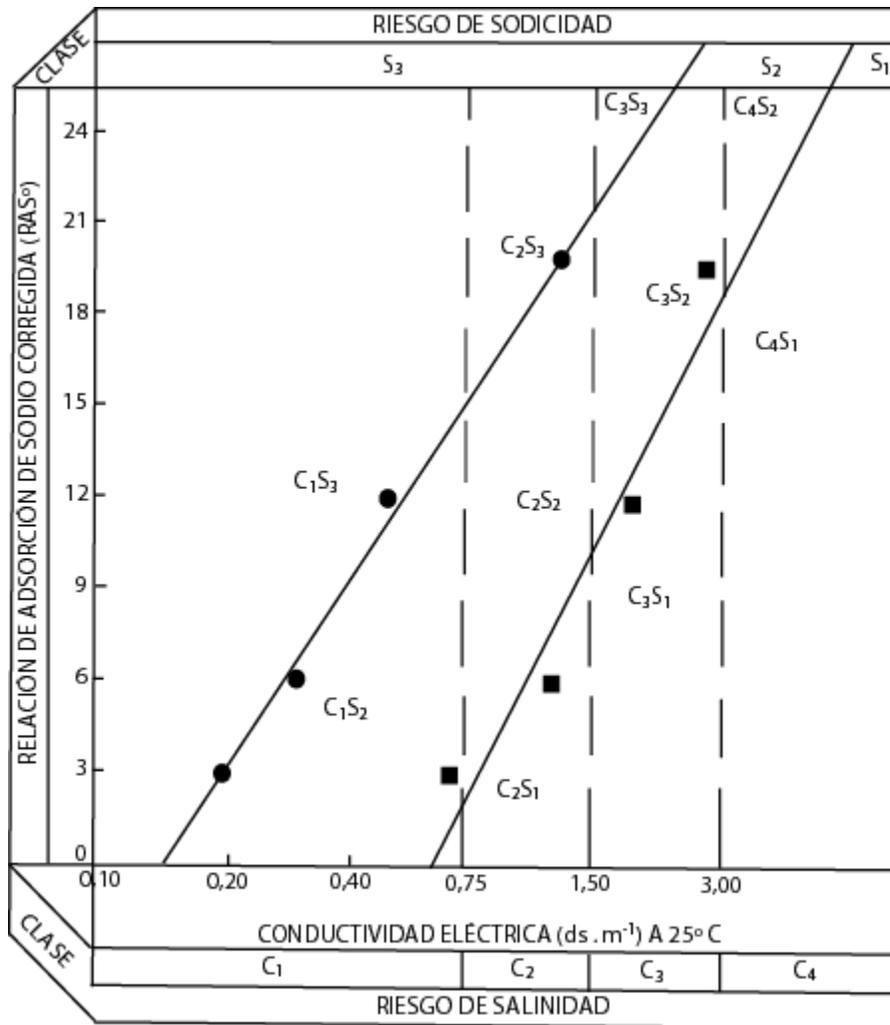


Figura 2: Nuevo sistema clasificatorio de la calidad del agua de riego de la FAO (Ayer y Wescot, 1976).

Estos antecedentes fundamentan la necesidad de estudiar el parámetro calidad del agua de riego en conjunto con los parámetros edáficos para evaluar la potencialidad del riesgo de salinización y/o sodificación y sus consecuencias sobre el ambiente edáfico y su capacidad productiva.

6.4 Efecto de la salinidad y sodicidad sobre las características de los suelos

6.4.1 Efecto sobre la estructura

La estructura del suelo es muy importante en aspectos tales como aireación, permeabilidad y su relación con la escorrentía, grado de resistencia a la erosión y formación de una cama adecuada para la germinación de las semillas de los cultivos, entre otros (Thompson y Troeh, 1982). La agregación en los suelos es el arreglo de las partículas primarias (arena, limo y arcilla) en unidades

estructurales secundarias, en el orden del mm. Los agregados del suelo consisten en partículas de arcilla, cuasicristales o dominios (Quirk y Aylmore, 1971), entremezcladas con grandes partículas de cuarzo primario y unidas por fuerzas fisicoquímicas que son el producto del ambiente químico y microbiológico de cada suelo particular (Levy, 2000).

Una condición necesaria para la formación de gránulos estables en el agua es la floculación de la arcilla, seguida por la estabilización llevada a cabo por agentes cementantes orgánicos e inorgánicos. Los fenómenos de floculación y dispersión son centrales en la formación de cuasicristales de arcilla y flóculos (<20 μ m) para llegar a convertirse en bloques estructurales de agregados. Estos flóculos son nuevamente agregados por materiales inorgánicos (partículas de arcilla u óxidos de metal) u orgánicos (productos microbiales residuales o humificados) dentro de microagregados, en un rango de tamaño de 20 a 250 μ m. Los macroagregados (> a 250 μ m), son aglomerados que contienen microagregados junto con partículas de arena y limo, unidos a su vez por pelos radicales, hifas fúngicas y grandes biomoléculas (Tisdall y Oades, 1982).

La unión de las partículas en agregados da origen a una arquitectura porosa, por donde circula el agua hacia las capas profundas eliminando los excesos y renovando los gases del suelo a través de su intercambio con la atmósfera. Esto permite la difusión del oxígeno necesario para la respiración de las raíces y los microorganismos benéficos, y la salida de otros gases, fruto de la actividad biótica del ambiente edáfico. Cuando el contenido de sodio se eleva, las partículas sólidas pierden su agregación (debido al deterioro de la estructura que este elemento causa a consecuencia de su naturaleza dispersante de los coloides), se rompe la red de poros y se altera la normalidad de estos acontecimientos (Vázquez, 2003). Ardakani y Zahirnia (2006) afirman que una de las características importantes de suelos áridos y semiáridos son la débil estructura con malas propiedades físico-químicas. En estas regiones la estructura del suelo es afectada por el elevado PSI (PSI >15%). Esto incrementa la dispersión y las tasas de erosión del suelo. Kaur *et al.* (2006) estudiaron el efecto de 14 años de riego con aguas sódicas con diferentes niveles de yeso y enmiendas orgánicas sobre un suelo franco arenoso en producción de trigo y arroz. El riego a largo plazo con aguas sódicas deterioró significativamente propiedades del suelo como pH, conductividad eléctrica del extracto de saturación, porcentaje de sodio intercambiable, relación de adsorción de sodio del extracto de saturación, densidad aparente y tasa de infiltración final del suelo. La aplicación de yeso y enmiendas orgánicas resultaron en una mejora de estas propiedades del suelo. Moreno *et al.* (2006) sostienen que el agregado de enmiendas cálcicas permite que el coloide, pase de un estado disperso al floculado, mejorando la dinámica hídrica, favoreciendo el descenso de sales y aumentando el sector del perfil explorable para las raíces. Gupta (2006) señala que los suelos sódicos no sólo se encuentran física y químicamente degradados sino también biológicamente degradados. Debido a la baja carga de microorganismos heterotróficos, el poder de descomposición de la materia orgánica de los suelos

sódicos es considerablemente menor que el de los suelos normales. Haynes y Rietz (2006) relacionaron la productividad de caña de azúcar con PSI, RAS, pH y CE del suelo. Los resultados indicaron que el incremento de la salinidad y sodicidad resultaron en una disminución progresiva de la comunidad microbiana que sería menos eficiente metabólicamente. Los resultados probaron que la agricultura como inductor de la salinidad y sodicidad no solo influye en las características químicas y físicas del suelo sino también reduce la calidad del suelo por inhibición de los procesos microbiológicos y bioquímicos. Esto en definitiva, disminuye la fertilidad y el suministro de nutrientes. También Rashid (2006) afirmó que la alta alcalinidad y/o salinidad disminuye la actividad microbiana y por lo tanto la tasa de mineralización del nitrógeno, necesiéndose tasas mayores de fertilizantes nitrogenados. Alconada *et al.* (2006) citan que la salinización-alcalinización de suelos con cultivos protegidos se produce en la región del Gran La Plata en tiempos que en general no exceden los 2-3 años debido al uso de agua de riego bicarbonatada sódica, y conduce a una drástica disminución de la permeabilidad, favoreciendo la aparición de enfermedades, desequilibrios nutricionales, y disminución de rendimientos. Como resultado hay una mayor demanda de pesticidas y fertilizantes que incrementan los costos y causan la contaminación de napas.

Los procesos de agregación del suelo decrecen considerablemente (particularmente durante el humedecimiento) como resultado de la dispersión de la arcilla o desintegración de agregados. Ambos fenómenos originan el encostramiento y endurecimiento de la superficie del suelo. Esto incrementa la resistencia del suelo y disminuye la tasa de infiltración, la porosidad y la germinación (Barzegar *et al.*, 1994b). Wong *et al.* (2006) sostienen que los suelos sódicos se dispersan al humedecerse, formando estructuras endurecidas masivas cuando se secan, con una relación suelo-agua pobre relacionada en gran medida a la disminución de la permeabilidad, infiltración y formación de costras superficiales. Jassogne *et al.* (2006) reportan las limitaciones de suelos sódicos (Natixeralfs) para la producción debido a la presencia de horizontes Btn de alta densidad y baja capacidad de agua disponible para las plantas, generando inhibición en muchas especies a la penetración de estos horizontes y confinando sus sistemas radicales a los horizontes superiores. Cucci *et al.*, (2006) afirman que la degradación de la estructura del suelo depende en gran medida de la calidad del agua de riego, el tamaño de las partículas del suelo y el tipo de minerales de las arcillas. Dichos autores evaluaron la estabilidad estructural de los agregados de dos tipos de suelos sometidos a 4 años de riego con 9 tipos de soluciones salino-sódicas y luego tratadas por dos años con yeso. La estabilidad estructural se redujo significativamente con el incremento de la salinidad y de la sodicidad del agua de riego aplicada. Las técnicas de recuperación con yeso determinaron una mejora en el índice de estabilidad estructural.

Emerson (1984), Shainberg y Letey (1984), Fitzpatrick *et al.* (1994), Jayawardane y Chan (1994), Lebron *et al.* (1994), demostraron que altos niveles de sodio intercambiable (PSI) causan hinchamiento y dispersión de las arcillas, ocasionando problemas de encostramiento, reducción de la infiltración, incremento

de la erodabilidad (laminar, en surcos y en cárcavas), pérdida de estabilidad estructural y reducción en el crecimiento de las plantas debido a estas alteraciones y a la toxicidad específica del Na^+ .

La alteración de la geometría de los poros del suelo afecta la permeabilidad intrínseca del mismo, la retención de agua y la productividad de los cultivos. Numerosos autores han demostrado la incidencia de la sodicidad en el cambio de la arquitectura porosa de los suelos. Varallyay (2002) detalla la influencia de la salinidad-alcalinidad de los suelos sobre sus propiedades físico-mecánicas señalando que un alto porcentaje de sodio intercambiable (PSI) ocasiona un aumento de la tasa de hidratación de las partículas y del fenómeno de expansión-retracción-rotura, conduciendo al aumento de la dispersión, destrucción de la estructura y rotura de agregados. Al mismo tiempo se altera la distribución del tamaño de poros, disminuyendo la proporción de poros gravitacionales y aumentando la microporosidad con el consiguiente aumento de la retención de agua, disminución de la aireación, de la conductividad hidráulica y del drenaje natural. Esta significativa modificación de la estructura y más concretamente de la conformación del espacio poroso, modifica la compactabilidad de los suelos. Cuando la concentración de sodio es elevada y la salina baja, la arquitectura porosa se altera significativamente. Waldrom y Constantin (1968) observaron que el hinchamiento de las arcillas produjo un incremento de la cantidad de poros muy pequeños a expensas de los de mayor tamaño. Costa y Aparicio (2000) encontraron que suelos con altos contenidos de sodio se dispersan causando un colapso en los macro y microporos, reduciendo el movimiento de gases y agua. Estos problemas asociados con la inestabilidad estructural producen erosión (por el aumento de la escorrentía), dificultad en la preparación de la cama de siembra y pobre establecimiento de plantas (por problemas de encostramiento). Ruiz Vera y Wu (2006) trataron suelos con aguas de RAS de 0, 20, y 50 y conductividad eléctrica (CE) de 3.0 dS m^{-1} . Con el incremento de la RAS disminuyó la estabilidad de los agregados, la tasa de infiltración y se incrementó la cantidad de agua retenida. Disminuyó asimismo la permeabilidad al aire siendo esto atribuido a la reducción en la macroporosidad ocasionada por la alta sodicidad.

Irurtia y Mon (1998) afirmaron que la disminución de la permeabilidad es prácticamente irreversible o de reversibilidad limitada, lo cual se atribuyó a cambios de la matriz sólida del suelo causados por el hinchamiento, agregación defectuosa, dispersión, o varias de estas causas actuando simultáneamente. Mediante observaciones microscópicas, Chen y Banin (1975) establecieron que el reordenamiento de partículas finas se hace conformando una red continua de estos materiales que ocupan los espacios vacíos y esto podría ser la causa de la irreversibilidad del fenómeno. Dane y Klute (1977) establecieron que una vez que se produce la dispersión de las arcillas por sodicidad, no se puede recuperar la permeabilidad agregando soluciones salinas. Peinemann *et al.* (1998) encontraron una disminución considerable de la conductividad hidráulica, alrededor del 50% en promedio, tras la aplicación de 3 láminas de riego de 50 mm c/u. La pérdida de conductividad hidráulica del suelo fue mayor a mayor cantidad de Na^+ en el agua utilizada. Suarez *et al.* (2006) trabajando con 10 soluciones artificiales

combinación de dos salinidades (CE = 1.0 y 2.0 dS/m) y 5 sodicidades (2, 4, 6, 8, y 10 RAS) encontraron pocas diferencias debidas a las diversas salinidades pero si diferencias significativas debidas a las distintas RAS utilizadas. Con el incremento de la RAS disminuyó la infiltración y la conductividad hidráulica. Ferrer y Ourracariet (1996) encontraron que con baja CE y alta RAS se reduce la infiltración del agua, posibilitando la formación de sellos superficiales. Según estos autores, el deterioro de la permeabilidad varía con la textura del suelo, su mineralogía, la presencia de agentes enlazantes como óxidos de Fe^{3+} , Al^{3+} y materia orgánica, y la relación Na^+/K^+ del extracto de saturación. Asimismo, citan una pérdida de cohesividad de las partículas del suelo que se debería a la modificación del espesor de la doble capa difusa de la superficie de los coloides, ante la presencia de Na^+ .

Jayawardane y Chan (1994) relacionaron la escasa productividad de los suelos sódicos con la baja tasa de infiltración y las restricciones de drenaje debido a su poca e inestable macroporosidad. Afirmaron también, que para mejorar la estabilidad de la macroporosidad, puede recurrirse a la adición de agentes químicos (yeso) y materia orgánica mientras que para mantenerla se debe recurrir a técnicas que eviten la recompactación por riego, tráfico e impacto de las gotas de lluvia. Estos autores finalmente recomiendan que para evitar los efectos adversos de la sodicidad en superficie, puede recurrirse al uso de prácticas conservacionistas para agregar materia orgánica al suelo y proteger la superficie de la disturbación mecánica y el impacto de las gotas de lluvia. La arcilla puede dispersarse mecánicamente durante la precipitación debido al impacto de las gotas de lluvia (Abu-Sharar *et al.*, 1987). Ben Hur *et al.*, (1998) demostraron que la formación de las costras superficiales en diferentes suelos se debe a a) la desintegración física de los agregados superficiales causada por el impacto de la gota de lluvia y b) la dispersión de las partículas de arcilla y su movimiento hacia una zona de porosidad reducida, ocupando dichos poros. El encostramiento disminuye la porosidad y la germinación (Barzegar *et al.*, 1994b). El encostramiento es un proceso que involucra dos estados: un humedecimiento inicial y un secado posterior. El humedecimiento inicial causa la rotura de agregados y dispersión contribuyendo al desarrollo de una capa pobremente permeable (Fattah y Upadhyaya, 1996 citados por Rycroft *et al.*, 2002). En el secado se consolida la superficie, se reduce la capacidad de infiltración y se incrementa la resistencia, maximizando la interferencia en la emergencia de los cultivos (Singer y Warrington, 1992 citados por Rycroft *et al.*, 2002). Currie *et al.* (2006) sostienen que el uso de agua de baja calidad y las presiones físicas asociadas con la irrigación como un rápido humedecimiento amenazan la estabilidad estructural del suelo y pueden conducir a un incremento en la resistencia del suelo, densidad aparente y condiciones de anegamiento.

Barzegar *et al.* (1996) señalaron que la sodicidad produjo el colapso no jerárquico de la estructura directamente a nivel de partículas de arcilla, causando la irreversibilidad del fenómeno. La salinidad, en cambio, al margen de la problemática osmótica en la disponibilidad de agua, es responsable de la floculación de los coloides y por ende incidiría positivamente en la estructuración,

acarreado condiciones de agrietamiento, además de tratarse de un proceso reversible. Keren (2000) también afirma que las condiciones físicas adversas impartidas a los suelos por altos PSI en el complejo de intercambio pueden ser parcialmente compensadas por altas concentraciones salinas. La dispersión de las arcillas se produce a altas concentraciones de Na^+ y a baja concentración electrolítica total, es decir por debajo de la “concentración de floculación crítica” (CFC) la cual es definida como la concentración electrolítica necesaria para flocular una suspensión coloidal dada, en un cierto tiempo (Van Olphen, 1977).

Costa y Aparicio (2000) encontraron que la conductividad hidráulica saturada se redujo exponencialmente con porcentajes de sodio intercambiable mayores al 5%, sin embargo esta reducción resultó dependiente del contenido de materia orgánica del suelo siendo menor el grado de susceptibilidad al efecto dispersivo del agua a mayor contenido de materia orgánica. Los cambios en las prácticas de cultivo pueden causar cambios en la naturaleza de los materiales orgánicos presentes con lo que puede variarse progresivamente la resistencia a la tensión en las distintas estaciones (Kay *et al.*, 1988). Ekwue y Stone (1995) encontraron que el valor pico de esfuerzo cortante fue mayor cuando menos materia orgánica se le adicionó al suelo. La disminución del pico de esfuerzo de corte ante el agregado de MO es atribuida a la reducción en la densidad aparente. La MO reduce la densidad aparente durante la compactación debido a que al ser menos densa diluye la matriz del suelo.

6.4.2 Efecto sobre el espesor de la doble capa difusa y sobre la cohesión

De acuerdo a Sánchez-Girón (1996) la cohesión es la propiedad por la que se mantienen unidas entre sí las distintas partículas y agregados del suelo, distinguiéndose dos tipos de cohesión: a) cohesión molecular y b) cohesión superficial. La cohesión molecular se encuentra presente sólo en las arcillas y se debe a un balance entre las fuerzas de Coulomb (repulsivas) y las de Van der Waals (atractivas). Si de la resultante de ambas fuerzas predominan las primeras ocurre la repulsión (dispersión) y cuando lo hacen las últimas se origina una atracción (floculación). La distancia de la doble capa influye decisivamente en el establecimiento de las fuerzas de atracción y de repulsión entre las partículas de arcilla. Cuanto más pequeña sea esta distancia tanto mayor será la probabilidad de que las fuerzas de atracción superen a las de repulsión. Los factores de los cuales depende la distancia de la doble capa son: a) carga de los cationes: cuanto mayor es la carga eléctrica de los cationes menor es la distancia de la doble capa (cationes divalentes como Ca^{++} y Mg^{++} originan dobles capas de menor distancia que los monovalentes Na^+ y K^+) b) radio iónico hidratado del catión: para una misma carga eléctrica, los cationes de menor radio iónico hidratado son los que crean dobles capas de menor distancia (calcio tiene menor radio hidratado que magnesio) c) concentración de los cationes: cuanto mayor es la concentración de cationes en la solución del suelo menor es la distancia de la doble capa. Los suelos sódicos en consecuencia, tienen una baja cohesión molecular cuando húmedos, debido a que al tener el complejo saturado con sodio, catión

monovalente y de gran radio iónico hidratado, aumenta el espesor de la doble capa difusa y en consecuencia se genera la dispersión. El incremento de la salinidad en cambio, disminuye el espesor de la doble capa, favoreciendo la floculación.

La cohesión superficial en cambio, se debe a la existencia de fuerzas de tensión superficial en las interfases agua-aire que se establecen en los poros que los agregados dejan entre sí. A medida que aumenta el contenido de humedad del suelo también lo hace el número de estas interfases y, por lo tanto, se incrementa el valor de cohesión superficial. Llega un momento en el que el contenido de humedad es tal que el agua satura un gran porcentaje de poros, con lo que disminuye el número de interfases agua-aire y desciende el valor de la cohesión superficial. Esta disminución tiene lugar con contenidos de humedad que ya están próximos al límite líquido del suelo.

Es muy probable que a consecuencia del incremento del área regada y del uso de aguas de baja calidad se incremente la superficie afectada por suelos salinos y sódicos por lo que será importante conocer el comportamiento mecánico de los mismos para determinar las implicancias sobre aspectos como la labranza y el tránsito.

6.5 Comportamiento mecánico de los suelos

El comportamiento mecánico (respuesta ante la aplicación de cargas externas), es un buen indicador de las condiciones físicas de un suelo. La resistencia al corte de un suelo indica su capacidad de soportar esfuerzos tangenciales (Sánchez-Girón, 1996) y representa la resistencia al resbalamiento de una capa de suelo sobre otra inmediatamente contigua. Desde un punto de vista cuantitativo, la resistencia a la tensión es igual a la tensión máxima que puede ser aplicada sobre un suelo sin sufrir rotura (Hillel, 1998). También puede definirse como la cantidad de fuerza por unidad de área requerida para separar una porción de suelo de otra. Según Kay y Dexter (1992) la resistencia a la tensión es una característica dinámica de los suelos bajo condiciones de campo y para un suelo dado, refleja la integración de procesos que conducen a un endurecimiento y aflojamiento de las zonas de falla. La matriz del suelo puede ser considerada como una red tridimensional de zonas de falla. Las zonas tienen una distribución de resistencias y determinan la respuesta del suelo a las diversas tensiones a que es expuesto como labranza, impacto de las gotas de lluvia y crecimiento de raíces. La resistencia a la tensión es una medida de la resistencia de las zonas de falla al aflojamiento (Braunack *et al.*, 1979) y la distribución de las resistencias ha sido usada como una medida de la friabilidad del suelo (Utomo y Dexter, 1981a)

La resistencia de un suelo es influenciada por diversos factores entre los que se encuentran la humedad, los cationes adsorbidos, el contenido de arcilla y la arcilla dispersable. Es conocido el efecto negativo de este último factor sobre la permeabilidad y sobre la formación de costra (So y Alymore, 1995; Barzegar *et al.*, 1994a). Un incremento de la arcilla dispersa conduce a un incremento de la

resistencia del suelo (Chan, 1989; Kay y Dexter, 1992). Es suficiente una pequeña cantidad de sodio adsorbido para aumentar la dispersión de la arcilla. Trabajos de Barzegar *et al.* (1994a) han demostrado que un incremento del porcentaje de sodio intercambiable produce un incremento de la arcilla dispersa y por lo tanto de la resistencia del suelo. Aunque ha sido reconocido que la presencia de sodio influye negativamente en la traficabilidad y laborabilidad de los suelos (So y Alymore, 1995), han sido escasos los intentos de reportar las variaciones de la resistencia mecánica con estas características operativas. Uno de los enfoques más interesantes para este problema es el de considerar las deformaciones del suelo inducidas por las tensiones aplicadas en el marco de la teoría del estado crítico (Hettiaratchi y O'Callagan, 1980; Kirby y Blunden, 1991).

La compactación de los suelos inducida por el pasaje de las máquinas y por lo tanto la traficabilidad, pueden ser estudiadas utilizando pruebas de compresión uniaxial confinada (Koolen y Kuipers, 1983; Spugnoli *et al.*, 1990). Con respecto a la laborabilidad, el ensayo de compresión uniaxial inconfineda y de resistencia al corte permite valorar la modalidad de deformación y la resistencia a la tracción, que con posteriores elaboraciones pueden ser utilizados como indicadores de esta característica operativa (Utomo y Dexter, 1981a; Hettiaratchi, 1987; Spugnoli *et al.*, 1988; Kirby y Blunden, 1991; Spugnoli *et al.*, 1993).

6.5.1 Comportamiento de los suelos ante la compresión

Numerosos estudios relativos a la compresión de los suelos permiten enunciar las siguientes afirmaciones:

-la compresión uniaxial alinea las partículas en sentido normal a la dirección de las tensiones compresivas mayores (Scott, 1963; Mitchell, 1976; Delage y Lefebvre, 1984);

-a menores tensiones que las tensiones de preconsolidación (máxima tensión experimentada previamente por el suelo), el reordenamiento de la estructura es limitado (Delage y Lefebvre, 1984), por lo que la compresión es limitada y no permanente a estas presiones. Esto implica que la estructura es suficientemente robusta para soportar tensiones de dicha magnitud;

-superada la tensión de preconsolidación, el efecto de incrementos de tensiones causa significativos reordenamientos de la estructura (Delage y Lefebvre, 1984) que culminan en la compresión del suelo;

-ante un incremento dado de tensión, los poros de mayor tamaño son comprimidos primero (Delage y Lefebvre, 1984; Griffiths y Joshi, 1989);

- una estructura de partículas floculadas tiene una relación de poros mayor (es menos densa) que una que tiene una estructura dispersa y ante tensiones de compresión uniaxial mayores que la tensión de preconsolidación el efecto de incrementar las tensiones es mayor que sobre una dispersa. (Mitchell, 1976);

-las compresiones uniaxiales ocasionan una disminución de la permeabilidad (Blackwell *et al.*, 1990; Kirby, 1991c). Esto es debido, en parte a la disminución en el volumen de poros y en parte al incremento de la alineación de partículas presentando un camino más tortuoso al fluido.

6.5.2 Comportamiento de los suelos ante el corte

A partir de estudios de corte de suelos en cajas de corte directo y ensayos triaxiales pueden enunciarse las siguientes afirmaciones:

-el corte alinea la estructura en la dirección del corte (Scott, 1963; McKyes y Yong, 1972; Mitchell, 1976);

-ante pequeñas deformaciones de corte, previo a que las tensiones de corte igualen la resistencia máxima del suelo, el efecto del reordenamiento de la estructura es limitado y el corte del material es generalizado (Morgenstern y Tchalenko, 1967; Barden, 1972; Dickson y Smart, 1976). Previo a la rotura los cambios de volumen y las deformaciones permanentes son limitados;

-ante grandes deformaciones, cuando las tensiones de corte han alcanzado o superado la resistencia máxima del suelo, se desarrollan zonas localizadas de partículas alineadas (Morgenstern y Tchalenko, 1967; Dickson y Smart, 1976). El reordenamiento total de las partículas es más pronunciado y deformaciones significativas y permanentes aparecen durante la rotura;

-cuando el corte es realizado a bajas tensiones normales, es acompañado por expansión y las estructuras alineadas se restringen a zonas delgadas entre bloques relativamente indeformados de suelo. Por el contrario, cuando el corte se lleva a cabo a altas tensiones normales es acompañado por compresión y conduce a un reordenamiento de la estructura generalizado a todo el material que ha sido cortado (Foster y De 1971; Barden, 1972; Dickson y Smart, 1976; Kirby, 1991c);

-durante la expansión el suelo se afloja, conduciendo a una concentración de la deformación de corte en el lugar donde se inicia el mismo. Por otro lado, durante la compresión el suelo se densifica y de esta forma se evita la localización del corte, propagándose en toda la muestra que ha sido cortada. Esta diferencia de comportamiento ha sido advertida también por Spoor y Godwin (1979) que subrayaron su relevancia para la labranza;

-a una misma relación porosa, una estructura floculada es más robusta (son requeridas mayores tensiones de corte para interrumpir la estructura) que una estructura dispersa (Warkentin y Yong, 1962). Olson (1962) en mediciones de ensayos triaxiales, encontró a la resistencia independiente de la estructura mientras que la deformación resultó dependiente de la estructura;

-Dawidowski y Koolen (1987) mostraron que el corte puede reducir notablemente la permeabilidad. Kirby y Blunden (1991) estudiaron la influencia de los dos regímenes de deformación (expansión y compresión con el corte) sobre la permeabilidad al aire de suelos con y sin una orientación preferencial de sus macroporos. En los primeros los cambios en la permeabilidad fueron determinados por las variaciones que sufrió la continuidad porosa mientras que en los últimos variaron con el volumen poroso.

Las propiedades de compresibilidad y resistencia al corte pueden ser analizadas en el marco de la teoría Clásica de Mohr – Coulomb y/o de la Teoría del Estado Crítico.

6.6 Teoría de Mohr-Coulomb

La teoría de falla de Mohr-Coulomb establece que la falla en un material ocurre si los esfuerzos de cizallamiento sobre cualquier plano se igualan a la resistencia al corte del material. El corte del suelo involucra la falla del mismo. Esta falla mecánica puede aparecer a lo largo de una superficie interna de ruptura dentro del suelo, y también en el límite entre suelo y superficie de la herramienta de corte.

Las bases de los conocimientos de resistencia al corte del suelo fueron escritas por Coulomb (1776). Trabajando con suelos, Coulomb determinó el esfuerzo máximo de corte que podía ser aplicado dentro de una muestra, variando los niveles de esfuerzos normales. En sus pruebas notó que aparecían dos factores que determinaban la resistencia final de ambos materiales al corte. Estos factores recibieron el nombre de fricción y cohesión. La resistencia al corte debida a la fricción es proporcional a la presión perpendicular actuante sobre la superficie de corte.

$$\tau = f(\sigma)$$

La cohesión es una constante con respecto a la acción de la presión o tensión normal. La resistencia total del material al corte es la suma de estos dos factores.

Coulomb trazó los valores de tensiones de cizallamiento máximo con las respectivas tensiones normales sobre el plano de falla y obtuvo una recta con una intersección sobre el eje de tensión cortante (término independiente) igual a la cohesión y una pendiente igual a la tangente del ángulo de rozamiento interno de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

donde τ es la tensión de corte resistida por el suelo, c es la cohesión, σ es la tensión normal actuante sobre la superficie interna de corte y $\tan \phi$ es el coeficiente de fricción interna. (Ver Figura 3)

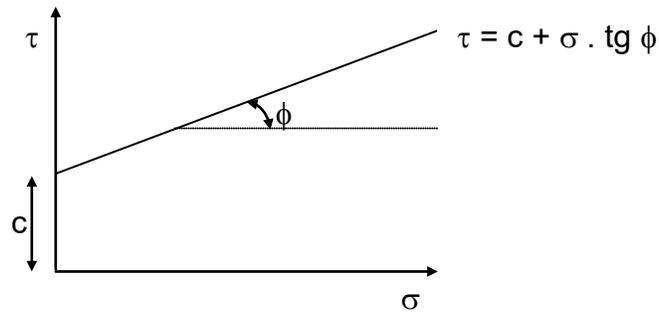


Figura 3: Recta de Coulomb.

El parámetro ϕ se denomina ángulo de fricción interna y es directamente visible como el ángulo de reposo de una pila de material granular. La resistencia al cizallamiento τ representa la tensión de cizallamiento máxima que puede ser soportada sobre cualquier plano en un material dado (McKyes, 1985).

En 1914 Mohr introdujo un método gráfico para calcular las tensiones en un plano cualquiera de un cuerpo o de un elemento de suelo que se encuentra en equilibrio bajo la acción de las tensiones que actúan en dos direcciones perpendiculares. El método se conoce con el nombre de Círculo de Mohr y la forma de obtener la recta de Coulomb con esta metodología a partir del ensayo triaxial se encuentra detallada en la Sección 6.8.2.

Suele utilizarse comúnmente la ecuación de Micklethwaite (1944) que en lugar de utilizar tensiones, utiliza fuerzas en sus términos y surge de multiplicar miembro a miembro la ecuación de Coulomb por el área.

$$(\tau) \cdot A = (c + \sigma \tan \phi) \cdot A$$

$$\tau \cdot A = c \cdot A + \sigma \cdot A \cdot \tan \phi$$

$$F_c = c \cdot A + CN \cdot \tan \phi$$

$$F_c = c \cdot S + Q_{ad} \cdot \tan \phi$$

donde F_c es la fuerza de corte resistida por el suelo y CN es la carga normal que soporta el suelo en el momento del corte. La última ecuación refleja la situación de vínculo de las ruedas motrices de un tractor con el suelo, donde S representa el área de contacto rueda-suelo y Q_{ad} el peso adherente que recae sobre el eje motriz.

Los valores de c y ϕ varían con la textura de los suelos. Los suelos arcillosos poseen una elevada cohesión pero poco ángulo de roce interno, mientras que los arenosos, son poco cohesivos y con un elevado roce interno. Los suelos francos poseen propiedades intermedias (ver Figura 4) .

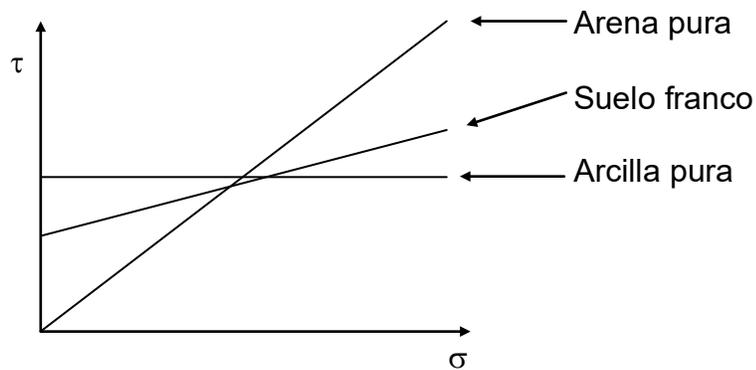


Figura 4: Rectas de Coulomb de suelos con distintas texturas.

La cohesión y el ángulo de roce interno son tenidos en cuenta en el momento de afrontar problemáticas de elevado porcentaje de patinamiento. El patinamiento es una pérdida de potencia provocada por un elevado esfuerzo de tiro que hace que la fuerza demandada por la rueda del tractor sea mayor que la fuerza cortante que puede resistir el suelo. Para atenuar dicha pérdida habitualmente se recurre a aumentar la superficie de contacto (mediante ruedas de mayor ancho de pisada o duales) o aumentar el peso adherente del tractor (mediante lastre metálico, hidroyneado o aumento de la transferencia de peso anteroposterior). El aumento de la superficie de contacto resulta más oneroso y técnicamente es aconsejable para solucionar problemas de patinamiento en suelos que tienen elevada cohesión como los arcillosos. Así, la elevada cohesión del suelo arcilloso es multiplicada por una mayor superficie de contacto, otorgando una mayor resistencia al corte. El aumento del peso adherente en cambio, es más económico y resulta una variable de ajuste más apropiada para solucionar el problema en suelos con elevada fricción interna como los arenosos. De esta manera, el elevado ángulo de roce interno del suelo arenoso es multiplicado por el peso adherente, otorgando una mayor resistencia al corte.

En este trabajo de Tesis se determinarán y compararán las rectas de Coulomb de suelos tratados con aguas de riego de diferente calidad determinándose, ante la presencia de diferencias significativas, si las mismas se corresponden con cambios en cohesión y/o ángulo de roce interno de las partículas.

6.7 Teoría del estado crítico

De las numerosas disciplinas involucradas en el estudio de los suelos agrícolas, la contribución hecha por la mecánica de suelos resulta bastante modesta. La teoría del estado crítico de la mecánica del suelo analiza el comportamiento mecánico de suelos saturados y postula métodos para predecir los cambios en el espacio poroso del suelo en respuesta a las tensiones aplicadas. Este análisis adquiere relevancia y ha sido utilizado para el estudio de problemas de compactación y labranza (Hettiaratchi, 1987; Kirby, 1991a),

preparación de arroceras (Blunden *et al.*, 1993), crecimiento de raíces (Hettiaratchi, 1990) e influencia de las deformaciones del suelo sobre su estructura y permeabilidad (Kirby, 1991a; Kirby, 1991c; Kirby y Blunden, 1991). Los métodos de la mecánica clásica de suelos están estrictamente limitados al análisis de las cargas sobre el suelo y no abordan el comportamiento previo o posterior al corte del mismo por lo que poco puede deducirse sobre la interacción implementos agrícolas-suelo. La mecánica del estado crítico desarrollada por el Profesor Roscoe y sus colegas en Cambridge, provee una teoría unificadora que permite vincular las tensiones a las que los suelos son sometidos con los cambios en el espacio poroso de los mismos y por lo tanto resulta relevante en investigaciones sobre problemas de labranza y compactación. Información más detallada sobre la teoría puede ser encontrada en los trabajos de Schofield y Wroth (1968), Atkinson y Bransby (1978), Hettiaratchi y O'Callaghan (1980), Kirby (1989). A continuación se expresarán en forma sintetizada las ideas básicas que la misma postula.

El comportamiento mecánico del suelo puede ser cuantificado por los cambios acarreados en su espacio poroso debido a la aplicación de tensiones. El espacio poroso puede ser vinculado al volumen específico del suelo " v ", que es el valor inverso de la densidad aparente $v = 1/\delta_{ap}$.

La variación del volumen específico del suelo ante la aplicación de tensiones puede ser esquematizada en un diagrama tridimensional de tres ejes ortogonales que representan la tensión normal (p), la tensión de corte (q) y el volumen específico (v). De esta manera, todos los estados posibles de un elemento de suelo pueden ser representados por puntos en el espacio p - q - v .

La teoría del estado crítico establece que los suelos expuestos a deformaciones cortantes alcanzan finalmente un *estado crítico* en el cual fluyen sin nuevos cambios en el espacio p - q - v . El lugar en el espacio p - q - v en el que esto ocurre es único para un suelo dado y es llamado *línea de estado crítico (critical state line)*. La misma puede verse en la Figura 5. Asimismo, la teoría indica el estado final alcanzado por un elemento de suelo cargado y las direcciones en el espacio p - q - v que puede recorrer el suelo cuando es deformado.

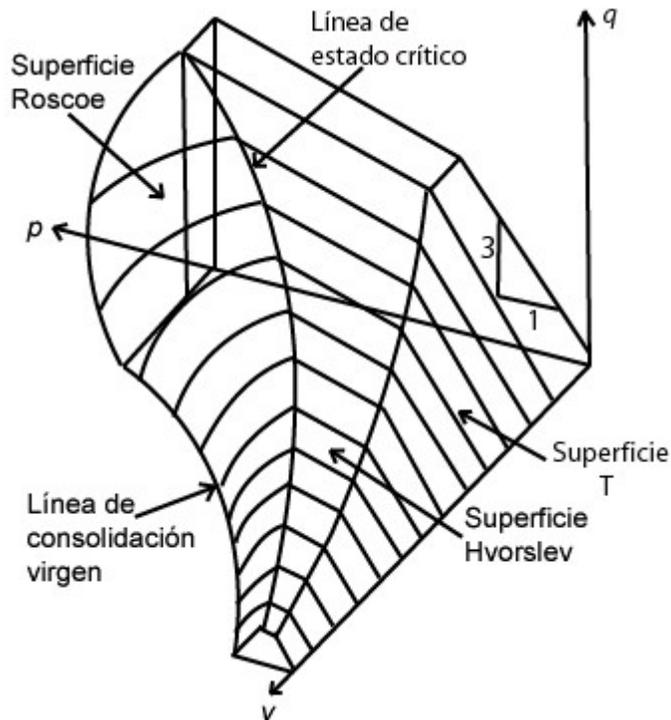


Figura 5: Fronteras de estado en el espacio p - q - v

No todas las combinaciones de p , q y v son posibles pues existen ciertas fronteras que limitan los valores que p , q y v pueden alcanzar. Estas fronteras son denominadas *fronteras de estado* y los lugares en el espacio p - q - v por los que un elemento de suelo se desplaza durante la deformación son llamados *caminos de estado* (*state paths*). Los caminos de estado deben estar siempre dentro de una frontera de estado o a lo sumo pueden recorrerla, pero no pueden atravesarla. Una de las líneas fronteras de estado es la línea de estado crítico, mencionada anteriormente. Otra línea frontera de estado es la *línea de consolidación normal* o *línea de consolidación virgen* (*virgin consolidation line* ó *normal consolidation line*) (ver Figura 5) que se encuentra sobre el plano $q=0$ (plano p - v) y que puede considerarse como la variación en el volumen específico durante la compresión del suelo.

Evidencias experimentales, recabadas de ensayos triaxiales sobre arcillas, indican que las líneas de estado crítico y de consolidación normal se encuentran unidas por una superficie curva de frontera de estado llamada por Atkinson y Bransby (1978) *superficie Roscoe*. Asimismo, trabajos experimentales llevados a cabo sobre arenas y arcillas indican que el espacio entre la línea de estado crítico y el origen de coordenadas del espacio p - q - v se encuentra también limitado hacia arriba por una frontera de estado que contiene a la línea de estado crítico siendo dicha frontera una superficie curva generada por líneas rectas que tienen un gradiente fijo H sobre el plano p - q (plano $v=0$). Esta superficie es conocida como *superficie Hvorslev*. Como puede verse en la Figura 5, la línea de estado crítico se encuentra uniendo las superficies Roscoe y Hvorslev. Por último, existe una tercer superficie de frontera de estado que es un plano conteniendo el eje v e inclinado

hacia arriba con una pendiente de 3:1 (sobre el plano p - q). Dicha superficie es llamada *superficie T*. El espacio encerrado por las tres superficies de fronteras de estado se denomina *espacio de estados (state space)* y por definición todos los caminos de estado deben encontrarse contenidos en el mismo.

Todo el espacio de estados encerrado por las superficies Roscoe, Hvorslev y T representa la fase elástica del suelo cargado y las deformaciones asociadas con los caminos de estado dentro del mismo son recuperables con la descarga. Si en cambio, el camino de estado toca o recorre una frontera de estado, el suelo alcanzará la rotura y adquirirá deformaciones plásticas permanentes. Esta última situación es la que reviste importancia en estudios sobre labranza y compactación.

El espacio de estados se encuentra dividido en dos secciones por una pared imaginaria vertical que contiene a la línea de estado crítico (Ver Figura 6) que es llamada habitualmente "*pared de estado crítico*".

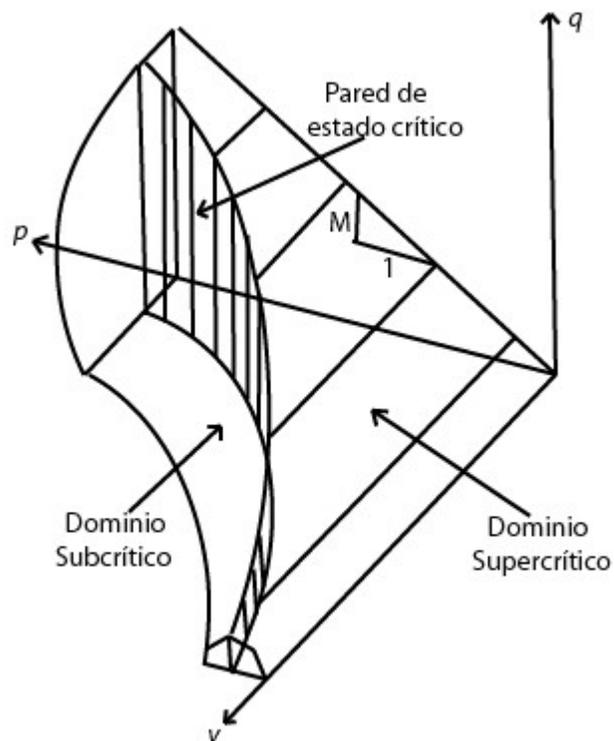
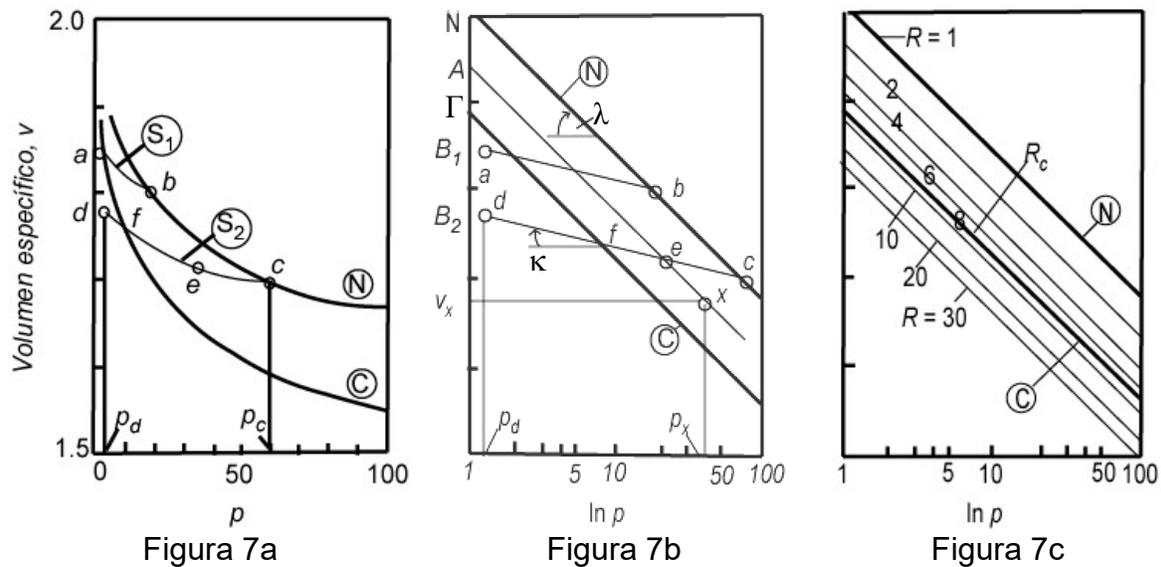


Figura 6: Pared de estado crítico

Siguiendo la terminología propuesta por Naylor (1978) el espacio de estados delimitado por la pared de estado crítico y conteniendo el origen de los ejes p , q y v es denominado *dominio supercrítico* y el más alejado del origen *dominio subcrítico*. También se los suele llamar "*seco*" y "*húmedo*" respectivamente.

El comportamiento mecánico del suelo en estos dos dominios puede ser considerado en el contexto de la compresión isotrópica donde $q=0$, por lo que los caminos de estado se encontrarán confinados al plano $p-v$ (ver Figura 7a).



Figuras 7: Líneas de estado crítico, de consolidación normal y de recuperación en el plano $q = 0$

De esta manera, si un elemento de suelo inicialmente en un punto a (Figura 7a) es comprimido, se desplazará a lo largo de la línea ab hasta alcanzar la línea de consolidación normal en b . Esta línea es una frontera de estado en el dominio subcrítico y el camino de estado no puede cruzar dicha frontera pero puede seguir por ella, por ejemplo, hasta el punto c . El suelo se dice entonces que está *normalmente consolidado* y en un *estado subcrítico*. Cuando la tensión normal p_c en c es disminuída, el elemento de suelo se desplazará por un camino de estado a lo largo de la línea cd . Este camino de estado, provocado por la disminución de la carga normal, es denominado *línea de recuperación* (*rebound line* ó *swelling line*, así llamada debido a la recuperación del volumen poroso del suelo con la descarga) y el suelo en d estará en un estado *sobreconsolidado* y dentro del dominio supercrítico. Si la descarga sólo se hubiese realizado hasta el punto e el suelo habría quedado sobreconsolidado pero en el dominio subcrítico. En caso de que el suelo en el punto d ó e , vuelva a ser cargado se recomprimirá por dicha línea de compresión - recuperación, pudiendo llegar a c y si la tensión normal continúa creciendo, el camino de estado descenderá por la línea de consolidación virgen. Obsérvese que el suelo en el punto d se ha expandido con la descarga con respecto al punto c , pero ha perdido volumen específico (se ha densificado) con respecto al punto de partida original a , es decir que la compresión ha resultado en deformaciones plásticas (irrecuperables con la descarga). Si el suelo solo se hubiese comprimido hasta el punto b y allí se lo hubiese descargado, habría retornado al punto a y solo se hubiesen producido deformaciones elásticas (recuperables con la descarga). Existe por lo tanto una tensión que divide el

comportamiento del suelo en elástico y plástico que sería la tensión recibida en *b*. A dicha tensión se la denomina tensión de preconsolidación, y tensiones mayores a la misma causarán deformaciones plásticas (irreversibles). La tensión de preconsolidación indica la tensión máxima previa experimentada por el suelo durante eventos de compresión. Por lo tanto, una muestra que es cargada en compresión uniaxial hasta tensiones mayores que la tensión de preconsolidación desciende por la línea de consolidación virgen y cuando es descargada retorna por una línea de recuperación. Si a este suelo se lo recarga hasta tensiones mayores que en el ciclo anterior, descenderá por la línea de recuperación hasta alcanzar la línea de consolidación virgen y luego continuará descendiendo por la misma (Kirby, 1989). Los cambios en la estructura causados por compresión son limitados y transitorios a tensiones menores que la tensión de preconsolidación, pero considerables y permanentes para tensiones mayores (Kirby, 1991a). Kirby (1991 b) encontró que dicha tensión se incrementa cuando la densidad se incrementa y cuando el contenido de agua decrece.

Si se esquematiza el plano *p-v* en un gráfico semilogarítmico *v-ln(p)* se observa una variación lineal de la línea de estado crítico (C) y de la línea de consolidación normal (N) (Figura 7b). Ambas rectas resultan paralelas. En dicho gráfico las líneas de consolidación virgen y de estado crítico responden a las ecuaciones

$$\text{Línea de consolidación normal} = \text{LCN} = v = N - \lambda \cdot \ln(p)$$

$$\text{Línea de estado crítico} = \text{LEC} = v = \Gamma - \lambda \cdot \ln(p)$$

Nótese que ambas líneas tienen la misma pendiente λ por lo que resultan paralelas. No obstante el término independiente N es mayor que Γ por lo que la línea de estado crítico se encuentra a la izquierda de la línea de consolidación normal.

Las líneas de compresión *ab* y de recuperación *cd* también se transforman en dos líneas rectas con una pendiente κ menor al gradiente λ de la línea de estado crítico y de la línea de consolidación virgen.

Cada punto sobre el plano *p-v*, representando el estado de un elemento de suelo, puede considerarse que está sobre una línea de recuperación. La posición relativa de cada punto sobre la línea de recuperación depende de su *relación de sobreconsolidación R* o *relación de tensión*, que para un punto como *d* en la Figura 7 puede ser definido como $R = p_c/p_d$. Por lo tanto $R = 1$ para todos los puntos pertenecientes a la línea de consolidación normal. Pueden trazarse asimismo, otras líneas que contengan a otros puntos con otras relaciones de sobreconsolidación que resultarán líneas rectas paralelas entre sí como se ve en la Figura 7c.

Estas líneas resultarán ser paralelas a las líneas de consolidación normal y de estado crítico. Asimismo la línea de estado crítico tendrá un valor de $R = R_c$

($R_c = 8$ en el ejemplo) que es denominado relación de sobreconsolidación crítica. Un elemento de suelo se encontrará en el dominio supercrítico cuando tenga una $R > R_c$ y en el dominio subcrítico si $1 \leq R < R_c$.

Cuando aparece una tensión cortante ($q > 0$) los caminos de estado no se circunscribirán al plano $p - v$ sino que se moverán en el espacio de estados. Consideremos el elemento de suelo subcrítico sobre la línea de consolidación normal ($R = 1$) representado por el punto a en la Figura 8a. Como a está sobre una frontera de estado, el camino de estado simplemente seguirá la superficie Roscoe durante el corte hasta llegar al estado crítico en b . Trazando este camino de estado sobre el plano $v - \ln(p)$ (ver Figura 8b), puede verse que el suelo se ha compactado. Dicho comportamiento puede explicarse debido a que previo al corte, la imposición de una tensión compresiva ha forzado a las partículas a ocupar un menor volumen al moverse hacia los poros adyacentes, rotar hasta estar casi horizontales y romperse los agregados hasta producir pequeñas partículas con menor porosidad total. Al cortar dicha muestra se fuerza nuevamente a las partículas a moverse, rotar y romperse alcanzando nuevas posiciones de manera de ocupar un menor volumen que el causado sólo por la tensión normal (Kirby, 1991a).

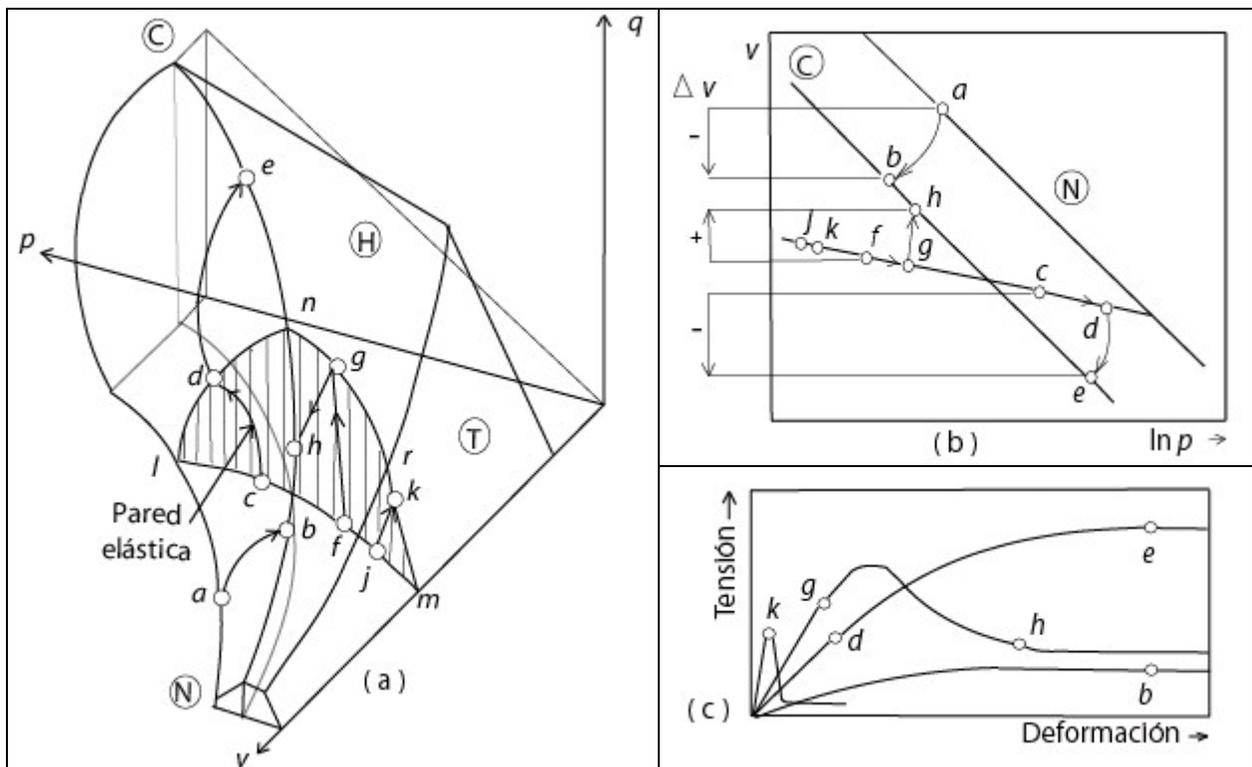


Figura 8: a) Caminos de estado en el espacio p - q - v y b) Caminos de estado en el plano $v - \ln p$ c) Diagramas tensión-deformación de los caminos de estado

Se analizará ahora el camino de estado para un elemento de suelo que posee un R en el intervalo $1 < R < R_c$ como el representado por el punto c que se

encuentra en la línea de recuperación lm (ver Figura 8a). Puede erigirse una pared vertical curvada que contenga la línea de recuperación de manera similar a lo explicado para la pared de estado crítico. Estos planos curvos están asociados con deformaciones recuperables y son denominados *paredes elásticas*. Durante la deformación cortante el camino de estados sigue la curva cd sobre la pared elástica. Si la tensión es disminuida durante esta trayectoria antes de que el camino de estado alcance el punto d , el elemento de suelo puede volver a c . Cuando el camino de estado alcanza la superficie Roscoe en d el suelo adquiere deformaciones plásticas y pasa del estado subcrítico al crítico en el punto e . Puede verse en la Figura 8b que la deformación total elástica y plástica ha resultado en una disminución del volumen específico. Este comportamiento puede explicarse teniendo en cuenta que la muestra ha sido comprimida por una tensión normal y luego descargada, en respuesta a lo cual logra cierta expansión. Pero no se expande hasta el volumen original (previo a recibir la tensión normal) porque nada fuerza a las partículas a salir fuera de los poros que han alcanzado existiendo además uniones químicas y conexiones físicas entre partículas adyacentes que previenen que la expansión de la muestra supere una pequeña cantidad. El corte a la muestra en este estado puede romper estas uniones y forzar a las partículas a salir fuera de los poros, superando dichas conexiones (Kirby, 1991a).

El punto f , sobre la línea de recuperación $lcfjm$ en la Figura 8a, representa un elemento de suelo supercrítico con $R > R_c$. Durante la carga el camino de estado se desplazará por fg alcanzando la superficie Hvorslev en g . Luego, continuará por la superficie Hvorslev y el elemento de suelo alcanzará la línea de estado crítico en h . Puede verse en la Figura 8b que el suelo ha incrementado su volumen específico durante la carga.

Otro posible camino de estado para elementos de suelo supercríticos puede originarse con valores bajos de p ($R \rightarrow \infty$) como el representado por el punto j en la Figura 8a. Luego de una corta trayectoria sobre la pared elástica el camino de estado llega a la superficie T en el punto k . Este punto representa la condición de falla para el elemento de suelo y en teoría el camino de estado podría recorrer la parte remanente de la superficie T hasta llegar a la superficie Hvorslev y dirigirse a la línea de estado crítico.

En los ejemplos mencionados puede advertirse que los elementos de suelo subcríticos, estén normalmente consolidados o no, se compactan cuando van hacia el crítico mientras que los supercríticos se dilatan y aflojan durante la transición al crítico.

La Figura 8c muestra el diagrama tensión deformación para cada uno de las situaciones planteadas arriba. Puede verse que los suelos supercríticos exhiben un valor pico de tensión claramente identificable mientras que los subcríticos carecen de este pico. Los suelos supercríticos disminuyen el esfuerzo cortante y

son inestables cuando recorren una frontera de estado mientras los subcríticos aumentan dicho esfuerzo y son estables durante la fase de rotura.

Se puede proyectar una pared elástica sobre el plano tensión de corte-tensión normal (Figura 9). La línea de estado crítico define las condiciones de corte y tensión normal en que el corte se realiza sin cambios de volumen. A la izquierda de la línea de estado crítico, en la superficie Hvorslev, el corte ocurre a tensiones leves (obsérvese la caída del esfuerzo al llegar a la superficie Hvorslev en Figura 9) y aparece un incremento de volumen con el mismo. A la derecha, en la superficie Roscoe (llamada superficie Rendulic por Naylor y Pande, 1981), el corte ocurre a grandes tensiones y es acompañado por un decrecimiento de volumen. Obsérvese en Figura 9 como luego de llegar a la superficie Roscoe, el esfuerzo se incrementa hasta llegar al estado crítico. Durante el corte el suelo se aproxima al estado crítico (Kirby, 1989).

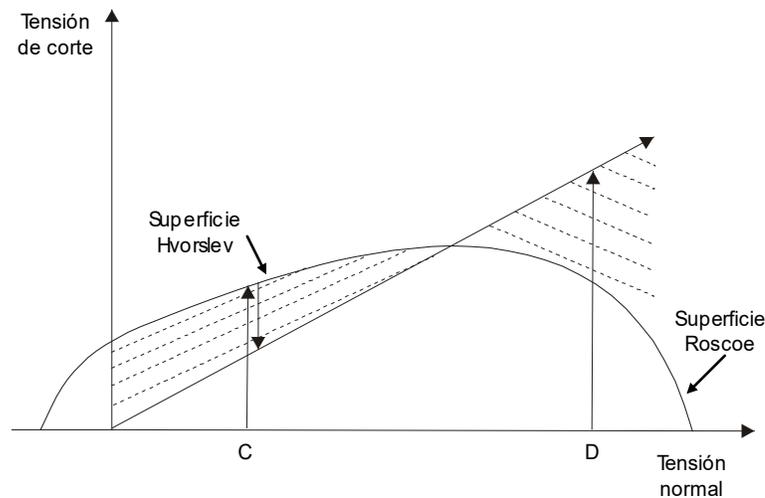


Figura 9: Proyección de una pared elástica en el espacio tensión normal-tensión de corte mostrando el comportamiento de expansión (C) y compresión (D)

En este trabajo de Tesis se evaluará en que grado se modifican las propiedades de estado crítico de los suelos cuando son afectados por aguas de riego de distinta calidad. Para lo mismo se determinarán las posiciones que toman las líneas de consolidación normal y de estado crítico en el plano $v-\ln(p)$.

Para hallar la línea de consolidación normal se realizarán las regresiones entre v y $\ln(p)$ y se determinarán los parámetros N y λ realizándose las comparaciones de los mismos entre los distintos tratamientos. Recuérdese que la línea de consolidación normal o de consolidación virgen responde a la ecuación $LCN = v = N - \lambda \cdot \ln(p)$. Para hallar la posición de la línea de estado crítico previamente se deberán realizar regresiones entre las relaciones de volúmenes RV y las relaciones de tensión RT . La relación de volumen es la diferencia de volumen posterior y previo al corte con el volumen previo al corte. $RV = (V_f - V_i) / V_i$. Cuando dicha relación es igual a 0 (debido a que volumen inicial y final son iguales y se anulan) el suelo ha alcanzado el estado crítico. En esta situación

puede despejarse RT de la regresión $RV = a + b \ln(RT)$ y calcularse la relación de tensión RT (porcentaje de la tensión normal máxima recibida previamente) con que el suelo alcanza el estado crítico.

Conociendo la relación de tensión crítica y sabiendo que la ecuación de la línea de estado crítico es $LEC = v = \Gamma - \lambda \cdot \ln(p)$ puede trazarse ahora la misma en el gráfico $v - \ln(p)$ junto a la línea de consolidación virgen.

6.8 Antecedentes metodológicos para evaluar la compresibilidad y la resistencia al corte de los suelos

Algunos métodos para determinar la resistencia al corte y la compresibilidad han sido desarrollados por el campo del saber de la ingeniería de fundaciones, de movimiento de tierras y de diseño de tracción de vehículos. El objetivo de una medición de resistencia del suelo es obtener un valor independiente y exacto que pueda ser luego utilizado en ecuaciones para el cálculo de capacidad de fundaciones, fuerzas de tracción de vehículos, demanda energética de herramientas de labranza, etc. Los instrumentos utilizados varían en complejidad y en la información que proveen. Ciertos métodos de medición se utilizan sólo en laboratorio, mediante suelo reestructurado o muestras de bloques tomadas del campo. Este tipo de pruebas en general son más costosas y laboriosas. Otros aparatos se utilizan directamente en el campo, eliminando de esta forma el peligro de disturbación de las muestras de suelo durante la remoción y el transporte al laboratorio. Sin embargo, los parámetros del suelo que pueden ser medidos en el campo son limitados. No existen reglas fijas para la elección del método de ensayo de resistencia al corte pudiendo tenerse en cuenta el grado de control sobre el comportamiento del suelo y la precisión requerida (McKyes, 1985).

6.8.1 Métodos de campo

Uno de los aparatos desarrollados es la caja de torsión, cuyos órganos activos son una serie de paletas radiales que son introducidos en el suelo y son capaces de producir la rotura luego de la aplicación de un momento torsor. La variación de la carga normal se hace con la colocación de diferentes contrapesos. Ver Figura 10. El valor del máximo esfuerzo cortante vale

$$\tau = 3M/2\pi r^3$$

donde M : momento torsor y r : radio de la caja. El inconveniente que presenta este aparato es la desigualdad de la deformación que experimenta el suelo, siendo mayor en la fracción más alejada del eje de la caja (Sánchez Girón, 1996).

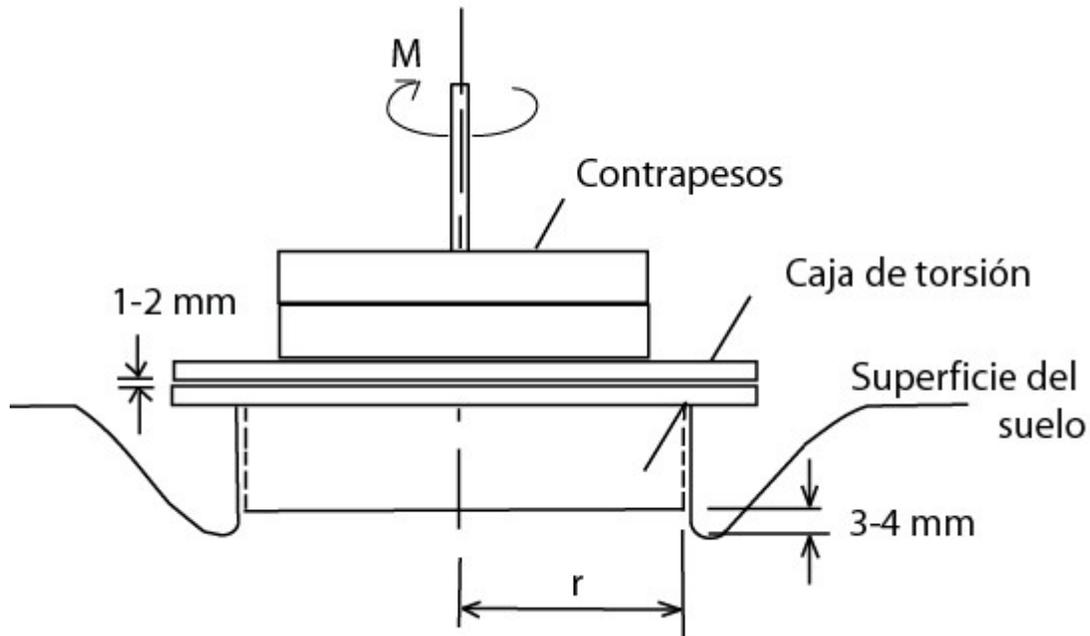


Figura 10: Caja de torsión

Una modificación de la metodología explicada anteriormente es la utilización de un anillo con aletas radiales a las cuales se le aplica un momento torsor para provocar el corte del suelo (Ver Figura 11a). Siendo r_1 y r_2 los radios interior y exterior del anillo, la tensión de corte que soporta el suelo es

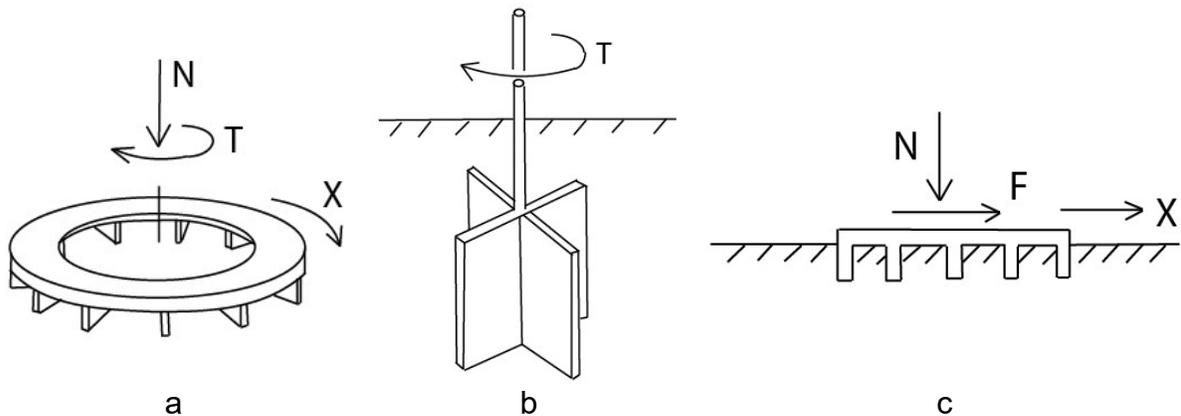
$$\tau = 3M/2\pi (r_2^3 - r_1^3)$$

Otro de los aparatos para registrar a campo el valor de resistencia al corte es el molinete torsor de paletas cuya operatoria es similar (Ver Figura 11b). Una vez introducidas las paletas en el suelo hasta la profundidad deseada, se aplica un momento torsor que las obliga a girar arrastrando el suelo, que debe deslizarse sobre la superficie cilíndrica que ellas definen. Se utiliza normalmente en suelos cohesivos y para estudios de suelo que necesiten alcanzar una mayor profundidad. En este caso siendo h la longitud de las aletas y r su diámetro

$$\tau = M/2\pi r^2 (h + 2/3 r)$$

Por último, puede utilizarse una placa de corte traslacional que consiste en una caja rectangular con garras que se hincan en el suelo (Ver Figura 11c). A dicha placa se le adicionan distintos pesos normales y se determinan las distintas fuerzas de corte necesarias para lograr el desplazamiento de la misma. Con los datos de tensiones normales y tangenciales se construye la recta de Coulomb obteniendo cohesión (c) y ángulo de rozamiento interno (φ). Es difícil de operar

pues puede requerir grandes esfuerzos horizontales, dependiendo del área y del peso vertical. La fuerza de corte es aplicada en una sola dirección (McKyes, 1985).



Figuras 11: a) anillo de aletas radiales b) molinete torsor de paletas c) placa de corte traslacional

Un método indirecto para la medición de la resistencia del suelo a campo es el penetrómetro de cono. Se obtiene un indicador relacionado a la resistencia pero la cuantificación de esta relación, no está exactamente definida. Cuando una varilla que culmina en una punta cónica es forzada a ser introducida en el suelo, varios efectos pueden ocurrir conjuntamente: corte, compresión, rozamiento suelo-suelo, rozamiento suelo-metal, deformación plástica. La combinación de estos procesos depende fundamentalmente de la forma y tipo de instrumento usado y de las condiciones del suelo estudiado. Las mediciones de resistencia a la penetración representan la fuerza de penetración a una cierta velocidad y profundidad del suelo en relación con la superficie de la base del cono. El parámetro determinado se denomina índice de cono (IC) y se expresa en unidades de presión (kPa). Observando los índices de cono en diferentes lugares y suelos pueden hacerse relaciones empíricas entre las magnitudes relativas de índice de cono y otras cualidades mecánicas del suelo como fuerzas de corte, traficabilidad del suelo, parámetros de movilidad de vehículos, crecimiento de raíces y plantas, etc. (McKyes, 1985, Hillel, 1998).

6.8.2 Métodos de laboratorio

6.8.2.1 Ensayo triaxial

En el ensayo triaxial una muestra de material usualmente de forma cilíndrica, es confinada por un fluido (generalmente agua) en una celda cerrada a presión. La presión en el fluido de la celda es provista externamente y es llamada σ_3 . Una membrana de caucho flexible rodea la muestra de suelo para evitar que ingrese el fluido en la celda y altere su constitución. Por un pistón movable en la superficie superior de la celda una fuerza F_1 es aplicada al cilindro del suelo. En el fondo de

la muestra es colocada una piedra porosa para permitir el drenaje de la muestra y la medición de las presiones hidrostáticas (Ver Figura 12).

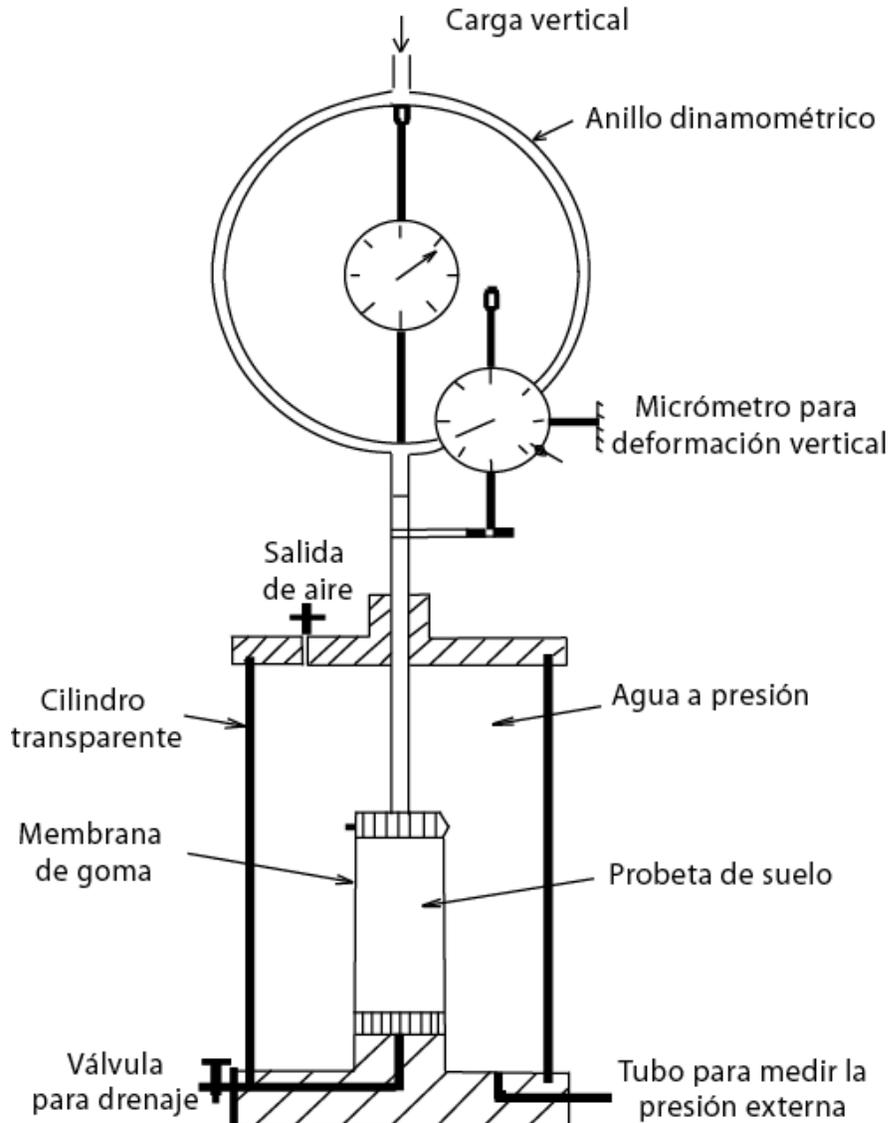


Figura 12: Equipo para ensayo triaxial

Este mecanismo brinda la mejor aproximación a un estado de tensiones uniformes actuando sobre un cuerpo de suelo en tres direcciones (triaxial) y da considerable flexibilidad en el control de estas tensiones, así como de los poros de agua dentro del suelo. Durante el ensayo de corte puede ser medida la deformación vertical de la muestra a través del movimiento del pistón y el cambio de volumen puede ser monitoreado en suelos saturados a través del tubo de drenaje de agua. En suelos insaturados es más difícil determinar el cambio de volumen, porque el aire dentro de la muestra puede comprimirse y cambiar el volumen de la muestra sin ser percibido a través del tubo de drenaje de agua. La fuerza vertical F_1 es incrementada hasta que se alcanza un valor máximo o hasta que el suelo falla con acompañamiento de grandes deformaciones verticales y

signos visibles y obvios de ruptura. Después de cada serie de ensayos a diferentes niveles de presión confinada de fluido en la celda, son determinadas las tensiones principales mayor y menor σ_1 y σ_3 para la condición de falla del suelo. Esta tensión de falla puede ser usada para construir un círculo de Mohr para cada uno de los ensayos. Los parámetros de resistencia c y ϕ son determinados por el trazado de la línea recta tangente al conjunto de círculos. Ver Figura 13 (McKyes, 1985).

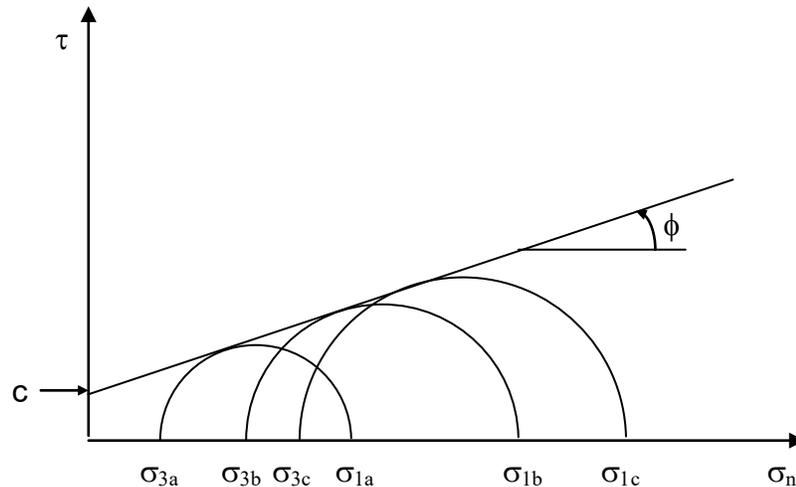


Figura 13: Determinación de los parámetros c y ϕ a partir de un conjunto de círculos de Mohr obtenidos en un ensayo triaxial

6.8.2.2 Caja de corte directo

La caja de corte es descrita por Black *et al.* (1965). La misma está compuesta de dos o tres anillas metálicas teniendo una apertura rectangular o circular. El suelo es ubicado en la apertura de la anilla y confinado verticalmente por una fuerza N . Una de las anillas es entonces movida horizontalmente con respecto a las otras por medio de una fuerza horizontal F . Se determina mediante una celda de carga el esfuerzo F y mediante sensores el desplazamiento horizontal y el desplazamiento vertical del plato confinante superior. La deformación vertical del suelo puede ser negativa (hacia abajo) o positiva (hacia arriba) dependiendo de la compresión previa que haya recibido el suelo y de la tensión normal en el momento del corte. La deformación positiva se presenta cuando el suelo se corta con tensiones normales bajas y ha recibido compresiones previas importantes y la negativa si estaba inicialmente flojo y se corta con altas tensiones normales. Luego de un determinado desplazamiento, cuando la deformación ocurre sin que sea necesario aumentar la fuerza de corte, se considera que se ha alcanzado la fuerza máxima de corte $F_{m\acute{a}x}$. El ensayo se repite a diferentes niveles de fuerza vertical N y se determinan distintas $F_{m\acute{a}x}$. Relacionando la $F_{m\acute{a}x}$ y N al área de la caja se obtienen respectivamente la tensión máxima de corte (τ_m) y la tensión normal (σ). Por regresión se ajustan los valores hasta alcanzar una recta y una vez construida, se determinan el ángulo de fricción interna del material (ϕ) el cual se corresponde con la pendiente de esta recta y la

cohesión del suelo (c) que es la ordenada al origen (McKyes, 1985). A este ensayo se lo suele denominar ensayo de corte directo a tensión constante a diferencia del ensayo de corte directo a volumen constante. En el ensayo a volumen constante, como su nombre lo indica, se restringe la posibilidad de compresión o expansión de la muestra durante el corte con lo cual el volumen permanece inalterado y se determinan las variaciones en la tensión normal de la misma. Si se corta la muestra a tensiones normales bajas, lo que conduciría a una expansión de la misma, se verifican aumentos de la tensión normal. Cuando la muestra es cortada a altas tensiones normales, que llevarían a una compresión, se advierten caídas en la tensión normal. Kirby (1994) detalla ambas metodologías.

7 HIPÓTESIS

7.1 Hipótesis básica

La degradación química de los suelos por salinización-sodificación influye en sus propiedades mecánicas de compresibilidad y resistencia al corte variando este efecto con las distintas tipologías de suelos.

7.2 Hipótesis de trabajo

Los suelos que no han sufrido procesos de degradación química, como la salinización y sodificación, son más compresibles.

Los suelos aumentan su resistencia al corte cuando son alterados químicamente mediante riego con aguas salino-sódicas.

La salinización y sodificación de los suelos provoca variaciones en sus parámetros de Mohr-Coulomb y en sus propiedades de estado crítico.

8 OBJETIVOS

8.1 General

Contribuir a la comprensión de la posible degradación física de los suelos sometidos a riegos con aguas salino-sódicas, para fundamentar la generación de soluciones, tendientes a evitar o minimizar dicha degradación.

8.2 Específicos

Desarrollar una metodología para la evaluación de la compresibilidad y resistencia al corte de suelos salinizados y sodificados con aguas de riego.

Cuantificar la incidencia de la irrigación con aguas de baja calidad en el deterioro de las propiedades mecánicas de compresibilidad y resistencia al corte de los suelos.

Analizar el comportamiento mecánico de los suelos regados con aguas de distinta calidad, en el marco de la teoría de Mohr-Coulomb y del estado crítico.

Interpretar el impacto agronómico en cuanto a laborabilidad y traficabilidad producido a causa del riego con aguas salino-sódicas.

9 MATERIALES Y MÉTODOS

9.1 Ubicación geográfica

Los ensayos fueron realizados en la localidad de Florencia, Italia. Se utilizaron las dependencias del *Dipartimento di Ingegneria Agraria e Forestale* (DIAF) de la *Facoltà di Agraria e Forestale* que forma parte de la *Università degli studi di Firenze*. Este lugar se encuentra ubicado a 43°46' de Latitud Norte y a 11°13' de Longitud Este. (Ver Figura 14).

9.2 Características de los suelos estudiados

9.2.1 Procedencia y características químicas

En los ensayos fueron empleados 4 tipos distintos de suelos, provenientes de tres regiones de Italia.

Serie Ozzano: Ozzano, Bolonia, Emilia-Romaña.

Serie Carpi: Carpi, Módena, Emilia-Romaña.

Serie Locorotondo Argese: Locorotondo, Bari, Apulia.

Serie Locorotondo Cardone: Locorotondo, Bari, Apulia.

Los lugares de donde fueron extraídos pueden ser vistos en la Figura 14.



Figura 14: Italia. Con los marcadores (🔩) se señalan los lugares de donde fueron extraídas las 4 series de suelos (Bari, Módena y Bolonia) y el lugar donde se efectuaron los ensayos (Florencia)

Las cuatro series de suelos utilizados pertenecen a dos tipos de materiales pedológicos no salinos, ricos en materiales arcillosos. Uno más rico en materiales esmectíticos, pobre en sesquióxidos de hierro y aluminio y no calcáreo (suelos de las series Carpi y Ozzano). El otro más caolinítico, calcáreo y rico en sesquióxidos

(suelos de las series Locorotondo Cardone y Locorotondo Argese). Sobre estos suelos fueron efectuados análisis preliminares antes de someterlos a los tratamientos.

Tabla 1: Composición y características químicas de los suelos evaluados

Análisis	Unidad de medida	Locorotondo Argese	Locorotondo Cardone	Carpí	Ozzano
Capacidad de Intercambio Catiónico	cmol _c kg ⁻¹	29,72	31,68	25,53	29,54
Na intercambiable como Na ⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,127	0,190	0,353	0,053
K intercambiable como K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	1,02	1,58	0,820	0,411
Ca intercambiable como Ca ⁺⁺	cmol _c kg ⁻¹	24,52	26,30	21,59	26,06
Mg intercambiable como Mg ⁺⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,93	1,36	2,35	2,94
Na/C.I.C.	%	0,427	0,60	1,38	0,179
Ca/C.I.C.	%	82,2	83,0	84,55	88,21
K/C.I.C.	%	3,48	5,0	3,20	1,39
Mg/C.I.C.	%	3,13	4,3	9,18	9,96
N - total	g/kg	1,06	1,8	1,76	0,739
Materia orgánica	g/kg	16,34	33,90	29,48	15,93
P - total	g/kg	0,594	0,882	0,925	0,611
pH (1:5) (suelo : agua)		7,2	7,1	6,8	7,3
Calcáreo total (Carbonatos)	g/100g	0,96	0,5	11,68	3,9
CE _{25°C}	mS/cm	0,141	0,30	0,364	0,03
Ca - total	g/kg	8,90	12,04	45,16	25,85
Na -total	g/kg	3,86	3,74	6,81	7,11
K - total	g/kg	19,11	19,33	21,39	12,34
Mg - total	g/kg	6,71	6,85	13,70	7,23
Fe - orgánico	g/kg	0,677	0,736	1,00	0,406
Fe - Óxidos libres	g/kg	0,137	0,147	0,619	0,270
Al - orgánico	g/kg	0,497	0,458	0,154	0,228
Al - Óxidos libres	g/kg	0,300	0,344	0,156	0,107

9.2.2 Minerales de las arcillas

Las tipologías de arcillas encontradas en cada serie de suelo son:

Argese: illita, caolinita

Cardone: illita, caolinita

Carpi: illita, vermiculita, clorita, caolinita
 Ozzano: vermiculita, illita, esmectita, caolinita

9.2.3 Taxonomía de los suelos

De acuerdo a la clasificación taxonómica elaborada por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) (Soil Survey Staff, 2003), la taxonomía de los suelos corresponde a la citada en la Tabla 2

Tabla 2: Clasificación taxonómica de los suelos a nivel de gran grupo

Suelo	Taxonomía
Argese	Haploxeralf
Cardone	Haploxeralf
Carpi	Ustochrepts
Ozzano	Ustochrepts

9.2.4 Textura de los suelos

Se detallan los porcentajes de las tres fracciones minerales (arena, limo y arcilla) de los 4 suelos. Se especifican los porcentajes de acuerdo a dos de las clasificaciones texturales más utilizadas: la del USDA y la de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS) (Thompson y Troeh, 1982).

Tabla 3: Clasificación de las fracciones minerales del suelo de acuerdo a USDA e ISSS.

Clase granular	USDA	ISSS
Arena total	2 – 0,05 mm	2 – 0,02 mm
Limo	0,05 – 0,002 mm	0,02 – 0,002 mm
Arcilla	< 0,002 mm	< 0,002 mm

Tabla 4: Fracciones granulométricas presentes en los 4 suelos de acuerdo a las clasificaciones de ISSS y USDA

Clase granular	Textura ISSS			
	Argese	Cardone	Carpi	Ozzano
Arena total %	19,19	20,94	10,43	30,27
Limo %	42,15	44,00	46,44	33,10
Arcilla %	38,66	35,06	43,13	36,63
Clase granular	Textura USDA			
	Argese	Cardone	Carpi	Ozzano
Arena total %	6,38	8,46	3,06	13,69
Limo %	54,96	56,48	53,84	47,68
Arcilla %	38,66	35,06	43,13	36,63
Textura	Franco arcillo limoso (fr-a-L)	Franco arcillo limoso (fr-a-L)	Arcillo limoso (a-L)	Arcillo limoso (a-L)

9.3 Procedimiento utilizado en la salinización y sodificación de los suelos

Se trataron los suelos con 2 soluciones, obtenidas disolviendo en agua destilada NaCl y CaCl₂, resultando en dos concentraciones salinas y dos índices de sodicidad. Dichas soluciones se corresponderían con las categorías C1S1 y C4S4 de la clasificación de aptitud de agua para riego realizada por el laboratorio de Riverside (Richards, 1956).

Tabla 5: Salinidad y sodicidad de las soluciones empleadas en los tratamientos

	Salinidad (moles/litro)	Sodicidad (RAS)
Solución 1 (no salino-sódica)	0,001	5
Solución 2 (salino-sódica)	0,1	45

Tabla 6: Composición iónica de las soluciones empleadas

Salinidad	RAS	Na	Ca	NaCl	CaCl ₂	Salinidad
mmol / L		mg / L				‰
1	5	22,14	1,49	56,27	4,12	0,060
100	45	2195,6	180,49	5581,1	499,96	6,081

Se sumergieron 15 kg de cada suelo en piletas preparadas con cada una de las 2 soluciones, mezclando y dejando en contacto por 24 horas. *A posteriori*, el líquido sobrenadante fue decantado y reemplazado con otra porción de la misma solución. La operación fue repetida tres veces con la solución 1-5 y 3 y 5 veces con la 100-45 totalizando tres tratamientos.

Tabla 7: Tratamientos y nomenclatura utilizados en el ensayo

Solución	Nº de baños	Tratamiento
1	3	1-5 (3)
2	3	100-45 (3)
2	5	100-45 (5)

A continuación el suelo fue dejado drenar en estratos de cerca de 5 cm sobre tela apoyada en arena. Finalizados los tratamientos se realizó la determinación de pH, conductividad eléctrica del extracto saturado, sodio, calcio y magnesio intercambiables, y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Tabla 8: PSI y pH de los suelos luego de los tratamientos

Tratamiento	Suelos							
	Argese		Cardone		Carpi		Ozzano	
	PSI	pH	PSI	pH	PSI	pH	PSI	pH
1-5 (3)	0,87	7,78	0,96	7,89	1,43	7,84	0,53	7,89
100-45 (3)	4,94	7,78	4,83	7,8	4,47	7,93	5,21	8,09
100-45 (5)	20,91	8,35	18,41	8,61	19,66	8,30	14,33	8,30
Testigo	0,43	7,2	0,6	7,1	1,38	6,8	0,18	7,3

Tabla 9: Conductividad eléctrica (dS . m⁻¹) de los suelos luego de los tratamientos

Tratamiento	Suelos			
	Argese	Cardone	Carpi	Ozzano
1-5 (3)	0,138	0,165	0,261	0,142
100-45 (3)	1,023	0,918	1,08	0,982
100-45 (5)	1,185	1,098	1,52	1,12
Testigo	0,141	0,3	0,364	0,03

El tratamiento Testigo estuvo representado por muestras de cada uno de los suelos evaluados, extraídas y procesadas en términos generales, de la misma manera que las usadas para la aplicación de las soluciones descriptas, pero sin la aplicación de dichas soluciones.

9.4 Evaluación de las propiedades mecánicas

La compresibilidad y la resistencia al corte fueron las propiedades mecánicas estudiadas en este trabajo de Tesis sobre el supuesto de que las propiedades químicas del agua de riego, tienen relación con la evolución de estos parámetros en el tiempo.

Para llevar adelante los ensayos se desarrolló una metodología de evaluación de la compresibilidad y resistencia al corte de los suelos a partir de la construcción de una caja de corte directo que cumplió funciones de celda de compresión uniaxial y caja de corte. Dicha metodología se basa en el corte directo a tensión normal constante y ha sido descripta por Kirby (1994). Asimismo debió ajustarse una metodología de preparación previa de los suelos a ser ensayados. Dicha preparación constó de molido, tamizado y humedecimiento del suelo.

El diseño y construcción de la caja de corte y la metodología de preparación previa de los suelos ha sido uno de los objetivos que se persiguieron en este trabajo de Tesis por lo que representa al mismo tiempo un método y un resultado de la revisión bibliográfica y las pruebas preliminares efectuadas. Debido a esto se consideró apropiado abordar la descripción metodológica en la Sección 10 de Resultados.

9.5 Procesamiento y análisis estadístico de los datos

Luego de cada registro, cada dato fue trasladado del colector Gould TA 11 al ordenador portátil por medio de un programa propio del registrador. Los archivos registrados fueron transformados a formato ASCII para poder ser luego procesados con un programa de planilla de cálculo.

Con los datos de altura de la muestra durante la compresión y el corte, se calculó la densidad aparente de la misma de acuerdo a la ecuación:

$$\delta_{ap} = m / V$$

donde δ_{ap} = densidad aparente (g/cm^3), m = masa seca (g) y V = volumen (cm^3) siendo la masa seca determinada por secado de la muestra (luego de ser comprimida y cortada) en estufa a 104° durante 24 horas y el volumen de la muestra determinado en función del área de la base ($\pi \cdot \text{radio}^2 = \pi \cdot 31,75^2 \text{ mm}^2 = 3166,92 \text{ mm}^2 = 31,67 \text{ cm}^2$) y de la altura (registrada con el sensor de desplazamiento vertical) de la misma.

Los análisis estadísticos de los resultados consistieron en análisis de la varianza tomando como variables dependientes los factores Densidad Aparente, Tensión Cortante, Desplazamiento y Humedad y como variable independiente el factor Tratamiento. Se realizaron 5 repeticiones.

La comparación de las medias fue realizada a través de una comparación múltiple de Diferencias Mínimas Significativas (DSM) con un nivel de significancia del 5%.

La relación entre las variables τ y σ , Volumen Másico y Tensión Normal, Relación de Volumen y Relación de Tensión y su grado de ajuste fueron evaluados a través de una regresión simple lineal. Se realizó una comparación estadística de los parámetros de las regresiones. (Sokal y Rohlf, 1995).

Para realizar el procesamiento de los datos y las gráficas fue utilizado el programa Excel. Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa Statgraphics Plus 4.0.

10 RESULTADOS

10.1 Descripción de la metodología para la compresión y corte directo de suelos y pruebas preliminares de puesta a punto

En este capítulo se describe la metodología utilizada para llevar adelante las pruebas de compresión y corte de los suelos. Dicha metodología constituye un resultado en sí mismo debido a la ausencia de un método estandarizado previo. Para decidir la metodología de preparación de las muestras debieron efectuarse ensayos preliminares cuyos resultados se encuentran detallados en la Sección 10.1.2 con el objetivo de hacer un análisis más ordenado de los mismos. No obstante que las pruebas preliminares hayan permitido delinear la metodología a emplear, ésta es explicada en primer lugar para una mejor comprensión del texto.

10.1.1 Metodología empleada en las pruebas

10.1.1.1 Descripción de la caja de corte y de los sensores

Los suelos fueron primero sometidos a compresión uniaxial y posteriormente a corte utilizando una caja de corte directo con las medidas indicadas en las Figuras 15 y 16.

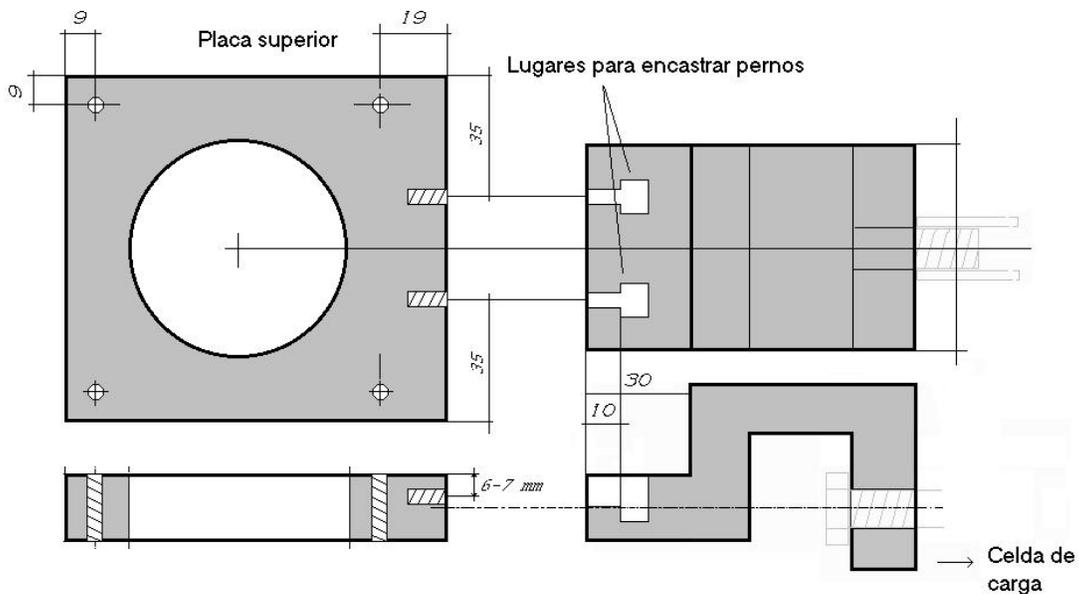


Figura 15: Sección en planta de la caja de corte (arriba) y vertical (abajo)

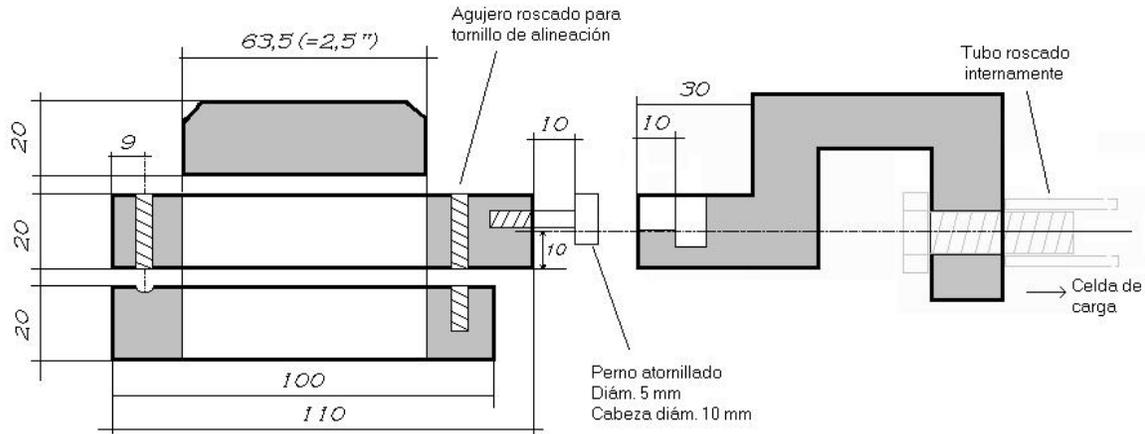


Figura 16: Sección vertical de la caja de corte

La caja de corte se realizó en aluminio y constó de dos placas con un diámetro interno de 63,5mm (2,5"). En el interior de dicha caja se colocaron muestras de tierra que fueron primero comprimidas por una carga vertical y más tarde cortadas. La carga vertical fue aplicada por medio de un tornillo unido al brazo de una palanca con un factor multiplicativo de 5 (Fotos 1 a 3).

En el momento del corte la placa inferior se desplazó sobre cojinetes empujada por un eje que a su vez recibió el movimiento circular de un motor paso a paso y lo convirtió en movimiento lineal (entre eje y motor existió un reductor) (Fotos 4 a 7). La placa superior de la caja de corte se encontró fija y unida a una celda de carga que midió la fuerza que realizaba el suelo sobre la misma a causa del desplazamiento de la placa inferior (Foto 8). La caja de corte constó de dos tornillos que permitieron separar las dos placas unas décimas de mm para evitar el rozamiento entre las mismas durante el desplazamiento. Con el fin de asegurar la perfecta alineación de ambas placas, antes de la colocación de cada muestra, se colocaron dos tornillos que unieron solidariamente estas placas y que se quitaron en el momento del corte.

La caja de corte estuvo equipada con tres sensores que registraron esfuerzo y desplazamientos (Fotos 10 a 16):

1. sensor de desplazamiento vertical, que aplicado sobre la parte superior del tornillo de la palanca de compresión, midió el desplazamiento vertical de la muestra durante la compresión y durante el corte.
2. sensor de desplazamiento horizontal, que apoyado en la placa inferior de la caja de corte, midió el desplazamiento horizontal de la misma durante el corte.
3. celda de carga, que aplicada a la placa superior de la caja de corte, midió el esfuerzo de corte mientras se realizaba el desplazamiento horizontal.

La calibración de cada uno de los sensores se realizó de modo diverso. El sensor de desplazamiento vertical fue calibrado por medio de un espesímetro, instrumento que consta de láminas metálicas de espesor diverso (Foto 17). Colocando medidas proporcionales (0,25; 0,50; 0,75; 1; 1,25 y 1,5 mm se verificó la proporcionalidad de su señal tanto gráficamente como en voltaje, mediante un voltímetro. El sensor de desplazamiento horizontal fue tarado haciendo avanzar la máquina en vacío, midiendo el desplazamiento con un reloj comparador de 0,01 mm de precisión y verificando la señal gráfica y de voltaje (Foto 18). La celda de carga fue tarada colocándola verticalmente y agregándole en pasos sucesivos pesos discretos (5; 10; 20; 40 kg), corroborando la proporcionalidad de los pesos aplicados y los voltajes obtenidos.

10.1.1.2 Metodología para la preparación de los suelos para la compresión y el corte

10.1.1.2.1 Molido y tamizado

Los suelos fueron molidos con un molino específico para suelos, con el fin de disgregar los grandes terrones (Fotos 20 y 21). Las pequeñas partículas resultantes fueron tamizadas por malla de 2 mm (Foto 19).

10.1.1.2.2 Humedecimiento

El material resultante fue sometido a humedecimiento mediante un atomizador manual. El humedecimiento se realizó con agua destilada con el fin de no afectar la salinidad y sodicidad de las muestras. Para lograr una humectación homogénea en todo el material, se probaron diferentes metodologías. Se comprobó que no es recomendable humedecer removiendo el material y luego dejarlo reposar 24 horas en una atmósfera hermética pues no se logra una correcta homogeneización y se obtienen grandes agregados con elevada humedad y material sin agregar con baja humedad, situación que con el tiempo no se revierte sustancialmente. Algo semejante ocurre al realizar el humedecimiento en dos etapas. La forma adecuada de lograr una humedad homogénea consistió en intercalar capas de suelo y agua sin realizar remoción hasta no cumplidas 24 horas de homogeneización. En este trabajo se realizó el humedecimiento por estratos utilizando 3 capas de suelo y 4 de agua. El suelo fue humedecido hasta alcanzar un 23% de humedad. El porcentaje de humedad fue establecido empíricamente, en función de la máxima humedad a la que los suelos, al ser comprimidos a 600 kPa, no drenaron agua y en consecuencia no existió un efecto de consolidación (Ver Sección 10.1.2.6). En una muestra saturada la tensión comienza a ser soportada por el agua y no por la propia estructura.

10.1.1.2.3 Formación de las muestras

Para formar las probetas se cortó un caño de PVC del mismo diámetro interno que la caja de corte, con una altura de 8 cm. El diámetro interno de estos

cilindros de PVC fue retocado con un torno de manera de conseguir un diámetro perfectamente circular.

En cada uno de estos cilindros se realizó una muestra con suelo que se empleó en una única prueba de corte. En la base inferior del cilindro se colocó una placa metálica con ranuras (placa de compresión inferior) que cumplió la función de adherirse al suelo en el momento del desplazamiento de la caja de corte. Sobre esta placa se colocó un círculo de papel de filtro que impidió la contaminación de la placa metálica con restos de suelo. A continuación se colocaron 115g de tierra humedecida, para lograr, luego de la compresión, una muestra de aproximadamente 2 cm de altura final. La cantidad de tierra necesaria fue estimada por aproximaciones sucesivas para la presión a desarrollar. La presión de compresión final a desarrollar fue de 600 kPa. Luego de colocar la tierra de manera uniforme en el cilindro se procedió a aplicarle una presión mínima de 50 kPa por 1 minuto mediante un cilindro plástico del mismo diámetro que el de la caja de corte, sobre el que se apoyó el peso para llegar a dicha presión. Dicha presión mínima tuvo como objetivo comenzar cada prueba con una muestra homogénea en cuanto a la presión recibida previamente. Posteriormente, se extrajo el cilindro plástico, se colocó otro círculo de papel de filtro y sobre él una placa metálica (placa de compresión superior) similar a la inferior, solo que un poco más alta y con una pequeña concavidad que sirvió para aplicar la presión de compresión, apoyando en ella el tornillo de la palanca (Fotos 22 a 31).

10.1.1.2.4 Colocación de la muestra en la caja de corte

Luego de formada la muestra, se ejerció una ligera presión en la placa de compresión superior para favorecer la salida de parte de la placa de compresión inferior por el otro extremo del tubo de PVC y de esta manera poder enfilear el conjunto “placa inferior + papel de filtro inferior + suelo + papel de filtro superior + placa de compresión superior” en la caja de corte. Las dos mitades de la caja de corte debieron estar perfectamente alineadas antes de enfilear la muestra, lo cual se logró ajustando los tornillos de alineación. Luego de enfileada la placa de compresión inferior sobre la prolongación de PVC de la caja de corte, se procedió a finalizar la introducción de la muestra mediante una pequeña presión realizada sobre la placa de compresión superior (Fotos 32 a 34).

10.1.1.3 Compresión y corte de las muestras. Registro de los datos

10.1.1.3.1 Compresión

Una vez dentro de la caja de corte se procedió a comprimir la muestra a la tensión de preconsolidación preestablecida de 600 kPa a partir de las pruebas preliminares (Ver Sección 10.1.2.6). Para lo mismo se utilizó el tornillo que se ajustó a la placa de compresión superior y en el extremo de la palanca se aplicó el peso necesario para alcanzar la presión requerida. El brazo de palanca fue de 5 por lo que se necesitó agregar 1/5 del peso necesario para llegar a dicha presión. Los pesos fueron agregados manualmente. El peso total a colocar en el extremo

de la palanca para alcanzar los 600kPa 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 603 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 cedimiento de la muestra (Fotos 35 a 39).

10.1.1.3.2 Estabilización de la muestra

Una vez aplicada la compresión de 600 kPa se extrajo la muestra de la caja de corte y se la dejó 24 horas en reposo para permitir el reacomodamiento de las partículas y su estabilización (Ver Sección 10.1.2.6 y 10.1.2.7) Asimismo, se permitió que las muestras perdiesen un 3 % de humedad dejándolas al aire libre. Así, pasaron del 23 al 20% de humedad, a la que fueron cortadas. Para controlar que las muestras hubiesen llegado al 20 %, se pesaron con una balanza (precisión de 0,1 g) cuando poseían 23% de humedad y se calculó cual debía ser el peso al que debían llegar para tener un 20 % de humedad. No se permitieron mayores pérdidas de humedad para evitar el cambio de sección de la muestra ante la retracción provocada durante el secado y por la fragilidad que adquirirían las muestras a menor humedad (Ver Sección 10.1.2.5. y 10.1.2.7). Alcanzado dicho peso fueron envueltas en polietileno impermeable para evitar nuevas pérdidas de humedad hasta el momento del corte. El objetivo de esta desecación parcial fue lograr un efecto de cementación de las partículas de acuerdo a lo expuesto por Hettiaratchi (1987). En pruebas realizadas preliminarmente se percibió el marcado efecto de la desecación parcial de las muestras en la diferenciación del comportamiento de los distintos tratamientos (Ver Sección 10.1.2.6).

10.1.1.3.3 Corte

Una vez estabilizada la muestra se colocó dentro del cilindro de PVC para enfilarla nuevamente dentro de la caja de corte sin que sufra alteraciones. Se colocaron a continuación pesos hasta alcanzar un 10, 40 u 80% de los 600 kPa a que la muestra había sido comprimida previamente. Se colocaron así, en el extremo de la palanca 4, 16 ó 31 kg para obtener tensiones normales de 62, 247 ó 480 kPa respectivamente. De esta manera, la muestra fue sometida a una relación de tensión (relación entre la tensión normal a la que la muestra fue cortada y la tensión normal máxima experimentada previamente por la misma). Se consideró suficiente una serie de tres relaciones de tensión a los efectos posteriores de calcular la posición de las rectas de Coulomb y la línea de estado crítico. A continuación se puso en marcha el motor para generar el desplazamiento horizontal y simultáneamente se inició el registro de los datos. La velocidad de avance de la mitad inferior de la caja de corte fue de 3,2 mm por minuto. El desplazamiento total alcanzado fue de 11mm y el tiempo empleado para el mismo de 205 segundos. Una vez finalizado el desplazamiento requerido se procedió a finalizar el registro y a detener el motor. Se extrajo la celda de corte completa y luego la tierra de la misma. Se determinó la humedad efectiva en el momento del corte a través de la determinación de peso seco a 104°. (Fotos 40 a 44). Se

realizaron 5 repeticiones de cada tratamiento y cada relación de tensión lo que totalizó 180 pruebas (5 repeticiones x 3 relaciones de tensión x 3 tratamientos x 4 suelos).

10.1.1.3.4 Registro y almacenamiento de los datos

Se utilizó el colector de datos Gould TA11 que permitió registrar las 3 variables simultáneamente (desplazamiento vertical, horizontal y esfuerzo de corte). Dicho instrumento además de permitir imprimir en un papel graduado la señal de salida de los 3 sensores, posibilitó almacenar los datos de voltaje, los que luego de cada registro fueron transferidos a un ordenador portátil (Foto 45).

De cada ensayo de compresión se registró la altura sin muestra (altura cero), la altura inicial de la muestra y la variación de la altura con la compresión.

En cada ensayo de corte fue registrada la altura cero o altura sin muestra, la altura inicial de la muestra con la presión a la que iba a ser cortada (62, 247 ó 480 kPa), y durante la prueba de corte propiamente dicha fue registrado el desplazamiento vertical (expansión o contracción de la muestra), el desplazamiento horizontal y el esfuerzo de corte.



Foto 1: Caja de corte. Celdas superior e inferior y tornillo de carga vertical

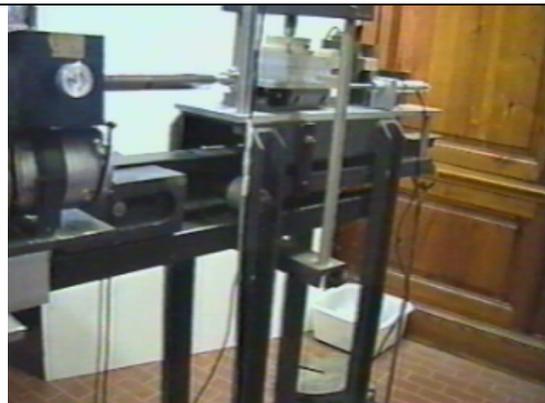


Foto 2: Aspecto general de la máquina



Foto 3: Brazo de palanca



Foto 4: Motor, reductor y convertidor



Foto 5: Motor, reductor y convertidor

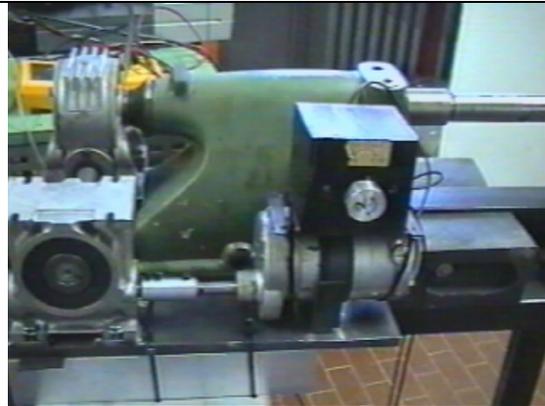


Foto 6: Motor, reductor y convertidor



Foto 7: Reductor y convertidor

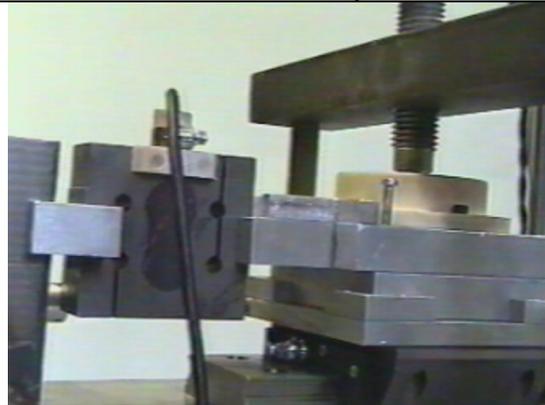


Foto 8: Placa superior unida a celda de carga

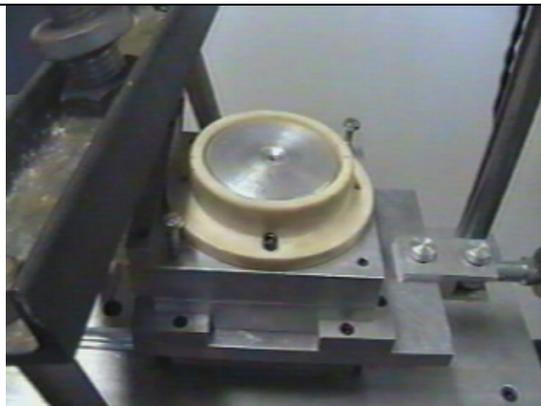


Foto 9: Prolongación de placa superior y tornillos de alineación



Foto 10: Sensores

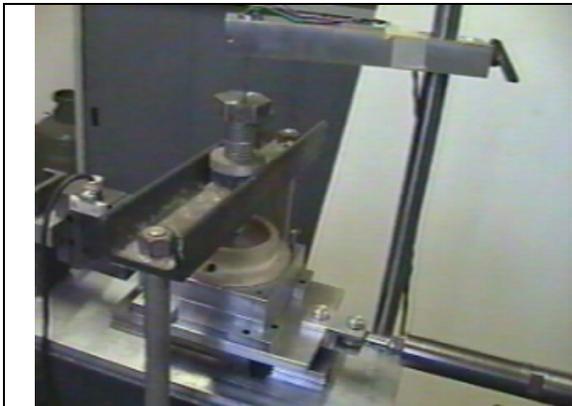


Foto 11: Sensor de desplazamiento vertical

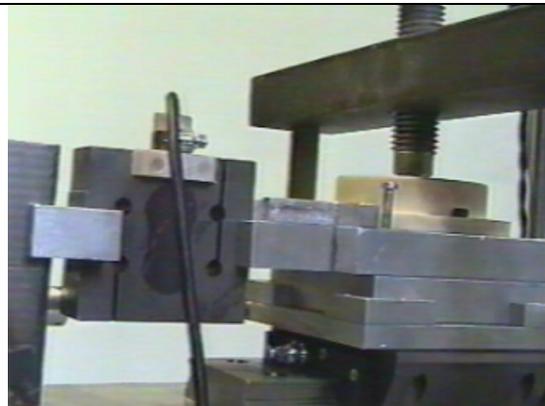


Foto 12: Celda de carga



Foto 13: Celda de carga y sensor vertical



Foto 14: Sensor de desplazamiento horizontal



Foto 15: Celda de carga y sensor horizontal



Foto 16: Los tres sensores



Foto 17: Espesímetro



Foto 18: Voltímetro



Foto 19: Tamiz con malla de 2 mm



Foto 20: Molino de suelos. Perfil



Foto 21: Molino de suelos. Planta

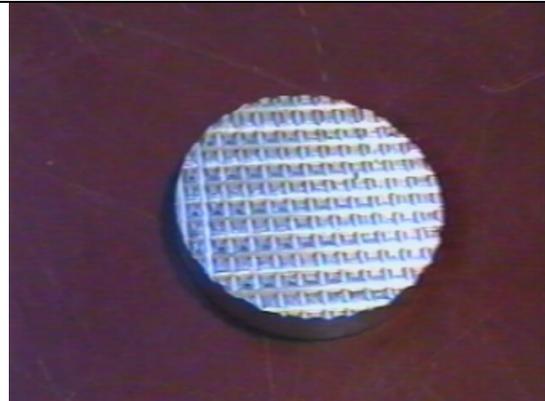


Foto 22: Formación de probetas. Placa metálica inferior ranurada



Foto 23: Cilindro de PVC con placa inferior



Foto 24: Circulo de papel de filtro inferior



Foto 25: Agregado de suelo



Foto 26: Cilindro plástico



Foto 27: Aplicación de la tensión normal inicial de 50 kPa



Foto 28: Suelo comprimido



Foto 29: Papel de filtro superior



Foto 30: Placa superior



Foto 31: Probeta terminada



Foto 32: Salida de parte de placa inferior



Foto 33: Introducción de probeta en la caja de corte



Foto 34: Probeta introducida totalmente



Foto 35: Ajuste del tornillo compresor a placa superior



Foto 36: Probeta lista para ser comprimida



Foto 37: Pesas utilizadas para la compresión



Foto 38: Extremo de la palanca para colocar los pesos



Foto 39: Probeta comprimiéndose

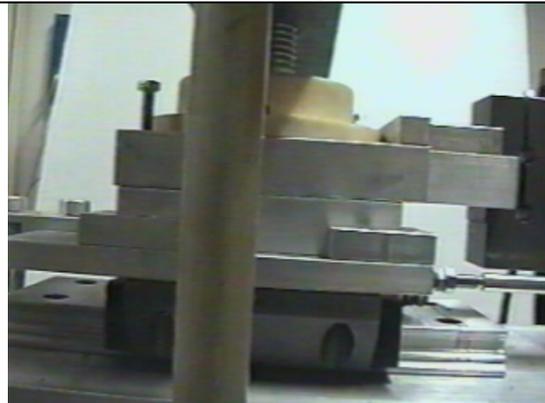
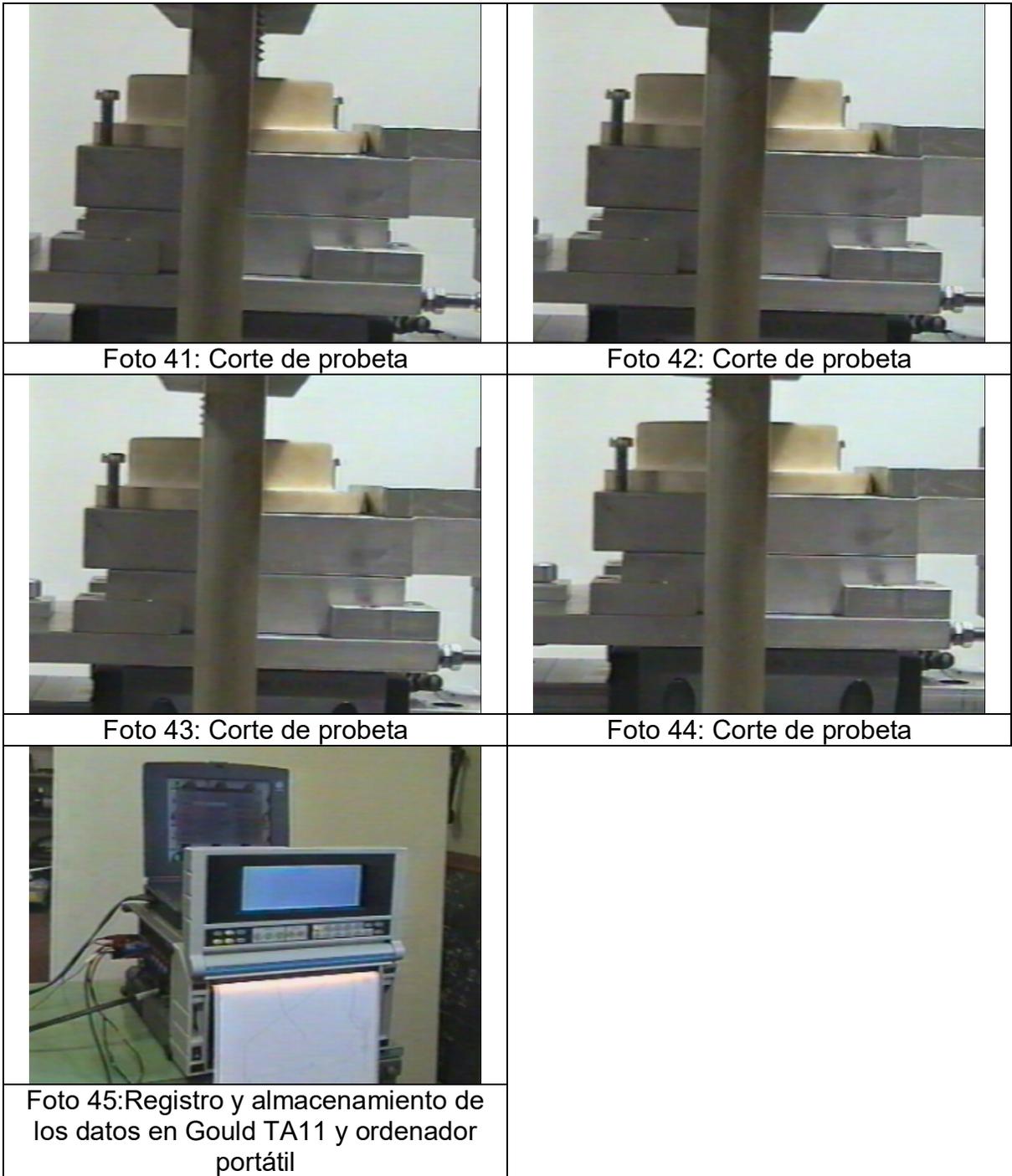


Foto 40: Corte de probeta



10.1.2 Pruebas preliminares

Las pruebas preliminares realizadas tuvieron como objetivo evaluar diversas situaciones de preparación de las muestras que permitiesen visualizar los cambios en la respuesta mecánica (a la compresión y al corte) de los suelos sometidos a los distintos tratamientos. De esta manera se pudo ajustar la metodología para las pruebas definitivas. Las principales variables cotejadas

fueron contenido de humedad durante la compresión y corte, tensión de compresión máxima aplicada (400, 600 y 800 kPa) y relación de tensión (relación entre la tensión normal durante la compresión y durante el corte) de 10, 20, 40, 80 y 100%.

10.1.2.1. Pruebas a 400 kPa y 10% de relación de tensión

Se utilizaron 3 suelos: Carpi, Ozzano y Cardone y se realizó el corte a tres humedades: 10, 20 y 25% en peso. El material fue humedecido a 20 y 25% y luego de un día de homogeneización en atmósfera cerrada se realizó la compresión a dichas humedades. Luego de la compresión se dejaron las muestras un día en reposo para que se estabilizara la humedad. De las muestras comprimidas a 20% de humedad se dejaron algunas al aire libre para que se secaran hasta llegar al 10% de humedad y posteriormente se las dejó un día en atmósfera cerrada para que se homogeneizara la humedad de la parte externa con la interna. Luego de este proceso, las muestras fueron nuevamente colocadas en la celda de corte, se aplicó el 10% del peso normal de la compresión y fueron cortadas. Parte de las muestras humedecidas a 20% no fueron dejadas un día en atmósfera cerrada sino que fueron cortadas inmediatamente después de la compresión.

Tabla 10: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas a 400 kPa y 10% de relación de tensión.

Suelo	Tratamiento	Humedad (%)	Tipo de prueba	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
Cardone	1-5 (3)	25	25% H	96,01a	0,791a
Cardone	100-45 (3)	25	25% H	107,78a	1,077a
Cardone	1-5 (3)	20	24 horas	93,03a	0,621a
Cardone	100-45 (3)	20	24 horas	70,52a	1,032a
Cardone	1-5 (3)	10	Secado	141,94a	0,785a
Cardone	100-45 (3)	10	Secado	111,36a	1,023a
Cardone	1-5 (3)	20	Inmediato	73,79a	1,529a
Cardone	100-45 (3)	20	Inmediato	73,24a	1,215a
Carpi	1-5 (3)	10	Secado	214,67a	1,441a
Carpi	100-45 (3)	10	Secado	242,57a	1,390a
Carpi	Testigo	10	Secado	234,66a	1,333a
Carpi	1-5 (3)	20	Inmediato	103,63a	1,596a
Carpi	Testigo	20	Inmediato	103,61a	2,120a
Ozzano	1-5 (3)	25	25% H	63,67a	0,349a
Ozzano	100-45 (3)	25	25% H	93,02b	0,473a
Ozzano	Testigo	25	25% H	75,58ab	0,280a
Ozzano	1-5 (3)	20	24 horas	119,72a	0,891a
Ozzano	100-45 (3)	20	24 horas	127,32a	1,257a
Ozzano	Testigo	20	24 horas	119,57a	1,035a

Ozzano	1-5 (3)	10	Secado	399,84a	1,537a
Ozzano	100-45 (3)	10	Secado	383,14a	1,585a
Ozzano	Testigo	10	Secado	438,47a	1,429a
Ozzano	1-5 (3)	20	Inmediato	114,66a	2,043a
Ozzano	100-45 (3)	20	Inmediato	119,86a	2,223a
Ozzano	Testigo	20	Inmediato	118,81a	2,224a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

Sólo se hallaron diferencias en la tensión cortante de Ozzano al 25 % de humedad. Esta marcada ausencia de diferencias entre tratamientos determinó que se llevaran adelante diversas pruebas de preparación previa que resaltasen las diferencias entre los tratamientos (Ver Sección 10.1.2.2) y pruebas de estabilidad de agregados en agua para determinar las causas de la ausencia de diferencias (Ver Sección 10.1.2.3).

10.1.2.2. Pruebas de saturación y congelamiento

Este tipo de pruebas se llevaron a cabo para visualizar el efecto de los procesos de congelación-descongelación y humedecimiento-secado sobre la resistencia al corte del suelo. Se realizaron 12 muestras con el tratamiento testigo de Carpi, comprimiéndolas a 400 kPa con un 20% de humedad. Tres muestras fueron cerradas herméticamente, tres fueron humedecidas hasta un 40% de humedad y también cerradas herméticamente, tres fueron congeladas colocándolas en un freezer por 24 horas y tres fueron llevadas a un 40% de humedad y luego colocadas en el freezer durante 24 horas. Aquellas que habían sido llevadas a un 40% de humedad fueron nuevamente secadas hasta alcanzar un 20%. Finalmente las 12 muestras fueron cortadas a la misma humedad pero habiendo sufrido distintos procesos de humedecimiento-secado y congelación descongelación.

Tabla 11: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de saturación y congelamiento.

Tratamiento	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
Humedecido (20%)	102,56b	1,109b
Congelado	86,15a	1,146b
Bañado (40%)	109,43b	0,764ab
Bañado y Congelado	94,22b	0,703a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

El tratamiento de congelado evidenció una menor tensión cortante pero la complejidad de estos tratamientos así como el tiempo demandado para hallar las

humedades de equilibrio (del 20%) determinaron el abandono de este tipo de metodología.

10.1.2.3. Pruebas de estabilidad de agregados en agua

Luego de realizar las primeras pruebas de corte y al no evidenciar diferencias claras de comportamiento en cuanto al esfuerzo de corte y a la expansión o compresión de las muestras cortadas, fueron realizadas pruebas de estabilidad de agregados con todos los suelos y tratamientos. Para tal efecto se seleccionaron tres o cuatro agregados de cada tratamiento, se sumergieron en una caja de Petri con agua destilada y fueron observados luego de 24 horas. Los resultados demostraron que no existían diferencias en la estabilidad de los agregados de los tratamientos 100-45 (3) en comparación con los de bajos valores de salinidad y sodicidad (1-5 (3) y Testigo). El *Dipartimento di Agronomia di Bologna* (que fue la institución encargada de la preparación de las muestras), verificó que la salinización y sodificación artificial por medio de soluciones de diversa concentración no había resultado efectiva y esto pudo explicar el resultado negativo de las experiencias hasta el momento. El *Dipartimento di Agronomia di Bologna* suministró entonces el tratamiento 100-45 (5) de todos los suelos. Esta vez el material había sido sumergido en la solución salina-sódica 5 veces seguidas por ciclos de secado completo. Con estos nuevos tratamientos 100-45 (5) de todos los suelos se determinó la estabilidad de los agregados por la prueba de inmersión en las cajas de Petri. Esta vez la dispersión de las arcillas a causa del sodio fue evidente. A partir de entonces se trabajó con estos nuevos tratamientos comparándolos con los de baja salinidad y con los testigos.

10.1.2.4. Pruebas a 800 kPa

Utilizando material humedecido al 20% se realizó la compresión de muestras de los suelos Carpi y Ozzano a 800 kPa para luego de un intervalo de 24 horas de estabilización cortarlas al 40% de relación de tensión.

Tabla 12: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas a 800kPa.

Suelo	Tratamiento	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
Carpi	100-45 (5)	303,38a	-0,316a
Carpi	Testigo	314,42a	-0,212a
Ozzano	100-45 (5)	241,23a	-0,280a
Ozzano	Testigo	267,90a	-0,350a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

No se hallaron diferencias en tensión cortante del tratamiento de máxima salinidad-sodicidad con el Testigo aunque se había hipotetizado que allí deberían

estar las mayores diferencias. Los testigos se continuaron evaluando en 10.1.2.5 y 10.1.2.8.

10.1.2.5. Pruebas de inmersión y secado

Con el objetivo de crear una condición apropiada para la dispersión del sodio se bañó el suelo en agua destilada y se lo secó posteriormente en estufa a 50°. Para tal fin fueron preparados cilindros de latón del mismo diámetro interno que el de la caja de corte dentro de los cuales se colocó una placa metálica inferior y la tierra para luego completarlo con agua dejando una capa superficial de la misma por 24 horas. Los cilindros metálicos fueron a continuación colocados en estufa a 50° por un tiempo suficiente como para llegar a la humedad deseada de compresión. Posteriormente algunas muestras fueron dejadas secar más y otras fueron cerradas herméticamente. Una vez que las primeras alcanzaron la humedad de corte también fueron cerradas herméticamente para la estabilización de la humedad. La compresión se realizó a 600 kPa y el corte a un 20 y 40% de esta tensión.

Tabla 13: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de inmersión y secado.

Suelo	Tratamiento	R.T. (%)	Humedad comp/cort (%)	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
Carpi	100-45 (5)	40	15/15	240,92a	-0,328a
Carpi	Testigo	40	15/15	232,42a	-0,028a
Argese	1-5 (3)	20	15/0	157,21a	0,324a
Argese	100-45 (5)	20	15/0	208,88a	0,912b
Argese	1-5 (3)	20	15/0	567,34a	0,942a
Argese	100-45 (5)	20	15/0	580,09a	0,954a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

No se hallaron diferencias significativas en la tensión cortante. La metodología seguida en esta serie de pruebas resultó compleja y demandante de mucho tiempo a la hora de alcanzar la humedad establecida para el corte por lo que fue descartada. Asimismo, el proceso de baño y secado originaba una retracción en la muestra (en el momento del secado) con lo que disminuía su sección y consecuentemente se dificultaba el cálculo de las tensiones normales y tangenciales.

10.1.2.6. Pruebas de humectación y secado en Argese con corte a diversas relaciones de tensión

Se utilizó suelo de Argese y una presión de compresión de 600 kPa y cuatro relaciones de tensión: 20, 40, 80 y 100%. El suelo inicialmente fue humedecido a un 30 y a un 20% de humedad. Fueron comprimidas las muestras a estos niveles

de humedad para luego ser dejadas en una atmósfera abierta de manera que perdieran humedad hasta un 20% aquellas humedecidas inicialmente al 30% y hasta un 5% aquellas humedecidas inicialmente al 20%. Luego de alcanzar dichos niveles de humedad, estas muestras se dejaron 24 horas en una atmósfera cerrada de manera que se homogeneizara la humedad y a continuación fueron cortadas.

También se realizaron pruebas al 40% de relación de tensión con humedad de compresión de 20% y humedad de corte de 0% y con 10% de relación de tensión y humedades de 15 y 5% respectivamente.

Tabla 14: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de humectación y secado de Argese a diversas relaciones de tensión.

Tratamiento	R.T. (%)	Humedad comp/cort (%)	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
1-5 (3)	10	15/5	310,61a	1,244a
100-45 (5)	10	15/5	241,73a	1,799b
1-5 (3)	40	20/0	636,44a	0,715a
100-45 (5)	40	20/0	878,85b	0,387a
1-5 (3)	40	20/0	202,59a	0,151a
100-45 (5)	40	20/0	327,62a	0,614b
1-5 (3)	40	20/5	367,20a	-0,134a
100-45 (5)	40	20/5	354,23a	-0,149a
1-5 (3)	80	20/5	515,09b	-0,129a
100-45 (5)	80	20/5	451,7a	-0,213a
1-5 (3)	100	20/5	574,11b	-0,051a
100-45 (5)	100	20/5	488,99a	-0,205a
1-5 (3)	20	30/20	294,15a	0,457a
100-45 (5)	20	30/20	343,80a	0,378a
1-5 (3)	40	30/20	970,98a	0,591a
100-45 (5)	40	30/20	871,84a	0,672a
1-5 (3)	80	30/20	472,30a	0,009a
100-45 (5)	80	30/20	418,32a	-0,403a
1-5 (3)	100	30/20	1231,27a	0,185a
100-45 (5)	100	30/20	1001,54a	0,045a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

Las diferencias halladas en tensión cortante y en desplazamiento en algunas de las pruebas permitió adoptar esta metodología de desecamiento parcial y estabilización de las muestras en la metodología final. Asimismo el drenaje observado en las pruebas de compresión con los tratamientos de mayor humedad determinó la selección de una humedad inferior en las pruebas definitivas. También la tensión normal máxima aplicada de 600kPa utilizada en

esta serie, fue empleada desde entonces y en las pruebas definitivas debido a las diferencias halladas.

10.1.2.7. Pruebas de corte a diversa humedad en Argese

Se realizaron pruebas con los tratamientos 1-5 (3) y 100-45 (5) de Argese. Se realizó la compresión a 600 kPa y se cortaron las muestras a una relación de tensión de 40 y 20%. Solo en las muestras humedecidas a 20% de humedad se realizó una pausa de 24 horas de estabilización entre la compresión y el corte debido a que aquellas a menor humedad se rompían y disgregaban al extraerlas de la caja de corte.

Tabla 15: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas con Argese a diversas humedades.

Tratamiento	Humedad (%)	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
1-5 (3)	5	201,94a	-0,155a
100-45 (5)	5	223,40a	0,219a
1-5 (3)	10	201,26a	-0,177a
100-45 (5)	10	232,13a	0,101a
1-5 (3)	15	159,00a	0,937a
100-45 (5)	15	121,44a	-0,256a
1-5 (3)	20	245,08b	-0,281a
100-45 (5)	20	205,51a	-0,332a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

Solo se halló una diferencia en la prueba al 20% de humedad (única que había recibido el proceso de estabilización de 24 horas entre la compresión y el corte). Además la imposibilidad de extraer las muestras de menos humedad para la estabilización debido a su fragilidad permitió descartar valores inferiores de 20% de humedad en las pruebas definitivas.

10.1.2.8. Pruebas de corte a 25% de humedad

Se utilizaron los tratamientos 100-45 (5) y Testigo de los suelos Carpi y Ozzano, usando una presión de compresión de 600 kPa y una relación de tensión de 40%. Después del humedecimiento se dejó el suelo 24 horas en atmósfera cerrada para la homogeneización de la humedad. El proceso de homogeneización de humedad se repitió luego de la compresión.

Tabla 16: Tensión cortante y desplazamiento medios en pruebas de corte a 25% de humedad.

Suelo	Tratamiento	Tensión (kPa)	Desplazamiento (mm)
Carpi	100-45 (5)	123,59a	-0,398a
Carpi	Testigo	135,08a	-0,290a
Ozzano	100-45 (5)	96,91a	-0,403a
Ozzano	Testigo	85,26a	-0,401a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

Nuevamente el tratamiento Testigo no se diferenció del tratamiento de máxima salinidad-sodicidad.

Al finalizar las pruebas preliminares y no habiéndose encontrado diferencias entre el tratamiento Testigo y los suelos regados (Ver Tablas 10, 12, 13 y 16) con las distintas soluciones salino-sódicas, se revisó la secuencia de preparación de las muestras ensayadas en cada caso. Se comprobó que no se estaba partiendo de iguales condiciones físico-mecánicas en todos los tratamientos. Los testigos no habían sido sometidos a la secuencia de baños y percolaciones que sí recibieron los restantes tratamientos. Al partirse de condiciones físico-mecánicas diferentes se imposibilitó la comparación con el resto de los tratamientos ya que de encontrarse cualquier diferencia de comportamiento a la compresión o al corte no podría ser adjudicada exclusivamente al efecto de la salinidad y/o sodicidad. De acuerdo a Kay y Dexter (1992) los ciclos de humectación y secado que sufren los suelos conducen a un aflojamiento de las zonas de falla. Según estos autores la resistencia de las zonas de falla en un momento dado depende de la presencia de poros llenos de aire, existencia de microgrietas y ligantes intergranulares orgánicos o inorgánicos y consecuentemente, la resistencia del suelo a las tensiones externas dependerá del contenido de agua y de los procesos que cambien las características de los poros y/o la cementación entre las unidades estructurales. Estos cambios pueden causar una redistribución de las partículas finas que pasan a ocupar los poros, originando una reorganización de las partículas sólidas. También Caron *et al.*, (1992) y Rasiah *et al.* (1992) encontraron que suelos sometidos a ciclos de humectación-secado exhibían baja estabilidad de agregados resultando en la liberación de material coloidal y el colapso de los poros del suelo (Levy y Miller, 1997). Por todo esto el tratamiento Testigo fue excluido en las pruebas definitivas. No obstante ello, debe tenerse en cuenta que el tratamiento 1-5 (3) no varió sustancialmente la salinidad y sodicidad con respecto al Testigo por lo que 1-5 (3) podría ser considerado como una situación de referencia de baja salinidad y sodicidad (Ver Tablas 8 y 9).

10.2 Comportamiento a la compresión uniaxial

En las Figuras 17 a 20 se presentan los resultados del comportamiento compresivo de cada suelo en relación a las diferentes tensiones normales aplicadas sobre la muestra durante la compresión uniaxial.

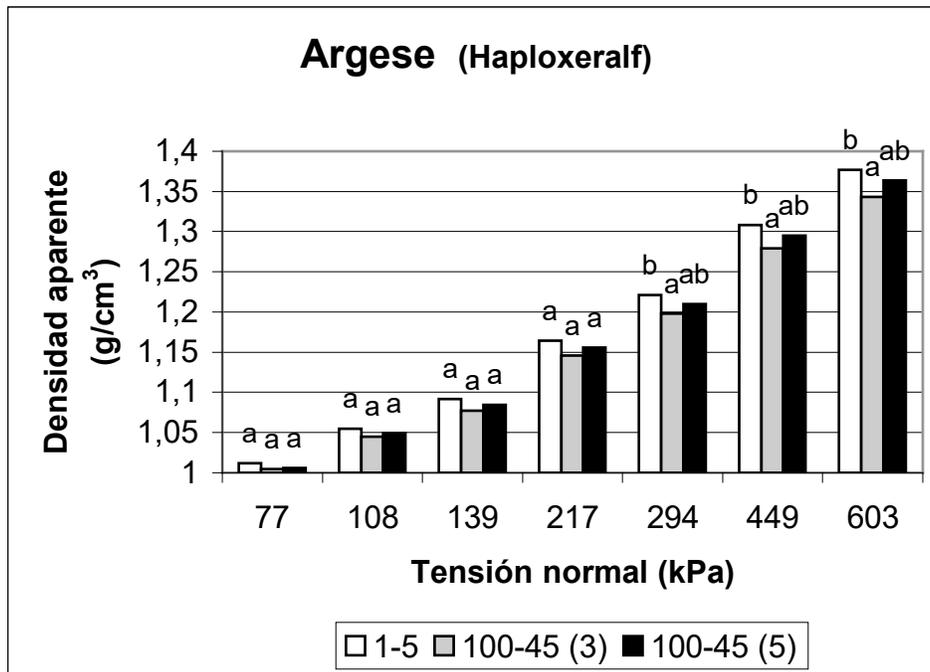


Figura 17: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Argese ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ DMS) entre tratamientos.

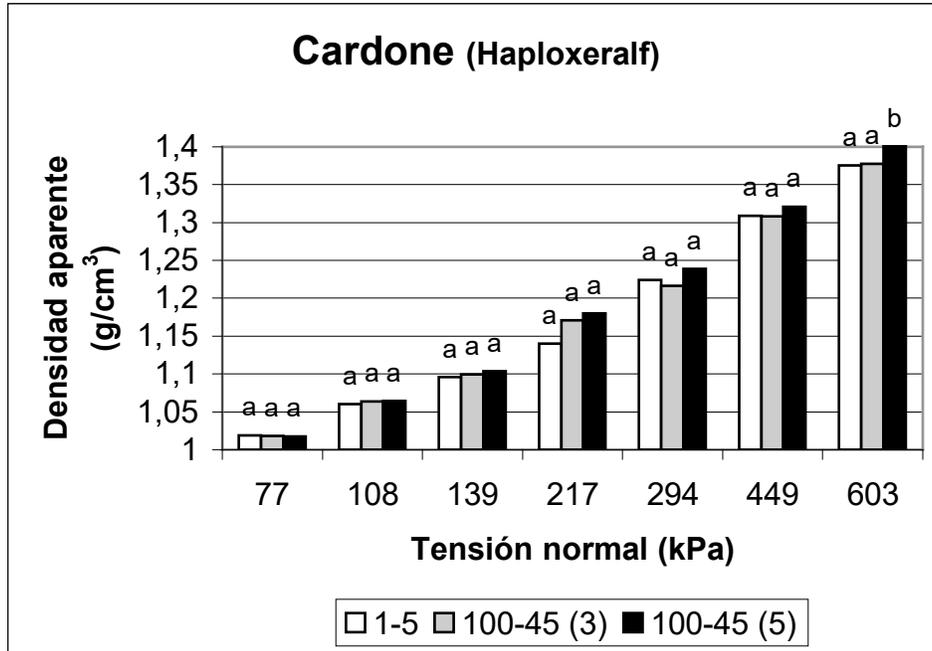


Figura 18: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Cardone ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ DMS) entre tratamientos.

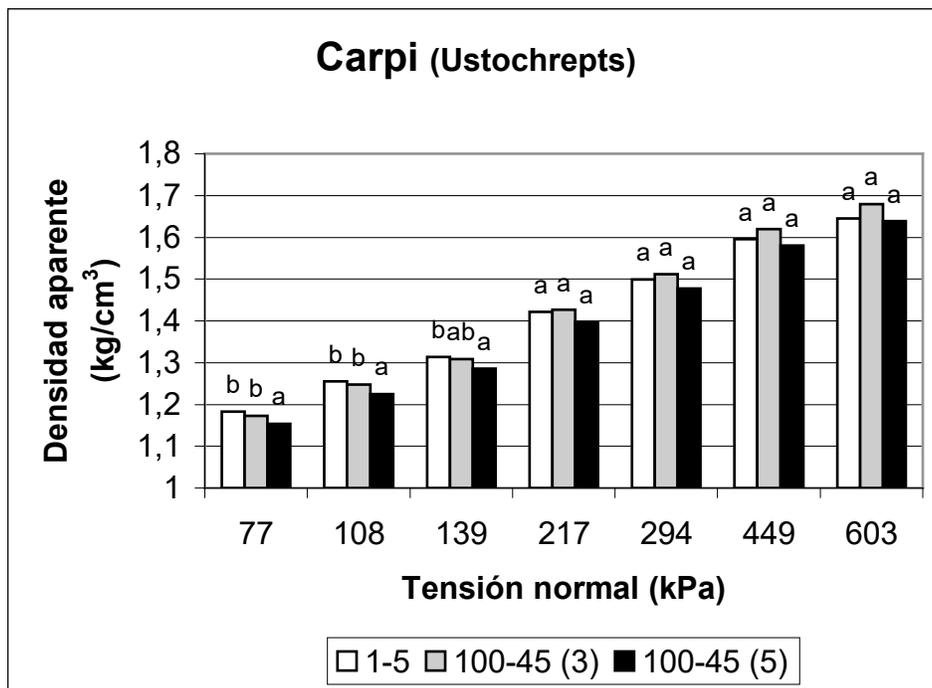


Figura 19: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Carpi ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ DMS) entre tratamientos.

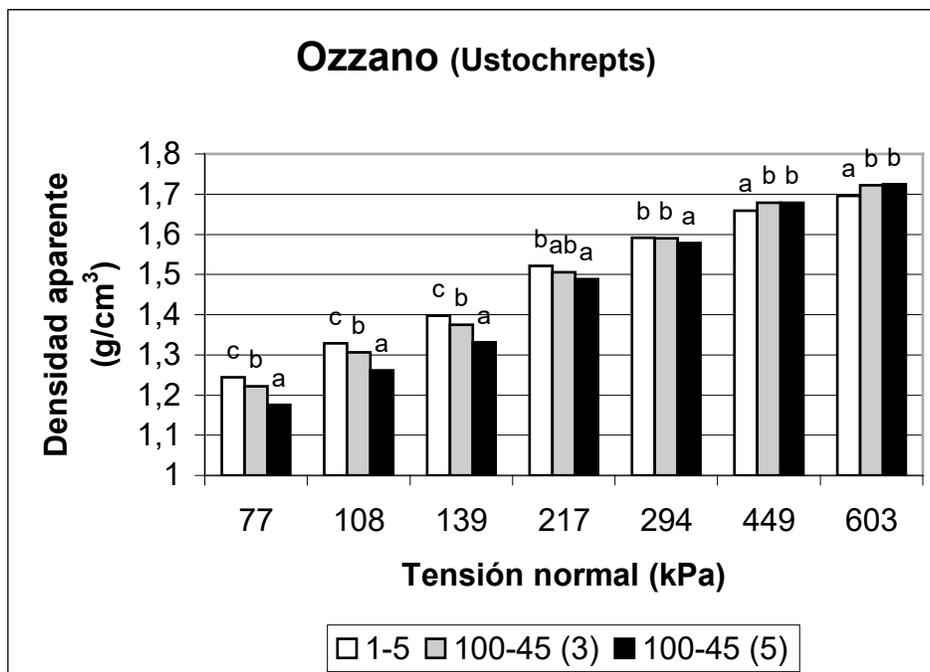


Figura 20: Densidad alcanzada por cada tratamiento de Ozzano ante las diferentes tensiones normales. Letras distintas para una misma tensión indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$ DMS) entre tratamientos.

10.3 Comportamiento al corte

10.3.1 Densidad previa al corte

Se determinó la densidad media para cada tratamiento y relación de tensión antes del corte obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 17.

Tabla 17a: Densidades medias de las muestras de Argese antes del corte según tensión normal aplicada.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,3126c	1,34418a	1,36103a
100-45 (3)	1,23372a	1,33674a	1,36883a
100-45 (5)	1,30268b	1,33618a	1,36611a

Tabla 17b: Densidades medias de las muestras de Cardone antes del corte según tensión normal aplicada.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,31498a	1,3419b	1,36701a
100-45 (3)	1,33585a	1,3264a	1,37453a
100-45 (5)	1,32309a	1,36c	1,37863a

Tabla 17c: Densidades medias de las muestras de Carpi antes del corte según tensión normal aplicada.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,52317a	1,58354a	1,65112b
100-45 (3)	1,5188a	1,5757a	1,64698b
100-45 (5)	1,52944a	1,57023a	1,61716a

Tabla 17d: Densidades medias de las muestras de Ozzano antes del corte según tensión normal aplicada.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,55206c	1,6681b	1,74861b
100-45 (3)	1,52452b	1,59129a	1,71203ab
100-45 (5)	1,49839a	1,57882a	1,65768a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

10.3.2 Tensión de corte, desplazamiento vertical y humedad

Fueron determinadas las tensiones de corte medias y las humedades a las que fueron cortadas las muestras obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 18.

Tabla 18a: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Argese.

Tratamiento	Relación de tensión					
	10% (60kPa)		40% (240kPa)		80% (480kPa)	
	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.
1-5 (3)	263,88b	19,6c	352,22a	20,0a	511,81ab	19,7b
100-45 (3)	234,80a	17,9 a	379,72a	19,0a	494,30a	19,2a
100-45 (5)	321,31c	19,2b	453,76b	19,2a	531,23b	19,3a

Tabla 18b: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Cardone.

Tratamiento	Relación de tensión					
	10% (60kPa)		40% (240kPa)		80% (480kPa)	
	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.
1-5 (3)	206,01a	19,6a	312,09a	19,9ab	497,44a	19,5a
100-45 (3)	208,19ab	19,8a	302,08a	19,6a	497,52a	19,7a
100-45 (5)	252,69b	19,6a	361,37b	20,0b	539,48b	19,4a

Tabla 18c: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Carpi

Tratamiento	Relación de tensión					
	10% (60kPa)		40% (240kPa)		80% (480kPa)	
	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.
1-5 (3)	184,26a	19,6b	266,28a	20,0b	308,34a	19,7b
100-45 (3)	184,36a	19,3 a	258,16a	19,0a	356,00b	19,2a
100-45 (5)	200,48b	19,7b	272,29a	19,2a	343,82b	19,3a

Tabla 18d: Medias de tensiones de corte (kPa) y humedades (% en peso) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Ozzano

Tratamiento	Relación de tensión					
	10% (60kPa)		40% (240kPa)		80% (480kPa)	
	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.	Tensión	Humed.
1-5 (3)	110,47a	19,4ab	186,51a	19,2b	249,90a	18,9a
100-45 (3)	160,74b	18,9a	235,16b	18,5a	257,27a	18,6a
100-45 (5)	176,94b	19,6b	256,36c	19,3b	299,44b	18,8a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

10.3.3 Comportamiento compresivo-expansivo

Los suelos que experimentaron un desplazamiento positivo (hacia arriba) de la muestra durante el corte, sufrieron una expansión o disminución de la densidad mientras que aquellos que experimentaron un desplazamiento negativo (hacia abajo), se comprimieron o aumentaron su densidad (Tablas 19).

Tabla 19a: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Argese

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,368a	0,584a	0,017a
100-45 (3)	1,432ab	0,521a	0,208b
100-45 (5)	1,575b	0,664b	0,241b

Tabla 19b: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Cardone

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	0,852a	0,451a	-0,131b
100-45 (3)	1,017ab	0,516a	-0,282a
100-45 (5)	1,098b	0,548a	0,072c

Tabla 19c: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Carpi

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	0,889ab	-0,102a	-0,469a
100-45 (3)	0,837a	-0,092a	-0,335b
100-45 (5)	0,986b	-0,094a	-0,256b

Tabla 19d: Medias de desplazamientos verticales (mm) de los distintos tratamientos y relaciones de tensión de Ozzano

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	0,292a	-0,422a	-0,549a
100-45 (3)	0,820b	-0,158b	-0,454b
100-45 (5)	0,826b	-0,079b	-0,431b

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

10.3.4 Densidad final alcanzada luego del corte

Como consecuencia del corte los suelos se expandieron o comprimieron de acuerdo a las relaciones de tensión a que fueron cortados alcanzando una determinada densidad final. Las medias de las mismas pueden observarse en las Tablas 20.

Tabla 20a: Medias de densidad final en seco (g/cm^3) alcanzada por las muestras de Argese luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,24c	1,32a	1,36a
100-45 (3)	1,16a	1,31a	1,36a
100-45 (5)	1,22b	1,30a	1,35a

Tabla 20b: Medias de densidad final en seco (g/cm^3) alcanzada por las muestras de Cardone luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,27a	1,31b	1,38ab
100-45 (3)	1,28a	1,29a	1,39b
100-45 (5)	1,26a	1,33b	1,37a

Tabla 20c: Medias de densidad final en seco(g/cm³) alcanzada por las muestras de Carpi luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,46a	1,59a	1,70b
100-45 (3)	1,46a	1,59a	1,68b
100-45 (5)	1,45a	1,58a	1,64a

Tabla 20d: Medias de densidad final en seco(g/cm³) alcanzada por las muestras de Ozzano luego de ser cortadas a los distintos niveles de relación de tensión.

Tratamiento	Relación de tensión		
	10% (60kPa)	40% (240kPa)	80% (480kPa)
1-5 (3)	1,53c	1,71b	1,81b
100-45 (3)	1,46b	1,60a	1,76ab
100-45 (5)	1,44a	1,59a	1,70a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos al 5% de la prueba de Diferencias Mínimas Significativas ($p < 0,05$ DMS).

11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

11.1 Consideraciones previas

Previo al análisis y discusión de los resultados es necesario destacar determinados datos que permitirán comprender con mayor claridad los resultados relevados.

De los tratamientos efectuados, debe destacarse la incidencia que ha tenido en cada uno de ellos, la salinidad y sodicidad de las distintas soluciones empleadas y el número de baños, en el PSI y en la CE final alcanzada por los tratamientos. En las Tablas 8 y 9 de Materiales y Métodos puede verse que el efecto de los baños con las distintas soluciones ha llevado a los distintos tratamientos a diversas condiciones de salinidad y sodicidad. El tratamiento 1-5 (3) ha mantenido un PSI y una CE semejante a la de la situación original (Testigo) pudiendo a este tratamiento considerársele como no afectado por salinidad ni sodicidad. En el 100-45 (3), se observa un ligero incremento de ambos parámetros con respecto al Testigo (tratamiento levemente salino-sódico). Por último, en el tratamiento 100-45 (5) ha aumentado sustancialmente el PSI, pero la CE ha mantenido valores similares a los del tratamiento 100-45 (3) (tratamiento sódico).

Con respecto a las diferencias entre suelos puede observarse que Argese y Cardone son muy similares, presentando Carpi un 10% más de arcilla y un 10% menos de arena y Ozzano un 10% más de arena y un 10% menos de limo (Textura ISSS). Asimismo, puede remarcarse la diferencia en la tipología de arcilla de los mismos, presentando los Inceptisoles vermiculita y esmectita. La vermiculita es un filosilicato del tipo 2:1, caracterizada por una superficie específica muy alta, de alrededor de 600-800 m²/g, aumentando la dimensión del complejo de intercambio y por lo tanto la actividad físico-química del suelo y con ella las posibilidades de agregación. Ocurre algo similar con la esmectita. Por otro lado, illita y clorita presentan superficies de 70-120 y 70-150 m²/g respectivamente, mientras la caolinita presenta valores muy bajos de solo 10-20 m²/g. Adicionalmente, a la consideración de la superficie específica deben contemplarse las diferencias en la CIC de estos minerales arcillosos. Mientras que esmectita y vermiculita tienen entre 80 y 150 cmol_c kg⁻¹, illita y clorita solo poseen entre 10 y 40 cmol_c kg⁻¹ y caolinita entre 1 y 10 cmol_c kg⁻¹. Estas considerables diferencias incidirían en la posibilidad de formación de puentes catiónicos, redundando en diferentes capacidades estructurantes en los suelos a nivel de partículas. Ambas propiedades repercutirían en la menor estabilidad de acuerdo a algunos autores (Churchman *et al.*, 1993; Ward y Carter, 2004). Illita y caolinita son los tipos de arcillas presentes en Argese y Cardone, ambos Alfisoles. Con respecto a las características químicas es de remarcar la importante cantidad de carbonatos que presentan los Inceptisoles (sobretudo Carpi) y la mayor cantidad de materia orgánica de Cardone y Carpi (3% vs 1,5% de Argese y Ozzano). Tanto los carbonatos como la MO del suelo colaboran como ligantes entre las partículas y disminuirían la incidencia del efecto dispersivo del sodio.

11.2 Análisis de la densidad alcanzada durante la compresión uniaxial

El parámetro densidad aparente no ha mostrado cambios evidentes con los tratamientos efectuados ante la aplicación de la compresión uniaxial como los hallados en el parámetro tensión cortante. No obstante, puede observarse (sobre todo en los Inceptisoles) una tendencia en la cual el nivel de salinidad-sodicidad ha influido sobre la densidad aparente alcanzada, resultando más susceptibles a problemas de densificación, los suelos con menores niveles de sodicidad (tratamientos 1-5 (3) y 100-45 (3)) (Figuras 17 a 20). Draghi *et al.* (1998) y Vázquez (2003) citaron la poca variabilidad que presenta este parámetro, y en consecuencia, la dificultad en encontrar diferencias ante la aplicación de tensiones externas. Existen numerosos autores que concuerdan en que los suelos afectados por sodio se caracterizan por un aumento de su densidad (Amiotti y Bravo, 2006; Kaur *et al.*, 2006; Jassogne *et al.*, 2006; Curie *et al.*, 2006).

Una estructura de partículas floculadas presenta grandes poros mientras que una dispersa tiene numerosos microporos y a tensiones mayores que la tensión de preconsolidación el efecto de incrementos de tensiones es mayor sobre las estructuras floculadas que sobre las dispersas (Mitchell, 1976). Ante un incremento dado de tensión, los poros de mayor tamaño son comprimidos primero (Delage y Lefebvre, 1984; Griffiths y Joshi, 1989). La menor compresibilidad del tratamiento 100-45 (5) podría deberse a la presencia de poros de menor tamaño en el mismo con respecto a los otros tratamientos.

En coincidencia con estos resultados, Spugnoli y Melani (2005) reportaron menos sensibilidad a la compresión de suelos sódicos, con respecto a los no sódicos, para los mayores tamaños de agregados. Asimismo reportaron una mayor resistencia a la compactación de los agregados de menor tamaño, resultando menos acentuado este fenómeno en los suelos sódicos. Para todos los agregados, el suelo más sódico exhibió valores más bajos de volumen específico (1/Dap) que el menos sódico debido a que en este último, los agregados eran más porosos y menos cementados confiriendo también, menos resistencia a la compresión uniaxial. Estos autores explicaron la menor sensibilidad a la compresión de los suelos sódicos, por la presencia de arcilla dispersa que actúa como un fuerte ligante, confiriendo a los agregados una mayor resistencia a la compresión y valores más bajos de volumen específico.

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 compactabilidad de los suelos.

Existen antecedentes suficientes que permiten afirmar que un elevado PSI conduce a un reordenamiento poroso, aumentando los microporos y disminuyendo los macroporos o poros gravitacionales (Waldrom y Constantin, 1968; Costa y Aparicio, 2000; Varallyay, 2002; Ruiz Vera y Wu, 2006). La salinidad elevada en

cambio, resultaría positiva para la floculación de los coloides y la estructura. (Barzegar *et al.*, 1996)

Si bien en el material utilizado no puede hablarse de estructura como tal, debido a que se parte de suelo molido y tamizado por malla de 2mm puede hipotetizarse que la acción del sodio en el tratamiento 100-45 (5) haya conducido a un reordenamiento poroso en el material remanente, disminuyendo el número de poros mayores e incrementando los de menor tamaño. Los poros de mayor tamaño son más compresibles, no así los más pequeños que serían los dominantes en el tratamiento 100-45 (5). Asimismo, los procesos de humedecimiento y desecación parcial podrían haber generado un proceso de cementación más marcado en el tratamiento 100-45 (5) que es el más sódico y por lo tanto con mayor tendencia a la dispersión generando una mayor resistencia a las tensiones externas (Singer y Warrington, 1992 citados por Rycroft *et al.*, 2002).

Los Inceptisoles muestran mayor influencia del nivel de salinidad-sodicidad sobre la densidad aparente que los Alfisoles. El motivo de dichas variaciones podría ser explicado por los mayores niveles de arcilla de los Inceptisoles. Siendo el sodio responsable de la dispersión de las arcillas, su efecto sería mayor en suelos de textura fina. Asimismo la diferencia en la mineralogía de las arcillas de los suelos empleados podría influir en las diferencias encontradas. En los Inceptisoles predominan vermiculita y esmectita con superficies específicas muy altas y por lo tanto más capacidad de agregación. Illita y caolinita, con menores valores de superficie específica son los tipos de arcillas presentes en Argese y Cardone, (Alfisoles). Puede verse que los Inceptisoles fueron más compresibles alcanzando valores de densidad superiores a los Alfisoles.

11.3 Análisis del comportamiento al corte

11.3.1 Densidad previa al corte

La densidad antes del corte se determinó como variable explicativa de la tensión cortante ya que las muestras más densas experimentan mayores tensiones cortantes. Ohu *et al.* (1985) expresaron que incrementos en la densidad aparente del suelo son acompañados por incrementos en las propiedades de resistencia del suelo. También Ekwue y Stone (1995) encontraron que el valor pico de esfuerzo cortante fue mayor cuanto mayor fue el nivel de compactación ejercido.

Para todas las series de suelos estudiadas, las muestras que fueron posteriormente cortadas a menor relación de tensión tuvieron menores valores de densidad que las cortadas a altas relaciones de tensión. Mientras que las que fueron cortadas al 80% de relación de tensión (482 kPa) mantuvieron una densidad similar a la máxima alcanzada durante la compresión (603 kPa), las que fueron cortadas al 10 y 40% (60 y 240 kPa respectivamente) disminuyeron su densidad con respecto a la densidad máxima alcanzada durante la compresión, debido a la recuperación (*rebound*) producida ante la descarga. La expansión de

ninguno de los suelos pudo compensar la compresión recibida previamente, es decir que los suelos mantuvieron una compresión residual y ante la descarga no recuperaron totalmente la porosidad que poseían antes de la compresión (comparar los valores de Tablas 17a, b, c y d con las Figuras 17 a 20 de la compresión uniaxial).

11.3.2 Comportamiento al corte

Puede verse en las Tablas 18 que el efecto de los tratamientos sobre la tensión cortante ha sido evidente, por lo que dicho parámetro refleja en mayor medida que la densidad aparente, los cambios producidos en el suelo por efecto de la salinidad-sodicidad. La densidad previa al corte (Tablas 17), mayor en general para el tratamiento 1-5 (3), no ha generado que dicho tratamiento tuviese una mayor tensión cortante de acuerdo a lo expuesto por Ohu *et al.* (1985) y Ekwue y Stone (1995). Por lo tanto, el parámetro densidad previa al corte (menor en general en el tratamiento 100-45 (5)) no permite explicar la mayor tensión cortante encontrada en dicho tratamiento.

Con respecto a la humedad de corte se verificaron diferencias en algunos suelos y tratamientos, pero no existió una correspondencia clara con la tensión cortante, por lo que la mayor tensión cortante para el tratamiento 100-45 (5) no puede ser explicada por las diferencias de humedad halladas en algunos casos. Ekwue y Stone (1995) encontraron que la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la tensión de corte se incrementaron con el aumento de la humedad del suelo hasta que un valor pico fue alcanzado, después del cual nuevos incrementos en la humedad causaron disminución de los valores evaluados. Esto es un comportamiento típico reportado por otros autores como De Kimpe *et al.* (1982), Ayers y Perumpral (1982) y Ohu *et al.* (1985).

La mayor tensión cortante del tratamiento 100-45 (5), en el que se alcanza el máximo PSI, concuerda con los resultados de Spugnoli y Melani (2005) quienes reportaron que de los tratamientos realizados, el suelo más sódico tuvo mayores valores de resistencia a la tracción de los agregados para todos los tamaños estudiados. Asimismo encontraron que la resistencia a la rotura por tracción aumentó en relación inversa a la dimensión de los agregados, siendo la arcilla dispersa de los suelos sódicos la que le confiere mayor resistencia a la rotura y a la compactación en todos los tamaños de agregados.

La mayor resistencia del tratamiento 100-45 (5) pudo deberse a un incremento en su cantidad de arcilla dispersa. Es conocido el efecto negativo de este factor sobre la permeabilidad y sobre la formación de costra (So y Almore, 1995, Barzegar *et al.* 1994a). Chan (1989) observó altas resistencias a la tensión de agregados secos en vertisoles cuando los tratamientos de cultivo condujeron a un aumento en la dispersión de arcillas. También Kay y Dexter (1992), demostraron la relación directa entre el porcentaje de arcilla dispersa y la resistencia del suelo. Shanmuganathan y Oades (1982) encontraron que el incremento en la cantidad de arcilla dispersa en los suelos puede aumentar en

gran medida la resistencia de los mismos (medida como el módulo de ruptura) y disminuir la friabilidad.

Es suficiente una pequeña cantidad de sodio adsorbido para aumentar la dispersión de la arcilla. Barzegar *et al.* (1994a) han demostrado que un incremento del porcentaje de sodio intercambiable produce un incremento de la arcilla dispersa y por lo tanto de la resistencia del suelo. Varios autores han evidenciado que el sodio produce una acción negativa en la estructura del suelo, al contrario de aquella generada por otros cationes como Ca^{++} y Mg^{++} (Quirk y Murray, 1991; Cavazza *et al.*, 2002). Dexter y Chan (1991) sugirieron que los cationes que dan lugar a la mayor dispersión de arcilla en agua (como el sodio) son también aquellos que dan lugar a la mayor resistencia del suelo seco. Barzegar *et al.* (1995) coincidieron en que la cantidad de arcilla dispersable y la CIC de la arcilla están altamente relacionadas con la resistencia de los suelos. Barzegar *et al.* (1994b) sugirieron que el efecto dispersivo debido a la RAS en incrementar la resistencia del suelo es modificado por la concentración de electrolitos y concluyeron que al mejorar el estado de MO del suelo, el efecto debido a la sodicidad sobre la resistencia del suelo pudo ser modificado. A pesar de la alta salinidad del agua de riego del tratamiento 100-45 (5), el efecto dispersante del Na^+ se expresó originando un alto PSI en el suelo y una mayor resistencia al corte. El tratamiento 100-45 (3) presentó valores intermedios de tensión cortante, en correspondencia con sus relativos bajos valores de PSI y salinidad.

Kay y Dexter (1992) estudiaron la variación en la resistencia de los agregados relacionándola a efectos combinados de condiciones que favorecen la dispersión de arcillas y un incremento subsiguiente en la resistencia por cementación al secarse y ciclos de humectación-secado que resultarían en un decrecimiento de la resistencia. Utomo y Dexter (1981b) coinciden en que los eventos de humectación y secado, pueden causar una disminución en la resistencia. La pérdida de resistencia es debida a una combinación de entrampamiento de aire e hinchazón diferencial (Grant y Dexter, 1989). Las características del suelo y el procedimiento de humectación en estos eventos puede resultar en la producción de cantidades de materiales cementantes insuficientes, resultando preponderantes los procesos que aflojan las zonas de falla sobre los de cementación. En estas circunstancias, la extensión del aflojamiento se incrementa con la tasa de humectación y el número de ciclos de humectación-secado. En este trabajo de Tesis, el mayor número de ciclos de humectación-secado del tratamiento 100-45 (5) (con respecto al 100-45 (3)), derivó en una mayor resistencia al corte, en contraposición a lo encontrado por Kay y Dexter (1992), lo que se debería al aumento considerable de su PSI (ver Tablas 8 y 9 en Materiales y Métodos), que generó, en definitiva, una mayor cantidad de arcilla dispersa, siendo ésta la causa de la mayor resistencia de los agregados.

La resistencia a la tensión del suelo está relacionada al contenido de agua, y a procesos que cambian las características de los poros y/o la cementación entre las unidades estructurales (Kay y Dexter, 1992). El incremento en la dispersión de

la arcilla, causado por grandes valores de PSI, resulta también en una alta resistencia mecánica de los agregados del suelo, debido al reacomodamiento de partículas (dominios y microagregados) en consecuencia de los ciclos naturales de humectación y secado (Chan, 1989, Kay y Dexter, 1992, Barzegar *et al.*, 1994a y 1994b, Rajaram y Erbach, 1999) y al incremento del número de puntos de contacto (Hartge, 1992) citados por Spugnoli *et al.* (2002). Otra hipótesis explicativa de la mayor resistencia al corte del tratamiento 100-45 (5), es que la dispersión de la arcilla, habría causado un reordenamiento poroso (disminución de poros grandes e incremento de poros pequeños) (Waldrom y Constantin, 1968; Barzegar *et al.*, 1996; Costa y Aparicio, 2000) de manera que las partículas finas se reordenaran ocupando los espacios vacíos de acuerdo a lo expuesto por Chen y Banin (1975). Esto habría generado una superficie de corte más resistente al existir menos vacíos o huecos (ó poros de menor diámetro) en el área expuesta al esfuerzo cizallante.

Rahimi *et al.* (2000) valoraron el efecto de la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio sobre suelos con distintos contenidos de MO en condiciones de laboratorio. Los suelos tenían un contenido de arcilla uniforme, predominantemente illita y se diferenciaban principalmente por su contenido de MO. Los tratamientos consistieron en soluciones con dos CE (0, 5 y 4 dS/m) y tres niveles de RAS (0, 5 y 15). La resistencia a la tensión dependió del contenido de MO, CE y RAS. Con el incremento de RAS disminuyó la resistencia (en contraposición con lo encontrado en el tratamiento 100-45 (5) de esta Tesis). Rahimi *et al.* (2000) explican que estas diferencias de comportamiento son debidas a los ciclos de humectación-deseccación que redujeron la estabilidad de los agregados. A un mismo RAS, los tratamientos con alta CE tuvieron mayor resistencia a la tensión. Finalmente, a mayor contenido de MO hubo mayor resistencia. Con respecto a las diferencias entre series de suelos, puede verse que los Alfisoles presentan mayores valores de tensión cortante. Los mismos se deberían a una mayor cantidad de arcilla dispersa. Si bien Carpi posee más arcilla que los Alfisoles, su mayor nivel de carbonatos y MO podrían haber prevenido parcialmente la dispersión de las arcillas gracias a su efecto cementante y agregante de acuerdo a lo expuesto por Vázquez (2003). Asimismo, la tipología de arcilla ya citada en la Sección 11.2 podría haber influido en las diferencias encontradas.

11.3.3 Análisis del comportamiento compresivo-expansivo

La mayor tendencia a la expansión de los tratamientos 100-45 (5) puede explicarse apelando al probable sistema poroso existente en este tratamiento, donde predominarían poros de menor diámetro de acuerdo a lo expuesto por Waldrom y Constantin (1968), Barzegar *et al.* (1994b), Jayawardane y Chan (1994), Costa y Aparicio (2000), Varallyay (2002) y Vázquez (2003). Los poros de menor diámetro de los tratamientos 100-45 (5) no habrían tenido la capacidad de alojar pequeños agregados o partículas minerales con lo cual en el momento del corte estas partículas al moverse unas sobre otras no habrían encontrado huecos suficientemente grandes (lo que implicaría un reacomodamiento y una disminución

de volumen), resultando en una tendencia a la compresión durante el corte menor que en los otros dos tratamientos. El tratamiento 1-5 (3) en cambio, con poros de dimensiones mayores, habría tenido más capacidad de alojar dichas partículas y consecuentemente comprimirse ante el esfuerzo cortante. Habría resultado más sencillo, comprimir con el corte un material donde predominan poros de mayor tamaño (como en el tratamiento 1-5 (3)) que uno donde prevalecen los de menor tamaño (tratamiento 100-45 (5)).

El análisis de la densidad final alcanzada luego del corte permite ratificar la tendencia de mayor compresibilidad del tratamiento 1-5 (3) con respecto a 100-45 (5). Obsérvese que a excepción de Cardone al 40% siempre los valores de densidad de 100-45 (5) luego del corte fueron menores a los de 1-5 (3) (con diferencias significativas en Ar 10%, Carpi 80% y Ozzano en todas las relaciones de tensión).

11.4 Análisis de los resultados en el marco de la teoría de Mohr-Coulomb

Teniendo en cuenta la ecuación general de Coulomb

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

donde

τ : tensión tangencial o de corte (kPa)

σ : tensión normal (kPa)

c : cohesión (kPa)

ϕ : ángulo de rozamiento interno

se realizaron las regresiones lineales entre la tensión tangencial (o cortante) y la tensión normal de cada suelo y tratamiento, obteniendo las ecuaciones para cada uno de ellos y los valores de cohesión y ángulo de rozamiento interno (Figuras 21 a 24).

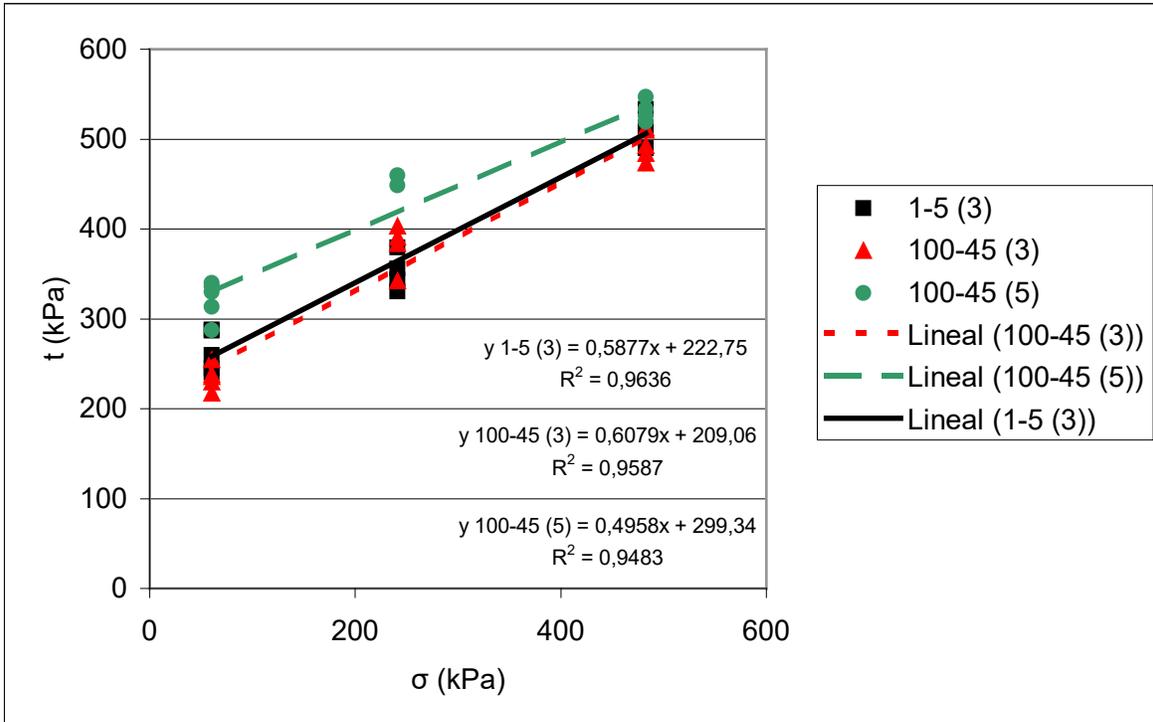


Figura 21: Rectas de Coulomb de Argese (HaploxeraIf)

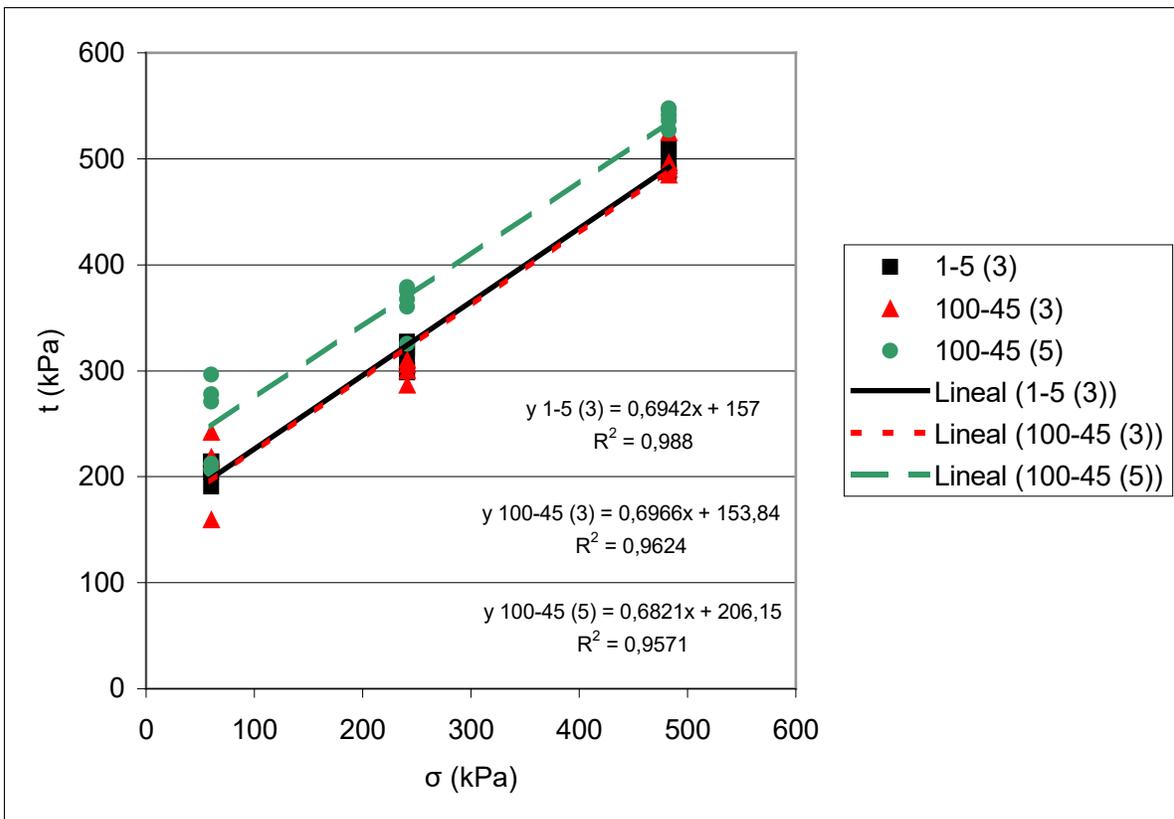


Figura 22: Rectas de Coulomb de Cardone (HaploxeraIf)

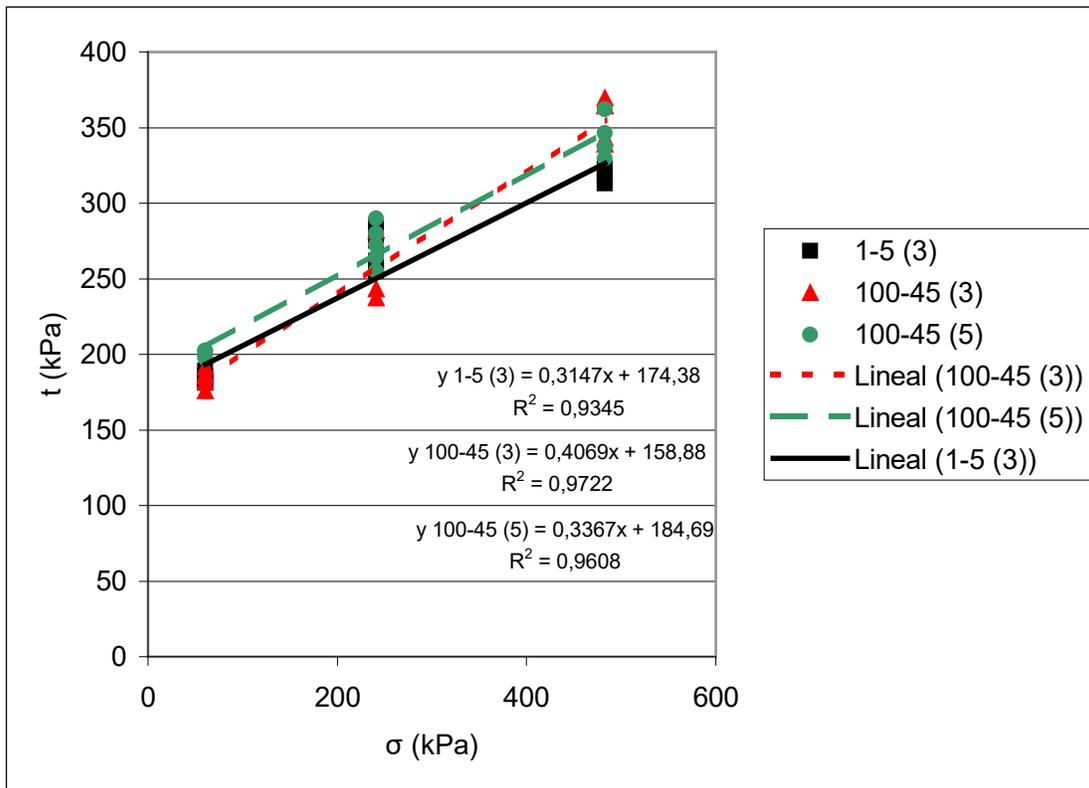


Figura 23: Rectas de Coulomb de Carpi (Ustochrepts)

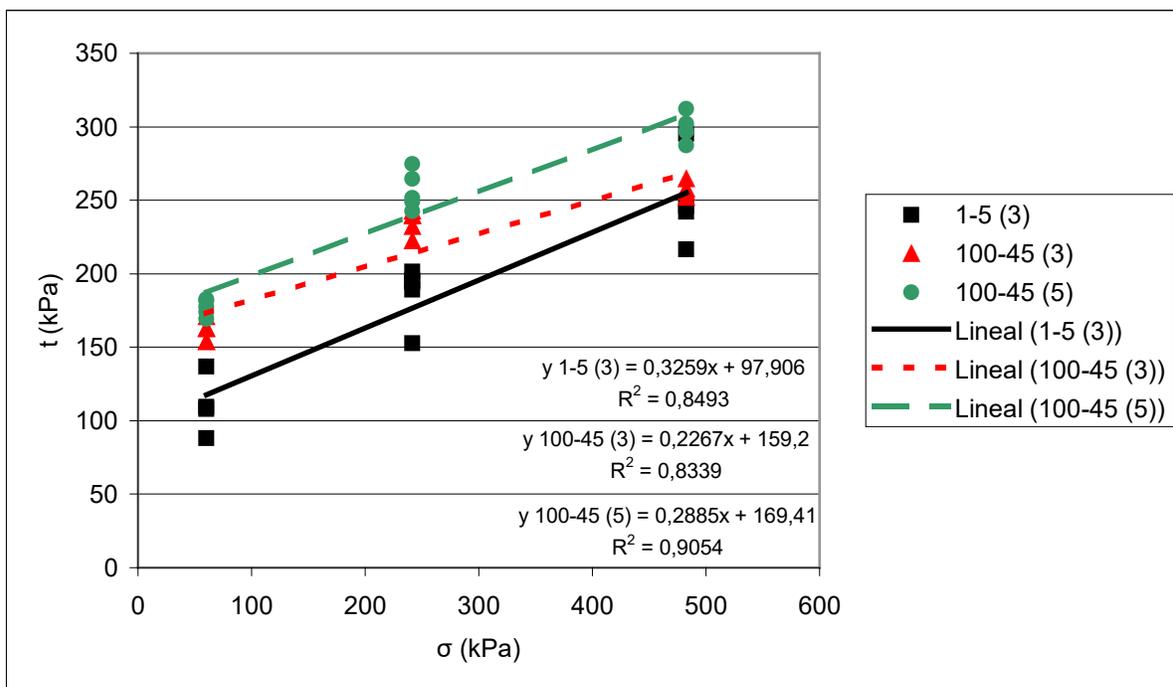


Figura 24: Rectas de Coulomb de Ozzano (Ustochrepts)

Los términos independientes de estas ecuaciones indican los valores de cohesión, mientras que las pendientes representan las tangentes de los ángulos de rozamiento interno. De aquí se deducen entonces ambos valores que son volcados y comparados en la Tabla 21.

Tabla 21: Comparación de regresiones de los valores de c y $tg\theta$ de las rectas de Coulomb

Suelo	Tratamiento	c (kPa)	$tg\theta$
Argese	1-5 (3)	222,75a	0,5877b
	100-45 (3)	209,06a	0,6079b
	100-45 (5)	299,34b	0,4958a
Cardone	1-5 (3)	157,00a	0,6942a
	100-45 (3)	153,84a	0,6966a
	100-45 (5)	206,151b	0,6821a
Carpi	1-5 (3)	174,38ab	0,3147a
	100-45 (3)	158,88a	0,4069b
	100-45 (5)	184,69b	0,3367a
Ozzano	1-5 (3)	97,91a	0,3259a
	100-45 (3)	159,20b	0,2267a
	100-45 (5)	169,41b	0,2885a

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Al obtenerse los resultados iniciales de mayor tensión cortante y mayor expansión para los tratamientos 100-45 (5) se trató de interpretar los resultados y justificarlos elaborando la siguiente hipótesis: cuando se trituraron los suelos previo al tratamiento de humedecimiento-compresión-corte, los mismos estaban secos a humedad ambiente (menos del 10%), con lo cual el tratamiento 100-45 (5) podría haber presentado agregados mucho más cementados y duros que, luego de molidos y tamizados con malla de 2 mm, resultasen en una distribución de agregados de mayor tamaño dentro del rango 0-2mm. La resistencia al corte podría haber sido mayor en el tratamiento 100-45 (5) debido al efecto de rodamiento de un agregado sobre otro, fenómeno conocido como dilatancia (Hillel, 1998; Spugnoli *et al.*, 2002). Al tener agregados de mayor tamaño en el tratamiento 100-45 (5), el rodamiento de uno sobre otro hubiese implicado una energía mayor. Asimismo, el rodamiento entre agregados de mayor magnitud, habría causado una mayor expansión o una menor compresión ante un mismo nivel de carga normal. Spugnoli y Melani (2005), han demostrado que a igualdad de dimensión de agregados, los sódicos son más resistentes y más densos mientras que, en general, los agregados más pequeños son más resistentes que los más grandes. La hipótesis del rodamiento de agregados fue refutada luego de planteadas las rectas de Coulomb, alegando que si efectivamente las diferencias hubiesen sido debidas al tamaño de agregados, debiera haber sido mayor el trabajo demandado para el desplazamiento de las partículas entre sí, lo cual se hubiera reflejado en mayores ángulos de rozamiento interno. Sin embargo, a la vista de los resultados, los ángulos de rozamiento interno no variaron y la mayor

resistencia al corte para los tratamientos 100-45 (5) se debe a una mayor cohesión. Por todo esto se explicó la variación en la tensión cortante en función del componente cohesivo.

Se puede observar que el efecto de la sodicidad ha sido aumentar el nivel de cohesión de todos los suelos sin excepción (con diferencias significativas en todos menos en Carpi). Esto se puede evidenciar en los gráficos de las rectas de Coulomb donde se aprecia que las rectas de los tratamientos 100-45 (5) poseen una mayor ordenada al origen con respecto al tratamiento 1-5 (3). En las tangentes del ángulo de roce no existen diferencias (visible en las pendientes de las rectas de Coulomb que aparecen como líneas paralelas) salvo en Argese. Se puede concluir que el efecto de la sodicidad sobre los suelos será aumentar la cohesión lo que redundará en un aumento de la resistencia al corte de los mismos. Spugnoli y Melani (2005) reportaron que los suelos más sódicos presentaron valores de fricción interna y cohesión más altos.

Ferrer y Ourracariet (1996) encontraron que con baja conductividad eléctrica (CE) y alta relación de absorción de sodio (RAS) en el agua de riego se reduce la infiltración del agua, posibilitando la formación de sellos superficiales, hecho que altera la permeabilidad e incrementa la erosión. Según estos autores se produciría una pérdida de cohesividad de las partículas del suelo que se debería a la modificación del espesor de la doble capa difusa de la superficie de los coloides del suelo, ante la presencia de Na^+ . Estos autores citan una pérdida de cohesividad de las partículas del suelo ante el riego con aguas sódicas en contraposición a lo encontrado en esta tesis de aumento de cohesión.

Se recurrió al modelo de cohesión molecular y superficial planteado por Sánchez-Girón (1996) para intentar explicar los mayores valores de cohesión en el tratamiento 100-45 (5). Dicho tratamiento alcanzó un alto PSI y una CE moderada. Esto habría posibilitado al Na^+ ejercer su influencia en el material, saturando el complejo de intercambio y generando una pérdida de cohesión molecular en húmedo, debido a que es un catión monovalente y de gran radio iónico hidratado. La CE, como se ha enunciado previamente, se ha mantenido en un valor cercano a 1, por lo que no habría podido contrarrestar el efecto dispersivo del Na^+ . Todo esto habría conducido a un aumento en la distancia de la doble capa difusa, generando en definitiva una pérdida de cohesión molecular en húmedo, con lo que la razón de la alta cohesión encontrada en el tratamiento 100-45 (5) debería buscarse en el parámetro cohesión superficial.

El aumento en la distancia de la doble capa del tratamiento 100-45 (5), habría resultado finalmente en una tendencia a la dispersión, destruyéndose los poros mayores con el consecuente incremento de los poros pequeños, de menor diámetro y mayor capilaridad y tensión superficial, lo cual habría redundado en un aumento de la cohesión superficial. Por lo tanto, el aumento de la tensión cortante verificado en los tratamientos salino-sódicos, podría adjudicarse a un aumento de la cohesión superficial. Si bien la cohesión molecular en el momento del corte no habría sido importante (debido a la humedad del 20% con que se realizó el corte),

la presencia del Na^+ habría favorecido el predominio de las fuerzas de repulsión determinando un incremento de los coloides dispersos, con generación de poros pequeños, que derivaría en una mayor cohesión superficial y en una mayor tensión cortante.

En términos de operaciones de campo estos resultados pueden explicar el aumento del requerimiento energético en las operaciones de labranza sobre este tipo de suelos (Spugnoli *et al.*, 2002). Cuando estos suelos, sin estructura, con poros de pequeñas dimensiones, pretendan ser roturados con porcentajes de humedad cercanos al límite de retracción, estarán muy compactados, sus agregados tendrán una gran resistencia interna, y el trabajo necesario para su rotura será muy elevado. Cuando se pretenda labrarlos con mayores porcentajes de humedad, la dificultad será que muy rápidamente se vuelve significativa la tensión superficial de los meniscos de agua. La cohesión superficial y la adhesión suelo-metal serán los responsables de la elevada energía demandada.

Con respecto a la transitabilidad de los suelos afectados por el sodio, podría hipotetizarse que la misma sería mejor ya que al presentar un mayor componente cohesivo, el esfuerzo de corte que debería realizar la rueda u oruga para que el suelo llegue a fallar debería ser mayor, con lo que el patinamiento se vería reducido. Asimismo las características porosas de esta tipología de suelos (con predominancia de microporos, ocupados principalmente por agua) los volvería menos compresibles (encontrado como tendencia en este trabajo de Tesis) por lo que poseerían una mayor capacidad portante. No obstante, esto que inicialmente aparece como ventajoso, debe analizarse como un conjunto teniendo en cuenta que el suelo agrícola no solo debe proveer sustento a las máquinas que por el deben transitar, sino que debe reunir las condiciones apropiadas para el buen crecimiento de los cultivos. Paradójicamente, las condiciones óptimas para el tránsito se oponen a las deseables para la producción de los cultivos. Así, para el tránsito sería deseable un sustrato duro, poco deformable, poco poroso donde la rueda u oruga encontrase reacción. Para un adecuado establecimiento de los cultivos en cambio, es deseable un suelo con una gran porosidad (para el adecuado intercambio de agua y aire), blando y deformable (para permitir la germinación y poder ser penetrado por las raíces). Es por esta razón que puede asumirse que si un suelo es afectado por el sodio, mejora su transitabilidad y simultáneamente empeora su potencial productivo.

Dado que el parámetro que se ha modificado de la ecuación de Coulomb es la cohesión permaneciendo el ángulo de rozamiento interno invariable con las diferentes soluciones de riego, es previsible que el efecto de la sodicidad varíe con la condición textural de los suelos, siendo mucho más susceptibles a la problemática los suelos de textura fina ya que el componente cohesivo se halla principalmente en las partículas de arcilla y limo, estando prácticamente ausente en las arenas. Richards (1956), a pesar de no establecer rangos explícitos, sugirió efectos de la textura, el área superficial y tipo de mineral arcilloso, contenido de silicatos y materia orgánica, sobre la acción del Na^+ en la problemática de la dinámica del agua en el suelo. Texturas finas o ricas en limo (más de 50%),

arcillas expandibles como la montmorillonita y bajo contenido de silicatos y materia orgánica, agravarían la problemática sódica. Las diferencias encontradas entre los distintos suelos se deberían a las diferencias de textura, tipo de arcillas, carbonatos y materia orgánica presente en los mismos.

Con respecto a la friabilidad de los suelos sódicos, Guarnieri *et al.* (2005) encontraron que los suelos regados con soluciones con alto PSI disminuyeron su ventana de labor, disminuyendo el % de humedad del límite líquido y del límite plástico con lo cual más rápidamente se alcanza el comportamiento plástico del suelo y se reduce el período elástico o friable en el cual las labranzas son efectivas. Shanmuganathan y Oades (1982) encontraron que el aumento en la cantidad de arcilla dispersa en los suelos puede incrementar en gran medida la resistencia de los mismos y disminuir la friabilidad. Vázquez (2003) en cambio, comparando suelos regados y no regados encontró que el pH de los sectores regados fue mayor que el de los testigos y esto se relacionó con mayores retenciones hídricas a succiones de 0,03 y 1,5 MPa, así como con mayores límites de Atterberg. Smith *et al.* (1985) hallaron que la sodicidad y la salinidad, comunes en suelos secos de regiones semiáridas, pueden respectivamente aumentar o disminuir los límites de Atterberg. Esto demuestra que modificaciones químicas del extracto de saturación causadas por el riego, son responsables de alteraciones físicas derivadas de la arquitectura porosa del suelo, tales como la retención hídrica dentro del rango del agua útil y los límites de Atterberg.

De acuerdo a los resultados de mayor cohesión que se han encontrado en el presente trabajo, podría hipotetizarse que dichos aumentos se deben a un cambio en su ordenamiento poroso que conduce a un desplazamiento de la curva de cohesión superficial del tratamiento 100-45 (5) con respecto al 1-5 (3). El pico de la curva del 100-45 (5) se encontraría desplazado hacia la izquierda con lo cual a una menor humedad se estaría alcanzando el límite plástico en coincidencia con Guarnieri *et al.* (2005).

11.5 Análisis de los resultados en el marco de la Teoría del Estado Crítico.

11.5.1 Líneas de consolidación virgen

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 másico = $1/d_{ap}$ (valor inverso de la densidad aparente) y $X = TN =$ Tensión Normal aplicada. Normalmente se dibujan las líneas de consolidación virgen en gráficos semilogarítmicos colocando en el eje de las X el \ln de la tensión normal y en el de las Y el volumen másico (cm^3/g). A continuación se grafican las líneas de consolidación virgen de los 4 suelos.

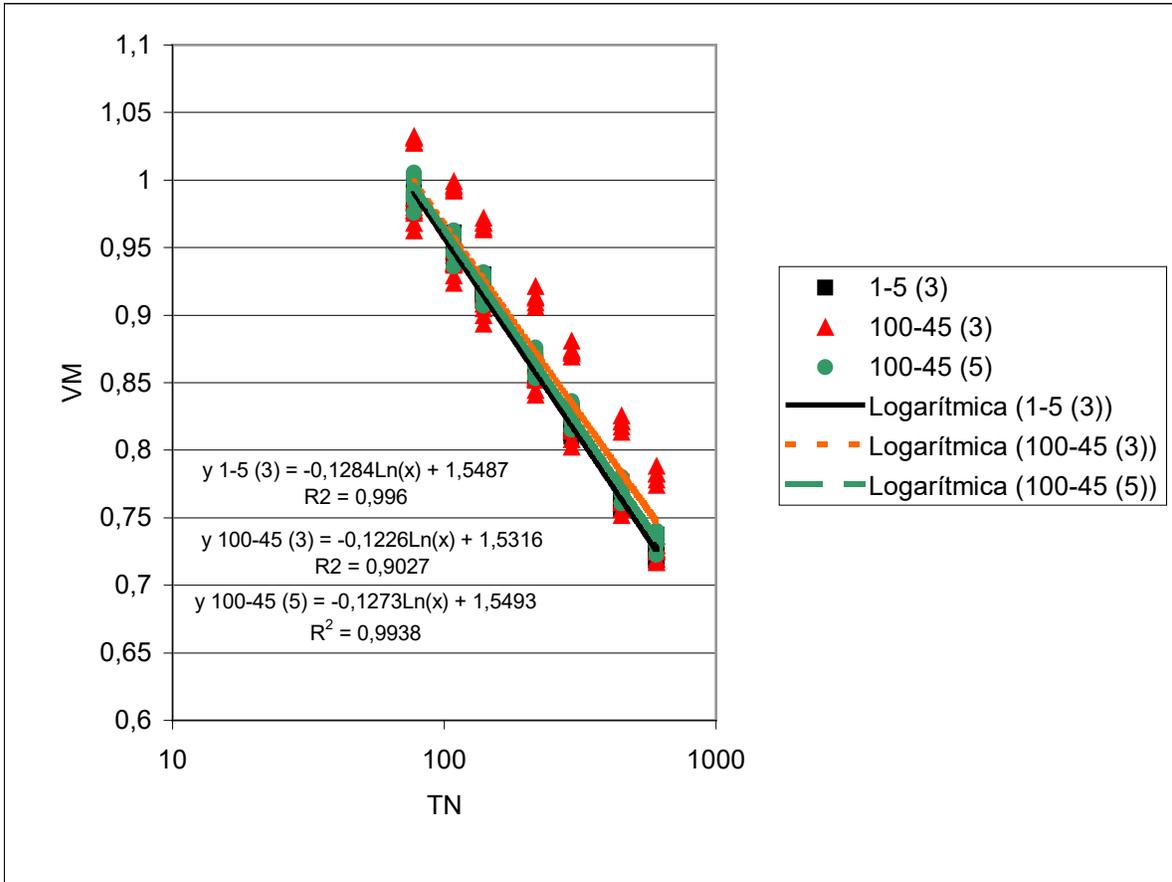


Figura 25: Líneas de Consolidación Virgen de Argese (Haploxeralf)

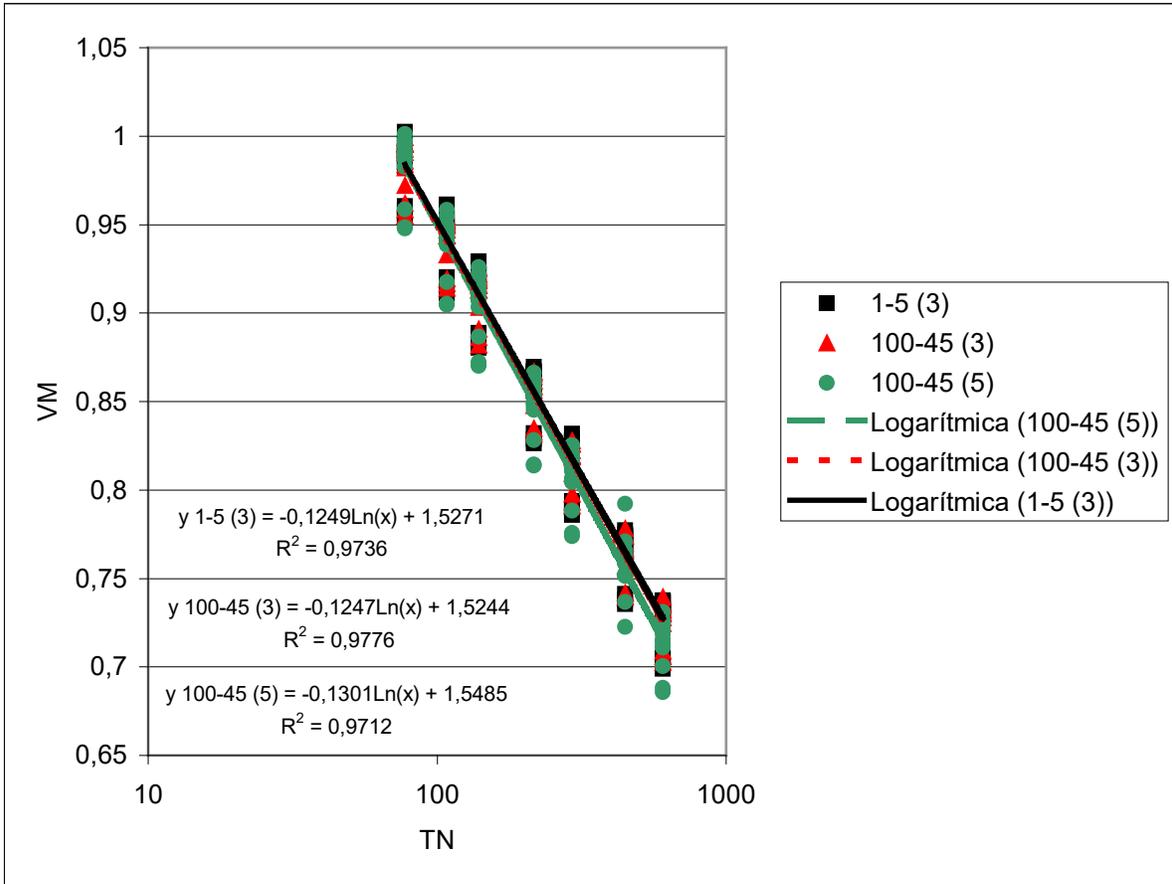


Figura 26: Líneas de Consolidación Virgen de Cardone (Haploxeralf)

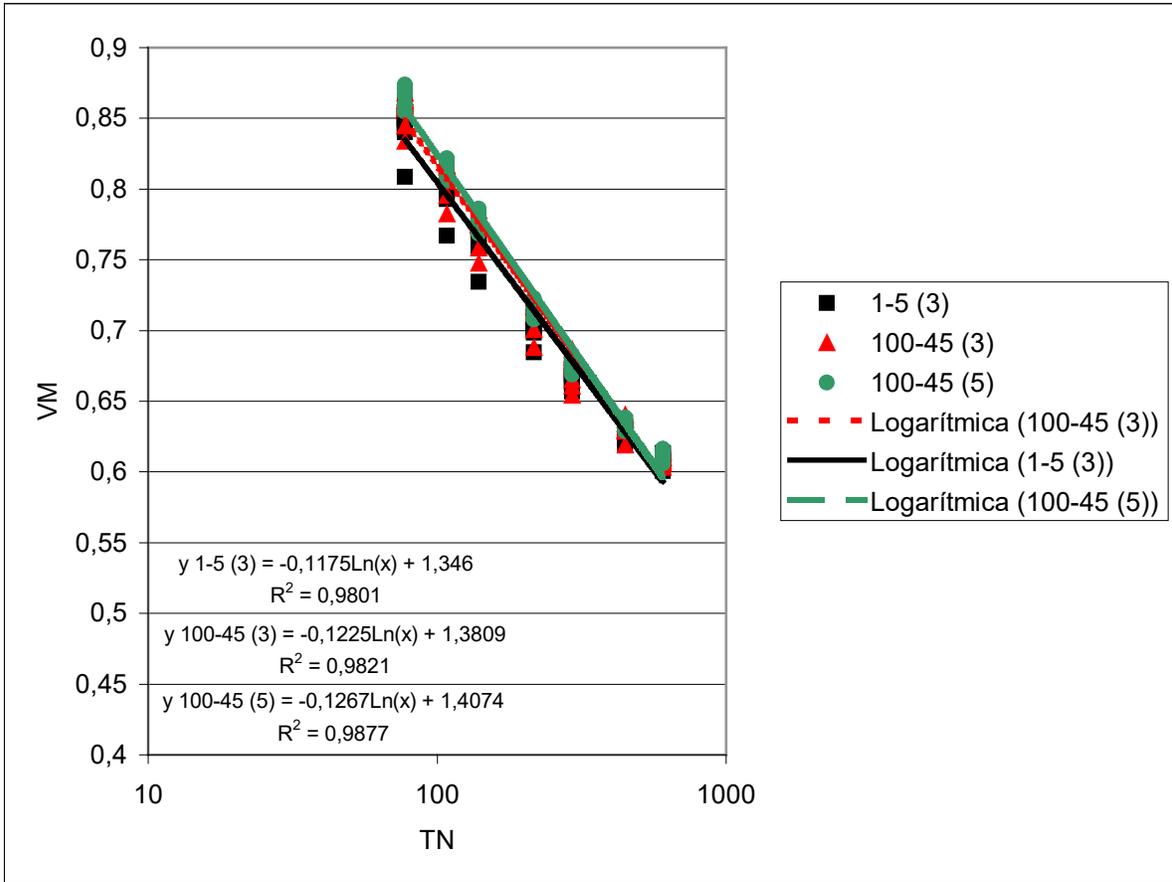


Figura 27: Líneas de Consolidación Virgen de Carpi (Ustochrepts)

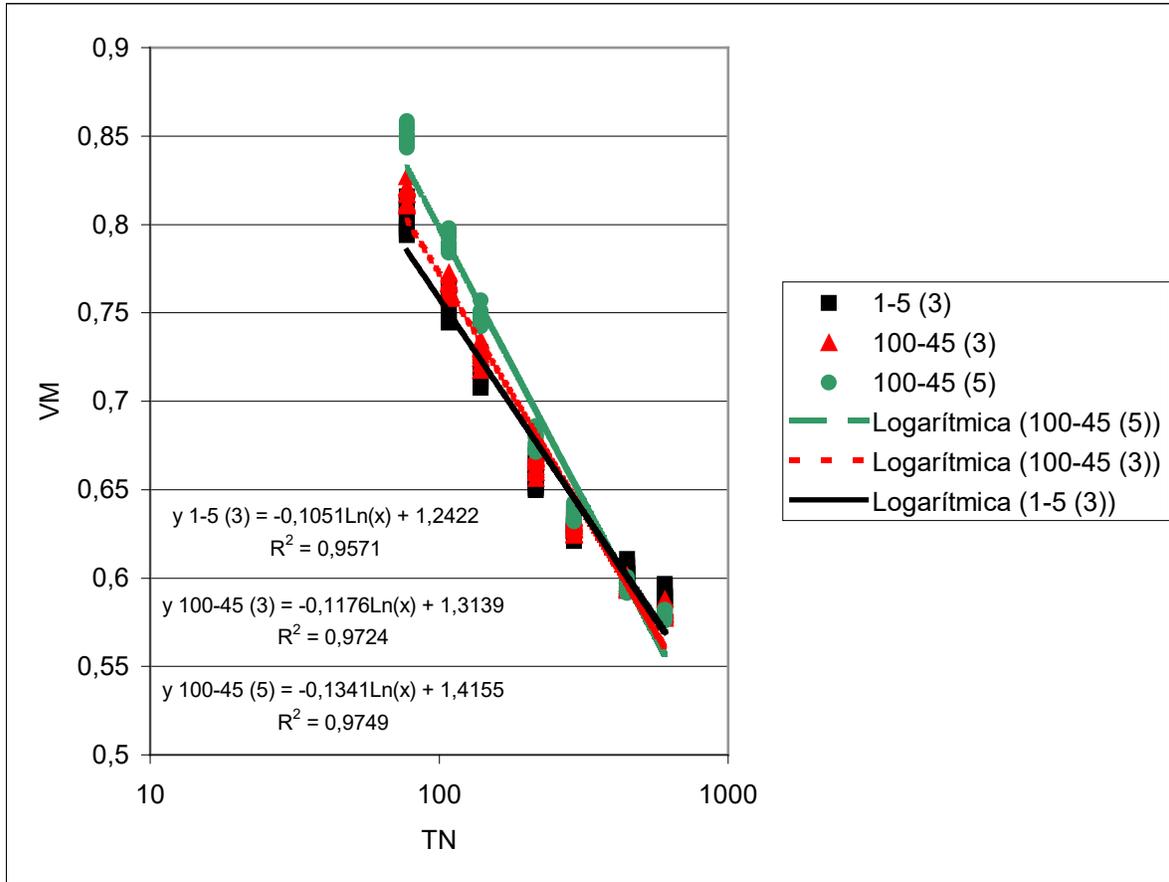


Figura 28: Líneas de Consolidación Virgen de Ozzano (Ustochrepts)

A continuación se analizaron las diferencias estadísticas entre tratamientos de los valores de N y λ (término independiente y pendiente de la línea de consolidación virgen) mediante comparación de regresiones. Las mismas se visualizan en la Tabla 22.

Tabla 22: Comparación de regresiones de los valores de N y λ de las líneas de consolidación virgen

Suelo	Tratamiento	N	λ
Argese	1-5 (3)	1,5486a	-0,1284a
	100-45 (3)	1,5316a	-0,1226a
	100-45 (5)	1,5493a	-0,1273a
Cardone	1-5 (3)	1,5271a	-0,1249a
	100-45 (3)	1,5244a	-0,1247a
	100-45 (5)	1,5485a	-0,1301a
Carpi	1-5 (3)	1,3460a	-0,1175a
	100-45 (3)	1,3809b	-0,1225b
	100-45 (5)	1,4074c	-0,1267b

Ozzano	1-5 (3)	1,2422a	-0,1051a
	100-45 (3)	1,3139b	-0,1176b
	100-45 (5)	1,4155c	-0,1341c

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Al analizar los resultados de la Tabla 22 puede observarse que existen diferencias significativas tanto en el volumen másico inicial como en la pendiente de la recta en los Inceptisoles (Carpi y Ozzano) teniendo el tratamiento 100-45 (5) mayores valores de ambos parámetros. En los Alfisoles (Argese y Cardone) no existen diferencias significativas. Puede establecerse entonces que en los Inceptisoles, existe una mayor velocidad de compresión del tratamiento 100-45 (5) con respecto al 1-5 (3). Esa mayor velocidad de compresión permitió que un mayor volumen másico inicial para 100-45 (5) se tradujese en un volumen másico final similar. Spugnoli y Melani (2005) en cambio, encontraron una mayor pendiente (λ) y un mayor término independiente (N) para el tratamiento menos sódico cuando trabajaron con los tamaños de agregados mayores (2 a 5 mm de diámetro), no hallando diferencias en los tamaños de agregados menores (menores a 2 mm de diámetro).

11.5.2 Regresiones entre las relaciones de tensión y las relaciones de volumen

Con los datos de relación de tensión (relación entre la tensión normal al momento del corte y la tensión normal máxima previa de 603kPa) y relación de volumen (relación entre la diferencia de volumen posterior y previo al corte con el volumen previo al corte) se realizaron las regresiones para cada suelo y tratamiento. Para calcular la relación de volumen se utilizó la ecuación: $RV = (V_f - V_i) / V_i = h_f \cdot A_f - h_i \cdot A_i / h_i \cdot A_i$. Como A_f y A_i son iguales, (pues es el área de la celda de corte que es la misma al inicio y al final), se simplifican quedando $h_f - h_i / h_i$ siendo h = altura de la muestra.

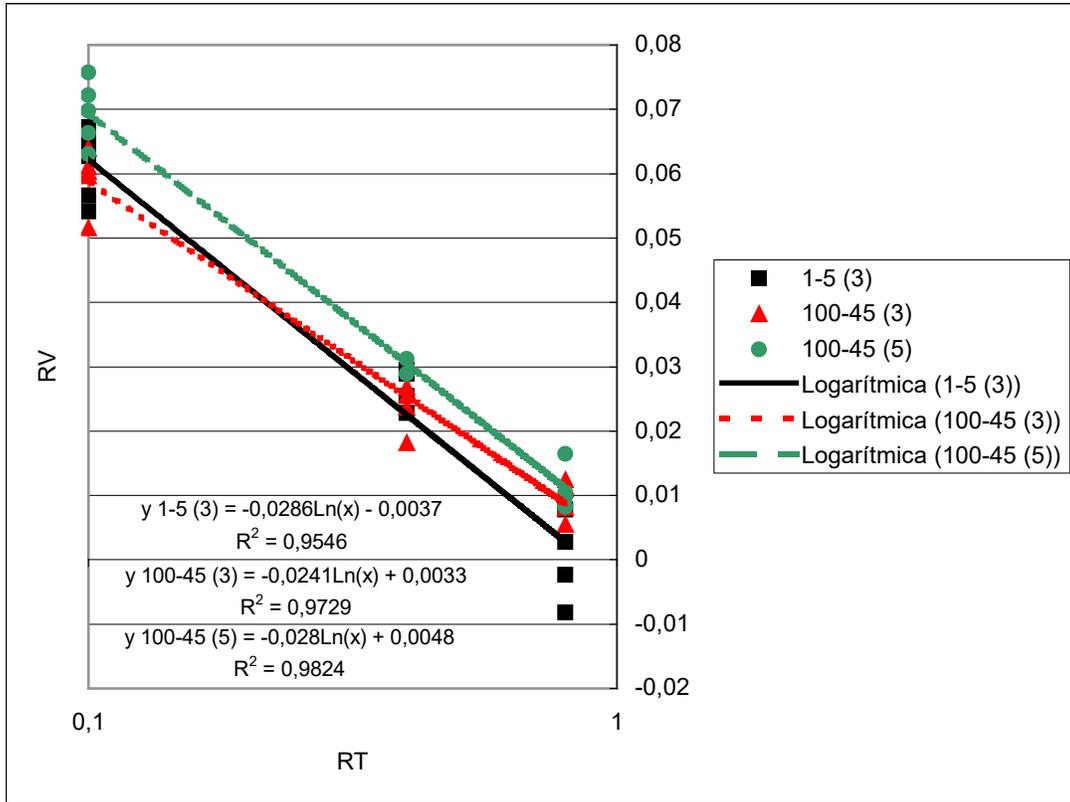


Figura 29: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Argese (Haploxeralf)

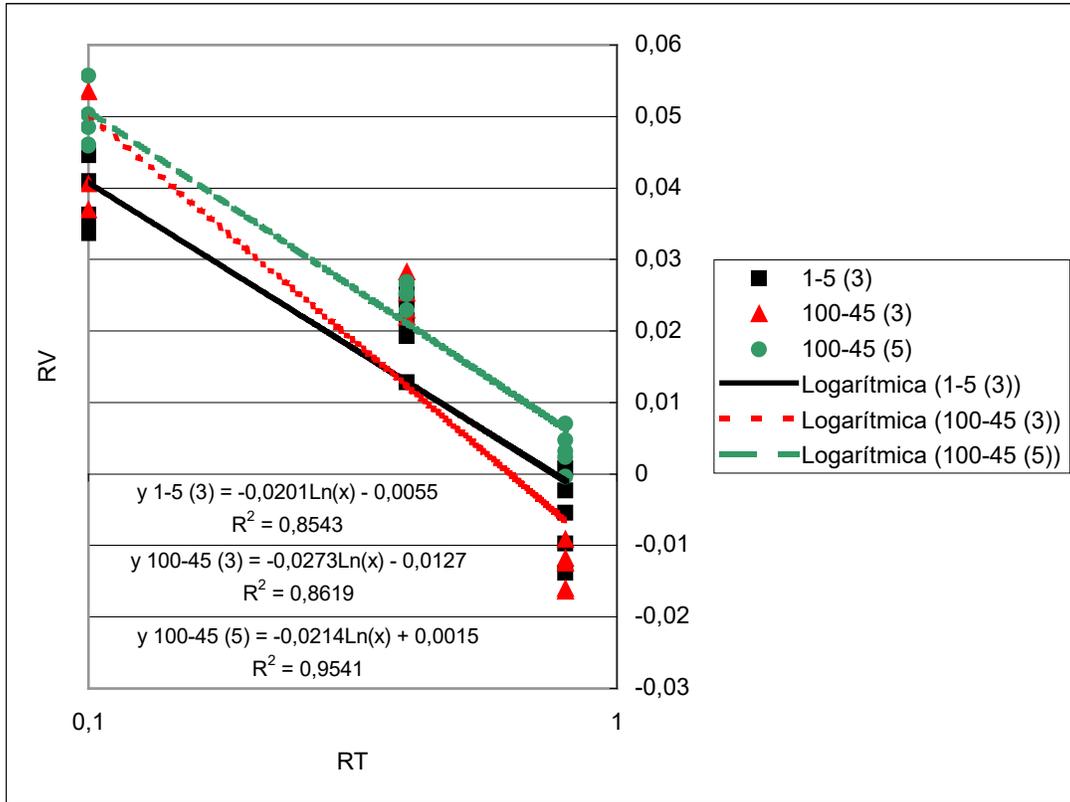


Figura 30: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Cardone (Haploxeralf)

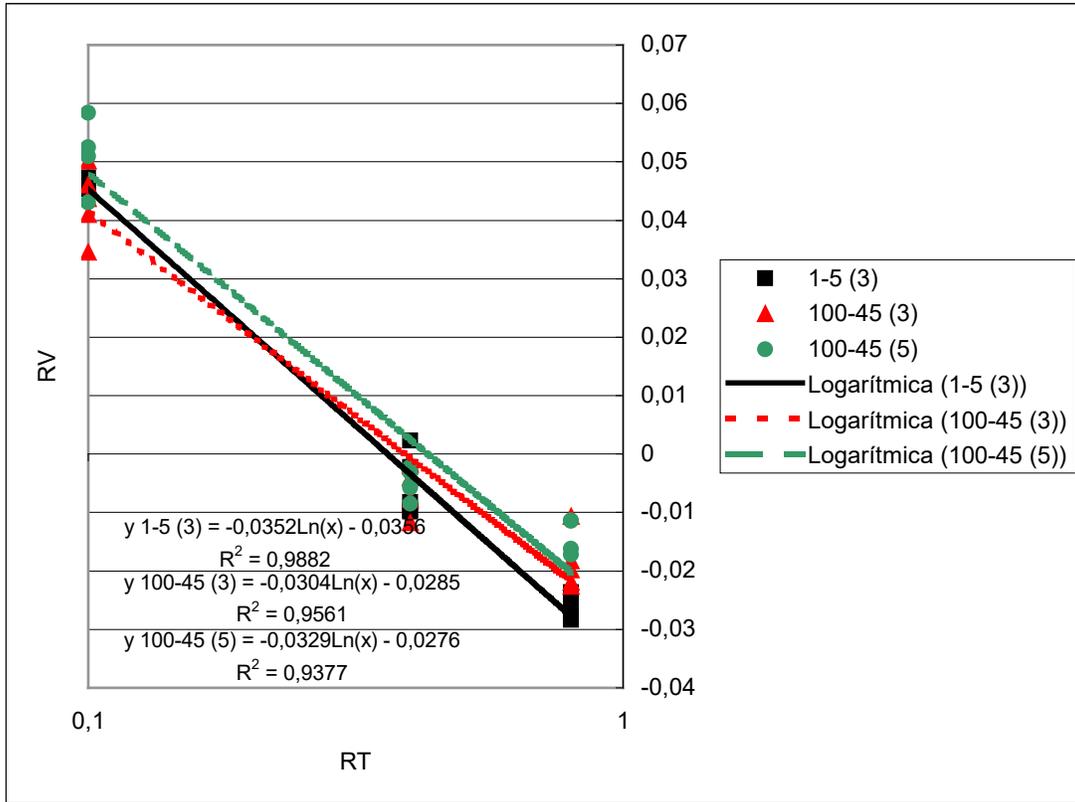


Figura 31: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Carpi (Ustochrepts)

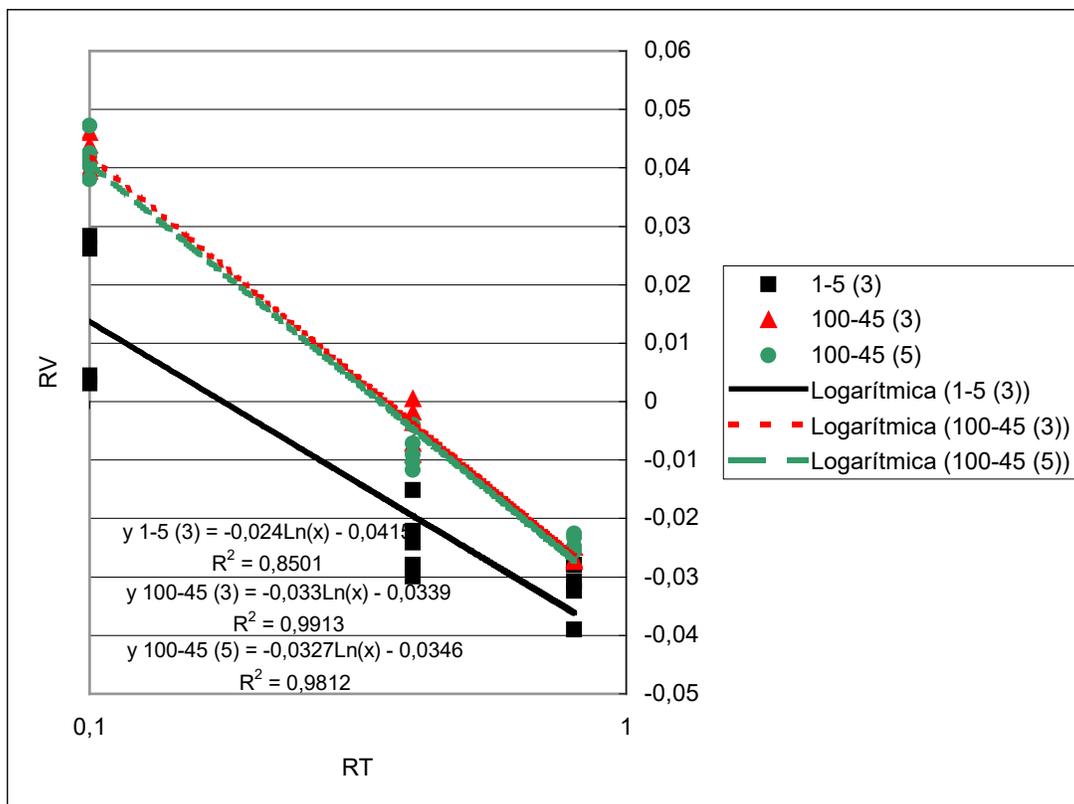


Figura 32: Regresiones Relación de Volumen – Relación de Tensión de Ozzano (Ustochrepts)

Puede observarse en los gráficos que el mayor alejamiento entre las rectas de los tratamientos 1-5 (3) y 100-45 (5) se dio en Ozzano y el menor en Carpi (ambos Inceptisoles).

Se realizaron las comparaciones de las regresiones para determinar diferencias en términos independientes (a) y pendientes (b) de las rectas para cada tratamiento.

Tabla 23: Comparación de regresiones de los valores de a y b de la líneas de regresión Relación de Volumen – Relación de Tensión

Suelo	Tratamiento	a	b
Argese	1-5 (3)	-0,0037a	- 0,0286b
	100-45 (3)	0,0033b	- 0,0241a
	100-45 (5)	0,0048b	- 0,0280b
Cardone	1-5 (3)	-0,0055ab	- 0,0201a
	100-45 (3)	-0,0127a	- 0,0273a
	100-45 (5)	0,0015b	- 0,0214a
Carpi	1-5 (3)	-0,0356a	- 0,0352a
	100-45 (3)	-0,0285b	- 0,0304b
	100-45 (5)	-0,0276b	- 0,0329ab

Ozzano	1-5 (3)	-0,0415a	- 0,0240a
	100-45 (3)	-0,0339a	- 0,0330b
	100-45 (5)	-0,0346a	- 0,0327b

Valores seguidos por letras distintas en sentido vertical denotan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Los resultados muestran diferencias significativas en los términos independientes de los Alfisoles (Argese y Cardone) y de Carpi presentando los tratamientos 100-45 (5) mayores valores que 1-5 (3). Las pendientes no muestran diferencias significativas entre 1-5 (3) y 100-45 (5) salvo para Ozzano. La ausencia de diferencias entre pendientes implicará que las rectas sean paralelas y los mayores valores de término independiente de 100-45 (5) determinarán que este tratamiento alcance el estado crítico (la recta corte a RV en 0) a mayores valores de RT. Esto implicará que el dominio supercrítico de los suelos sódicos se incrementará con respecto al de los suelos no salinizados-sodificados, es decir que la probabilidad de incrementar su volumen con el corte aumentará. Con las ecuaciones de regresión se determinó el porcentaje de la tensión normal máxima soportada antes del corte (603 kPa) a que se debía someter a la muestra durante el corte para que no existiese compresión o expansión (estado crítico) con el mismo. Recuérdese que LEC y LCN son representadas en un gráfico semilogarítmico $v-\ln(p)$ por dos líneas rectas paralelas (Hettiaratchi, 1987) definidas por las ecuaciones:

$$LEC = v = \Gamma - \lambda \cdot \ln(p)$$

$$LCN = v = N - \lambda \cdot \ln(p)$$

Obsérvese que la pendiente de las dos es la misma (λ) y también el signo negativo de ambas lo que las hace paralelas. Los porcentajes de dicha tensión normal y los valores que representan (en kPa) son volcados en la Tabla 24.

Así, para el tratamiento 1-5 (3) de Argese cuya ecuación es:

$$RV = -0,003663 - 0,02859 \cdot \ln RT$$

se iguala RV a cero (ya que no hay variación de volumen con el corte y volumen inicial es igual a volumen final) y se despeja RT

$$RT = \text{inv Ln} (+0,003663/-0,02859)$$

$$RT_{AR1-5(3)} = 0,8786 = 87,86\%$$

Tabla 24: Porcentaje de la tensión normal máxima a la que se alcanza el estado crítico

Suelo	Tratamiento	Porcentaje (%)	Tensión (kPa)
Argese	1-5 (3)	87,86	530,2
	100-45 (3)	114,67	691,9
	100-45 (5)	118,7	716,3
Cardone	1-5 (3)	76,06	459,0
	100-45 (3)	62,8	379,0
	100-45 (5)	107,26	647,2
Carpi	1-5 (3)	36,37	219,5
	100-45 (3)	39,16	236,3
	100-45 (5)	43,22	260,8
Ozzano	1-5 (3)	17,74	107,0
	100-45 (3)	35,8	216,0
	100-45 (5)	34,71	209,4

Los Inceptisoles alcanzan el estado crítico antes que los Alfisoles.

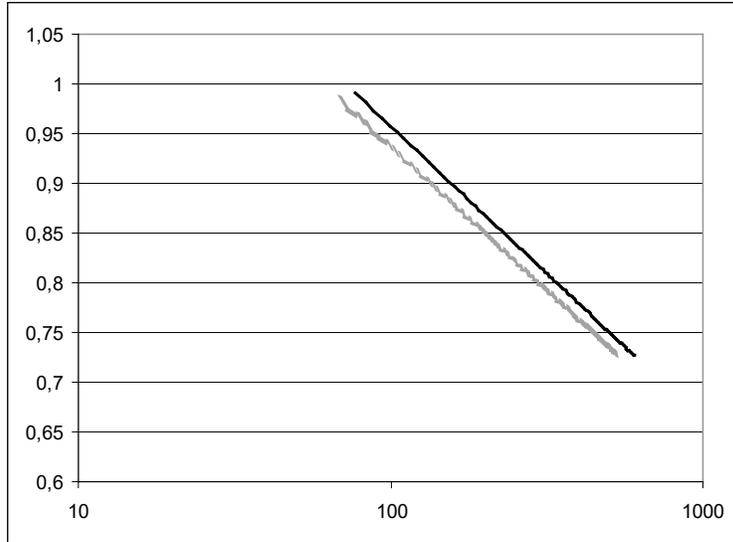
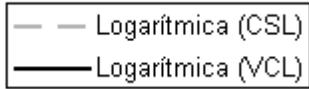
Puede verse que en todos los suelos el tratamiento 1-5 (3) alcanzó el estado crítico con menores valores absolutos de tensión normal estando las diferencias significativas en Cardone y Ozzano. Nuevamente, con estos resultados puede interpretarse que los suelos sódicos alcanzan el estado crítico a mayores valores de tensión normal lo que implica que la probabilidad de recibir compresiones adicionales al ser cortados disminuye con respecto a los no sódicos (aumenta la probabilidad de expandirse con el corte, aumenta el dominio supercrítico). De acuerdo a Spugnoli *et al.* (2002) el mayor comportamiento expansivo registrado por los suelos altamente saturados con Na^+ muestra aparentemente un mejoramiento en la respuesta del suelo a las tensiones externas aplicadas. Indirectamente, esto podría sugerir una situación positiva ante las operaciones de labranza, que podría balancear la alta energía requerida para roturar el suelo (alta resistencia al corte). En igual sentido, Spugnoli y Melani (2005) reportaron que un suelo más sódico, en las clases mayores de agregados, presentó una región subcrítica menor. El aumento del espacio supercrítico, es decir la mayor tendencia expansiva del tratamiento 100-45 (5), podría explicarse recurriendo al modelo de pequeños poros que presentaría este tratamiento, en el cual sería difícil para las partículas mayores encontrar nuevos huecos donde acomodarse para seguir comprimiéndose.

11.5.3 Líneas de estado crítico

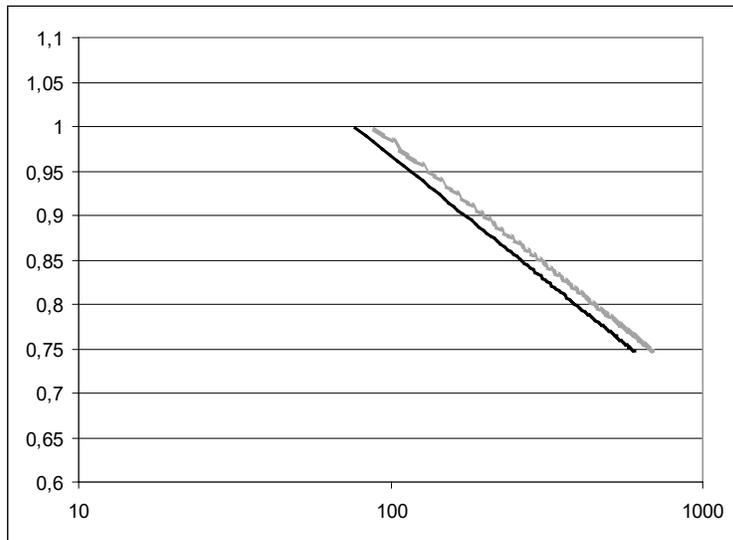
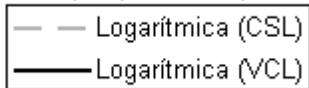
Habiendo obtenido las líneas de consolidación virgen para todos los suelos y tratamientos y conocida la posición de las líneas de estado crítico con respecto a las mismas, se trazaron las líneas de estado crítico paralelas a las líneas de consolidación virgen. En los gráficos puede observarse el mayor acercamiento de las líneas de estado crítico del tratamiento 100-45 (5) con respecto a 1-5 (3) lo que implica que dicho tratamiento ha incrementado su espacio supercrítico con

respecto a 1-5 (3), menos sodificado. En el tratamiento 100-45 (5) de Argese y Cardone (Alfisoles) y en el 100-45 (3) de Argese, el acercamiento ha sido tal que la línea de estado crítico, ha superado a la línea de consolidación virgen incrementando el estado supercrítico y anulando al subcrítico, no existiendo posibilidad de que dichos suelos se compriman al recibir tensiones cortantes. De acuerdo a la teoría del estado crítico, la línea del estado crítico es paralela y puede acercarse o alejarse a la línea de consolidación virgen pero nunca la puede sobrepasar. La imposibilidad de comprimirse con el corte puede ser explicada por la diferencia de humedad existente en los momentos de compresión y de corte. La compresión se realizó a un 23% de humedad y luego de la misma se permitió que las muestras perdieran un 3% de humedad y se estabilizaran, pretendiendo con esto lograr un proceso de cementación. El porcentaje de humedad en el cual se realizó el corte (20%) fue entonces menor que el presente durante la compresión uniaxial. Esta pérdida de humedad puede explicar la dificultad de compresión de las partículas durante el corte. Es conocido (y utilizado en el ensayo Proctor de compactación del suelo), que el contenido de agua del suelo juega un rol importante en su nivel de compactabilidad, existiendo una humedad óptima en la cual la densidad alcanzada luego de la compactación es máxima. A mayores y menores valores de humedad que el valor óptimo, la densidad cae. Por encima de dicho valor, la densidad no alcanza valores máximos debido a que parte de la energía de compactación se disipa tratando de comprimir el agua adsorbida (que es incompresible). Por debajo de la humedad óptima de compactación del suelo, la densidad alcanzada cae a medida que cae la humedad, ya que la escasez de agua evita que se neutralicen las cargas eléctricas de las caras de las arcillas y comienzan a predominar uniones cara-borde (los bordes de las arcillas presentan cargas positivas) cuya fuerza de unión es superior a las uniones cara-cara (uniones predominantes a medida que aumenta la humedad) Lambe (1958) citado por Gulhati (1978). En los momentos de compresión y corte, se utilizaron humedades inferiores a la humedad de máxima compactabilidad, siendo la humedad del corte (20%) menor a la de la compresión (23%), hecho que explicaría las diferencias de compresibilidad encontradas. No obstante este resultado, debe tenerse en cuenta que todos los tratamientos recibieron el mismo procedimiento de humectación-deseccación, por lo que las diferencias encontradas entre los distintos tratamientos deben ser adjudicadas a los mismos. Asimismo puede verificarse que la tendencia del acercamiento de la LEC a la LCN del tratamiento 100-45 (5) con respecto al 1-5 (3) se observa en los 4 suelos.

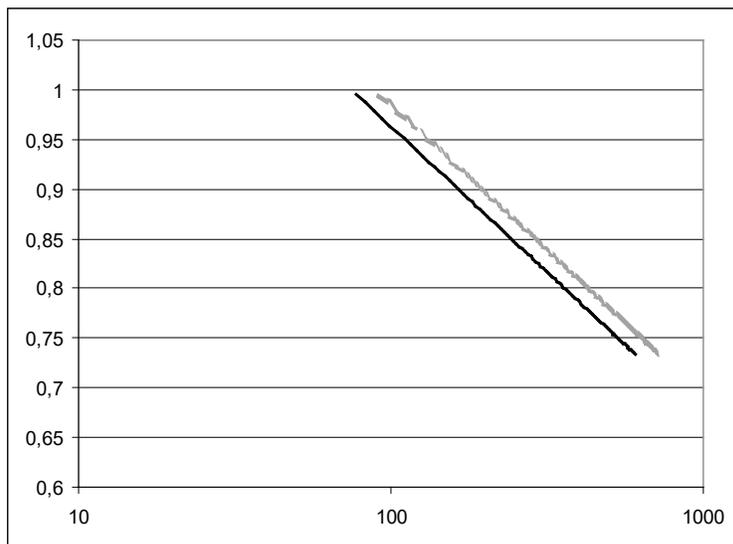
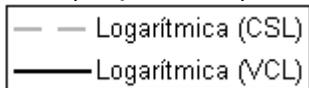
Argese 1-5 (3)
(Haploxeralf)



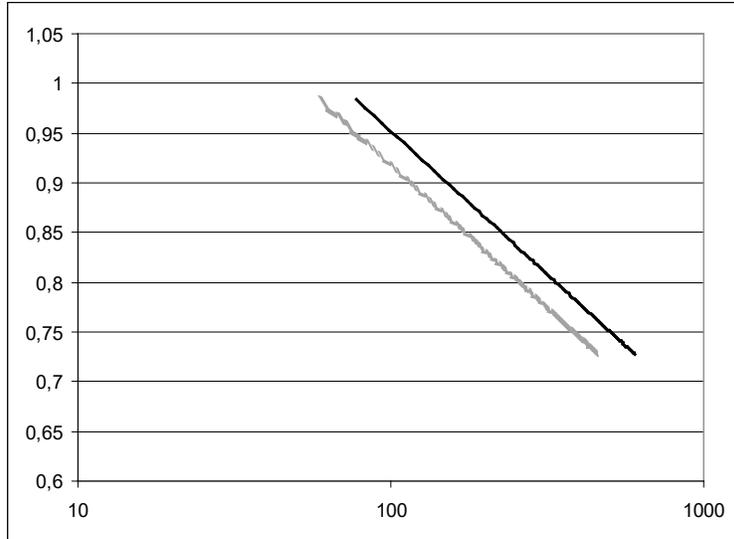
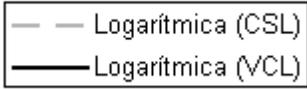
Argese 100-45 (3)
(Haploxeralf)



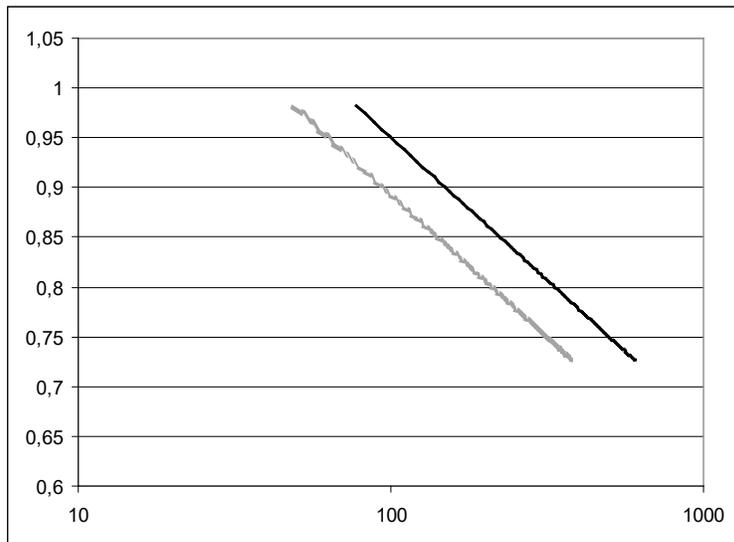
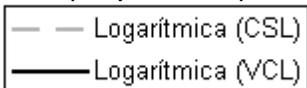
Argese 100-45 (5)
(Haploxeralf)



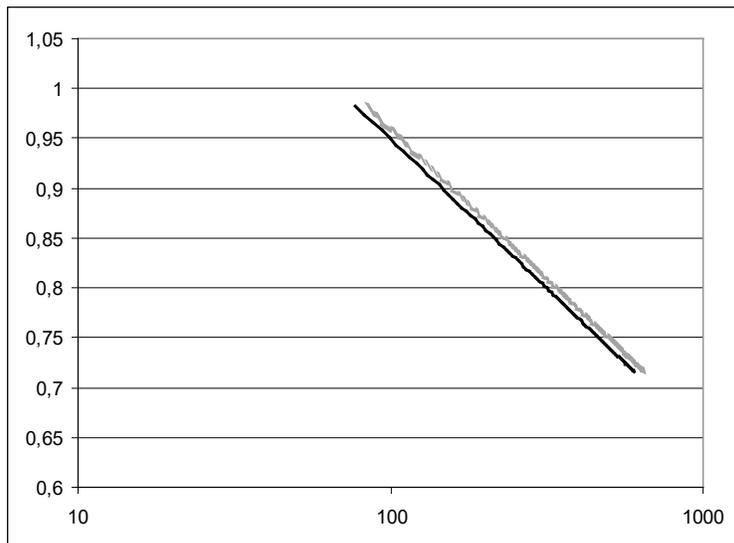
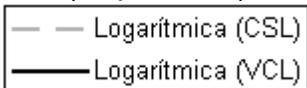
Cardone 1-5 (3)
(Haploxeralf)



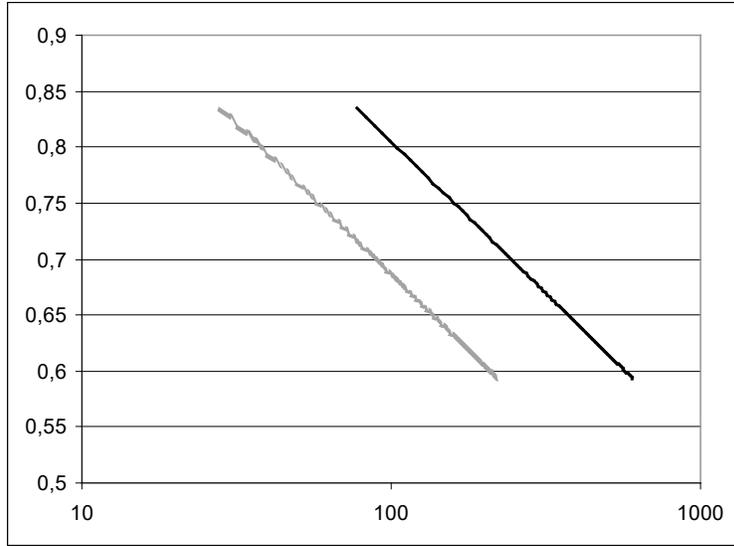
Cardone 100-45 (3)
(Haploxeralf)



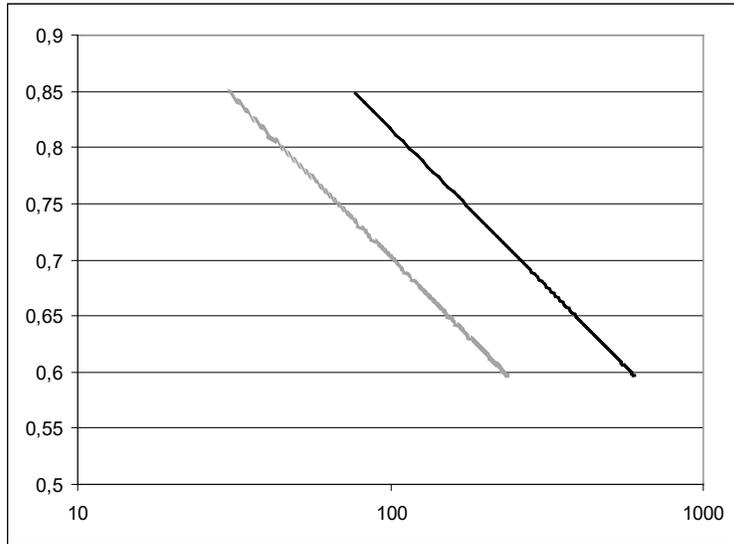
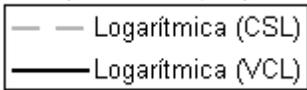
Cardone 100-45 (5)
(Haploxeralf)



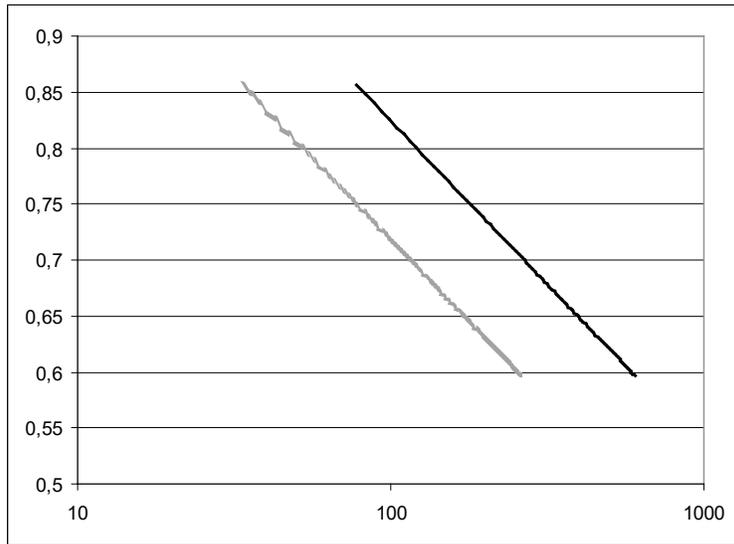
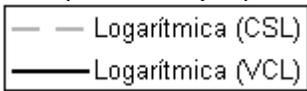
**Carpi 1-5 (3)
(Ustochrepts)**



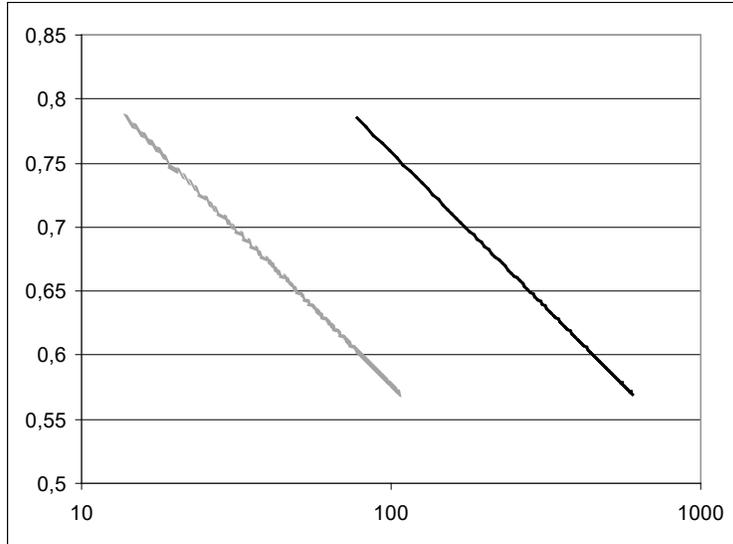
**Carpi 100-45 (3)
(Ustochrepts)**



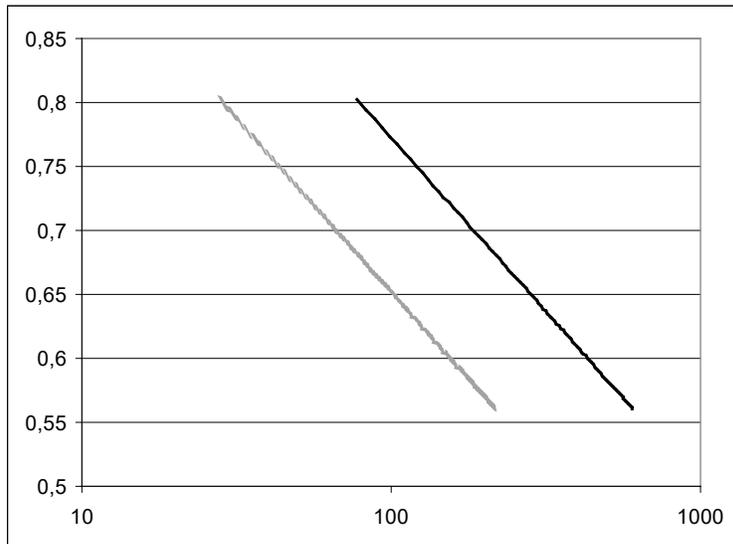
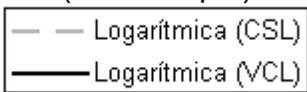
**Carpi 100-45 (5)
(Ustochrepts)**



Ozzano 1-5 (3)
(Ustochrepts)



Ozzano 100-45 (3)
(Ustochrepts)



Ozzano 100-45 (5)
(Ustochrepts)

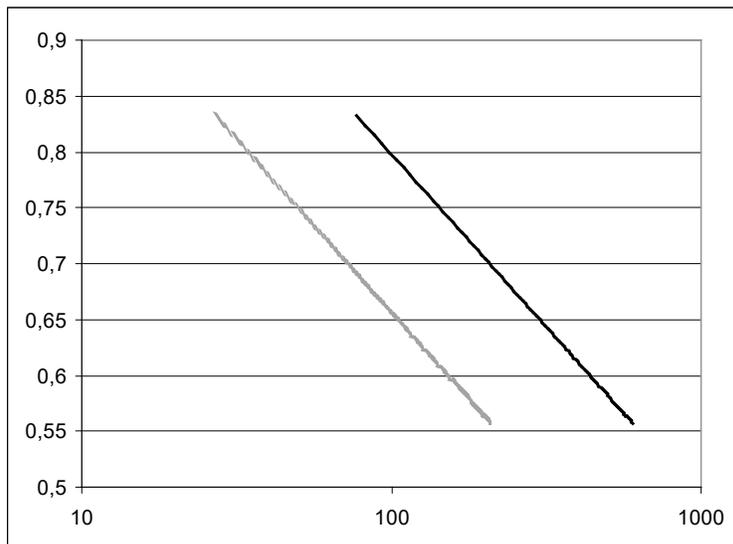


Figura 33 a 44: Líneas de estado crítico de todos los suelos y tratamientos

12 CONSIDERACIONES FINALES

Los avances tecnológicos del siglo pasado, a los que se siguen sumando los del presente, han permitido incrementar el rendimiento de los cultivos. La utilización de maquinaria más potente ha posibilitado realizar las labores culturales en menor tiempo y a menor costo, la utilización de fertilizantes y plaguicidas ha potenciado el rendimiento y limitado el impacto de las plagas y con el mejoramiento genético se han obtenido variedades que se adaptan a distintas condiciones edafo-climáticas, potenciando el rendimiento y resistiendo en mayor medida a las distintas enfermedades y plagas. En este contexto, donde el hombre debe vencer constantemente las problemáticas que la naturaleza le plantea en la producción de sus alimentos, el advenimiento masivo del riego en la agricultura extensiva resulta inminente dado que una de las principales limitantes del rendimiento pasa a ser la disponibilidad de agua en el momento y en la forma adecuadas para cada cultivo.

La adopción masiva del riego puede resultar peligrosa en caso de no realizar estudios y análisis serios de las características químicas del agua a utilizar y del suelo a irrigar, pudiendo ocasionar la salinización y/o sodificación del mismo, siendo esta última la más perniciosa para la estructura del suelo y la de solución más compleja y costosa. Regar con aguas de mala calidad tendrá como consecuencia un aumento de los rindes en el corto plazo, pero en el mediano plazo el efecto sobre la estructura hará que los mismos se reduzcan indefectiblemente. En el presente trabajo se han encontrado reacciones diferentes de cada suelo de acuerdo a su tipología, hecho que justifica que se estudie el tema en diversos ambientes edáficos para conocer los alcances de la problemática con mayor precisión.

Las aguas de baja calidad, especialmente aquellas con altos contenidos de sodio, dan lugar a la dispersión del sistema coloidal originando una estructura con predominancia de poros pequeños y ausencia de poros grandes. En dicha estructura se ven incrementados los fenómenos de tensión superficial, con lo cual aumenta la cohesión aparente del suelo y siendo la cohesión un parámetro propio de los suelos arcillosos, en estos suelos es que se expresarán en mayor magnitud los cambios originados por el riego con aguas sódicas. El aumento de la cohesión origina a su vez un aumento en la tensión cortante que resiste el suelo, lo que en definitiva implica un mayor gasto energético para roturarlo. El costo energético de la labor será un parámetro cada vez más importante en los sistemas agrícolas, donde la energía proviene principalmente del petróleo, recurso no renovable, finito y cada día más costoso.

Durante las operaciones de labranza un suelo afectado por el sodio, con estructura dispersa y donde predominen los microporos tendrá una mayor tendencia a expandirse con el corte que uno con estructura floculada, con preponderancia de macroporos, debido a que estos microporos no tienen la capacidad de alojar a las partículas mayores, resultando en un reacomodamiento de menor magnitud. No obstante, esta mayor expansión en este tipo de suelos,

será de una efectividad limitada, debido a que se producirá una pseudo-estructura formada por agregados masivos, con muy poca porosidad interna, duros y difíciles de penetrar por las raíces y un espacio interagregado de muy corta duración, ya que con el incremento de la humedad se perderá rápidamente, debido al efecto del sodio, retornando al estado inicial microporoso y masivo. El hecho de haber generado una estructura tan débil en húmedo a causa del sodio, que rápidamente pierde sus macroporos, implica que para mantener al suelo en condiciones apropiadas para los cultivos deban realizarse las labores más frecuentemente, resultando nuevamente en un incremento de los costos energéticos.

El aumento de la tensión cortante de los suelos afectados por el sodio puede ser asimismo considerado positivo en aspectos tales como transitabilidad, ya que al resistir tensiones cortantes mayores, los suelos sódicos permitirían mayor reacción con la consiguiente disminución del patinamiento. Asimismo, sus características de microporosidad (con microporos ocupados por agua) volverían más resistentes a las compresiones a estos suelos otorgándoles mayor capacidad portante. Si bien estas características pueden resultar positivas para el tránsito resultan muy perjudiciales para el normal crecimiento de los cultivos. La mayor resistencia a las tensiones externas implica una mayor dificultad de las plántulas para la germinación y una mayor dificultad de las raíces para explorar el suelo. Asimismo, la ausencia de macroporos imposibilita el normal intercambio gaseoso, vital para la respiración de raíces y microorganismos del suelo. La predominancia de microporos, aumenta el período durante el cual el suelo permanece con una elevada humedad generando condiciones de anaerobiosis y dificultando el normal desarrollo de la vida en el mismo. Por otra parte se dificulta el drenaje e infiltración del agua en el suelo, con la consiguiente pérdida de captación de agua, apareciendo problemas de encostramiento, aumento de escorrentía y erosión hídrica.

De los parámetros evaluados, la densidad aparente resultó ser poco sensible a los cambios en la matriz sólida que han implicado las diferentes soluciones. La tensión de corte en cambio, ha manifestado un claro aumento en los tratamientos con aguas de mala calidad, resultando asimismo importante el número de ciclos de humectación con estas soluciones, para que el reemplazo de los cationes existentes en el complejo de intercambio por sodio se hiciera efectivo.

Con respecto a las propiedades de estado crítico, se ha evidenciado un acercamiento de la línea de estado crítico a la línea de consolidación virgen en los tratamientos con alta sodicidad con respecto a los de baja sodicidad. Este acercamiento implica un aumento del espacio supercrítico, es decir el espacio tensional donde el suelo se expande ante el corte, lo que resulta lógico si se analiza el aspecto de la microporosidad existente en la estructura de un suelo afectado por sodio, donde encontrar poros para reubicar partículas grandes será más difícil que en un suelo con estructura floculada donde predominan los macroporos. Si bien en primera instancia, podría pensarse que esta mayor tendencia a la expansión es un aspecto ventajoso, debe asimismo tenerse en cuenta que la pseudo-estructura resultante será de agregados tenaces y con

macroporos de muy corta vida útil, en el que posteriores ciclos de humedecimiento, producirán el colapso de la misma a nivel de partícula retornando a la situación inicial. La teoría del estado crítico, si bien puede resultar de mayor complejidad que la teoría clásica de Coulomb, al incluir el cambio volumétrico durante el corte, permite visualizar de manera más detallada y global los cambios que se producen en la matriz del suelo ante la aplicación de diferentes tensiones externas.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que el parámetro “calidad del agua de riego” reviste una importancia trascendental en la sustentabilidad de los sistemas agrícolas en regadío. Los profesionales del agro son responsables de manejar grandes ecosistemas por lo que sus decisiones desacertadas pueden causar graves trastornos en los mismos y atentar contra su sustentabilidad. Por todo esto, se hace necesario profundizar las investigaciones en el área, debiendo asimismo difundirse entre los productores y especialistas del riego estos conocimientos con el fin de que se tome conciencia y se eviten daños irreversibles en el sistema edáfico.

13 CONCLUSIONES

- La metodología desarrollada (pretratamiento de las muestras y diseño de la caja de compresión-corte) permitió evaluar la incidencia del empleo de aguas de riego salinas y sódicas sobre las propiedades de compresibilidad y resistencia al corte del suelo.

- La resistencia a la compresión y al corte de un suelo irrigado dependen de la calidad del agua de riego (nivel de salinidad-sodicidad de las aguas con que son regados).

- Los suelos sometidos a procesos de sodificación y salinización aumentan su cohesión, (la cohesión molecular en seco y la superficial en húmedo), ocasionando un aumento de su resistencia al corte, resultando en consecuencia más oneroso su laboreo y más dificultoso el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos. Este efecto es más evidente cuanto más fina es la textura del suelo.

-La resistencia al corte es un parámetro más sensible que la densidad aparente para cuantificar el efecto de la salinidad y sodicidad sobre la estructura del suelo

-La salinización y sodificación de los suelos provoca variaciones en sus propiedades de estado crítico, alcanzando dicho estado a mayores valores de tensión normal.

14 BIBLIOGRAFÍA

1. Abu-Sharar, T.M.; Bingham, F.T.; Rhoades, J.D. (1987). Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 342-6
2. Alconada, M.; Poncetta, P.; Cuellas, M.; Barragán, S.; Inda, E.; Mitidieri, A. (2006). La fertirrigación en cultivo de tomate protegido (*Lycopersicum sculetum*): Consecuencias ambientales, productivas y económicas. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19 al 22 de septiembre de 2006. Salta. Argentina
3. Amiotti, N.; Bravo, O. (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
4. Ardakani, A.J.; Zahirnia, A.R. (2006). Effects of gypsum application in different unstable slopes on surface runoff and soil erosion. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
5. Atkinson, J.H.; Bransby, P.L. (1978). The mechanics of soils-An introduction to critical state soil mechanics. (Univ. Series in Civ. Engng). London: Mc Graw-Hill.
6. Ayers, P.D.; Perumpral, J.V. (1982). Moisture and density effect on cone index. *Transactions of the ASAE* 21(5), 1169-1172.
7. Ayers, R.S.; Wescot, D.W. (1976). Calidad del agua para la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje. N° 29. Roma. 85 p.
8. Ayers, R.S.; Wescot, D.W. (1987). La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Roma. N°29 (Rev.1) 173 p.
9. Barden, L. (1972). The influence of structure on deformation and failure in clay soil. *Geotechnique*, 22, 159-63.
10. Barzegar, A.R. , Murray, G.J., Churchman, G.J. and Rengasamy, P. (1994a). The strength of remoulded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay. *Aust. J. Soil Res.* 32, 185-199.
11. Barzegar, A.R.; Oades, J.M.; Rengasamy, P.; Giles, L. (1994b). Effect of sodicity and salinity on disaggregation and tensile strength of an Alfisol under different cropping system. *Soil Till. Res.* 32, 329-345.
12. Barzegar, A.R.; Rengasamy, P.; Oades, J.M. (1995). Effects of clay type and rate of wetting on the mellowing of compacted soils. *Geoderma*. 68, 39-49.
13. Barzegar, A. R., Oades, J. M., Rengasamy, P. (1996). Soil structure degradation and mellowing of compacted soils by saline-sodic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 583 – 588.
14. Ben Hur, M.; Agassi, M.; Keren, R.; Zhang, J. (1998). Compaction, Aging, and Raindrop-Impact Effects on Hydraulic Properties of Saline an Sodic Vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1377 – 1383.
15. Black, C.A.; Evans, D.D.; White, J.L.; Ensminger, L.E.; White, F.E. (1965). Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling. *Agronomy* N° 9. American Society of Agronomy. Madison.

16. Blackwell, P.S.; Ringrose-Voase, A.J.; Jaywardane, N.S.; Olsson, K.A.; McKenzie, D.C.; Mason, W.K. (1990). The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *J. Soil Sci.* 41, 215-28.
17. Blunden, B.G.; Kirby, J.M.; Humphries, E.; Murihead, W.A. (1993). Mechanical properties of a grey clay used for rice production in Australia. *Soil and Tillage Research.* 26, 55-67.
18. Braunack, M.V., Hewitt, J.S., Dexter, A.R. (1979). Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.* 30, 653-67.
19. Bui, E.N., Krogh, L., Lavado, R.S., Nachtergaele, F.O., Toth, T.; Fitzpatrick, R.W. (1998). Sodic soils p.35-50. En M.E. Summer and R. Naidu (ed.). Oxford University Press, New York, NY. EE.UU.
20. Caron, J.; Kay, B.D.; Stone, J.A. (1992). Improvement of structural stability of a clay loam with drying. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1583-1590.
21. Cavazza, L.; Patruno, A.; Cirillo, E. (2002). Soil traits and structure stability in artificially sodicated soils. *Ital. J. Agron.* 6 (1), 15-25.
22. Chambouleyron, J.L. (1980) Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo II Fascículo 4.3.2. Riego y drenaje. Editorial ACME.
23. Chan, K.Y. (1989). Effect of tillage on aggregate strength and aggregation on Vertisols. *Soil Till. Res.* 13, 163-175.
24. Chen, Y.; Banin, A. (1975). Scanning electron microscope (SEM) observations of soil structure changes induced by sodium – calcium exchange in relation to hydraulic conductivity. *Soil Sci.* 120: 428 – 436.
25. Churchman, G.J., Skjemstad, O., Oades, M.J. (1993). Influence of clay minerals and organic matter on effects of sodicity on soils. *Aust. J. Soil Res.* 31: 779 – 800.
26. Cook, G. D., Muller, W. J. (1997). Is exchangeable sodium content a better index of soil sodicity than exchangeable sodium percentage?: a reassessment of published data. *Soil Science* 163 (5): 343 – 349.
27. Corwin, D.; Brown, G.E.; Lesch, S.M. (2006). Evaluating management-induced changes from drainage water reuse using ECa-directed sampling: salinity, sodicity, and trace elements. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
28. Costa, J.L.; Aparicio, V. (2000) Efecto del sodio en la degradación de los suelos del sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. 11^{ava} Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del Suelo. 22 al 27 de Octubre de 2000. Buenos Aires. Argentina.
29. Coulomb, C.A. (1776). Essai sur une application des regles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Academie royale des Sciences: Memoires de Mathématique et de Physique, presentes à l'Academie royale des Sciences, par divers Savants, et lus dans les Assemblées, Paris. Vol 7: pp. 343-382 + 2 plates.
30. Cucci, G.; Caliandro, A.; Lacolla, G. (2006). Structural aggregates' stability in soils irrigated with sodic-saline water and subsequently

- reclaimed. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
31. Currie, D.R.; Grant, C.D.; Murria, R.S.; McCarthy, M. (2006). Does drip irrigation degrade soil structure in vineyards?. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
 32. Dane, H.J.; Klute, A. (1977) Salts effects on the hydraulic properties of a swelling soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 450 – 456.
 33. Das, M.; Singhandhupe, R.B.; Kanan, K.; Anthony, E.; Chakrabarty, H. (2006). Soil–crop response under wastewater irrigation: a case study in sub-humid orissa. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
 34. Davis, J.G. (2006). Manure: healer of the land. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
 35. Dawidowski, J.B.; Koolen, A.J.(1987). Changes in soil water suction, conductivity and dry strength during deformation of wet undisturbed samples. Soil and Tillage Research. 9. 169-180.
 36. De Kimpe, C.R.; Bernier-Cardou, M.; Jolicoeur, P. (1982). Compaction and settling of Quebec soils in relation to their soil-water properties. Canadian J. of Soil Sci. 62 (1), 165-175.
 37. Delage, P.; Lefebvre, G. (1984) Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. Can. Geotech. J. 21, 21-35.
 38. Dexter A.R. (1988). Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Res. 11: 199 – 238.
 39. Dexter, A.R.; Chan, K.Y. (1991). Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations. J. Soil Sci. 42, 219-226.
 40. Dickson, J.W.; Smart, P. (1976). Some interactions between stress and microstructure of kaolin. In “Modification of Soil Structure”. Eds. W.W.Emerson, R.D.Bond, A.R.Dexter. pp. 53-57. Wiley: Brisbane.
 41. Dos Santos, P.R.; Ruiz, H.A.; Neves J.C.L. (2006). Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a presión osmótica pH y concentración de Na⁺, Cl⁻ y HCO₃⁻ en solución nutritiva. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19 al 22 de septiembre de 2006. Salta. Argentina
 42. Draghi, L. ; Jorajuría, D. ; Botta, G. ; Balbuena, R. ; Aragón, A. ; Di Prinzio, A. (1998). Compactación del suelo en el monte frutal inducida por el tráfico vehicular. Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el Ámbito Latinoamericano. ISBN 950-34-0125-9. Editado por D. Jorajuría, R.H. Balbuena, S.H. Benez. Publicado por la Editorial de la UNLP. pp. 28-35.
 43. Dufey, J.E., Sheta, T.H., Gobran, G.R., Landelout, H. (1982). Dispersion of chloride, sodium, and calcium ions in soils as affected by exchangeable sodium. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 47 – 50.
 44. Ekwue, E.I., Stone, R.J. (1995). Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. Transactions of the ASAE. 38 (2): 357-365

45. Emerson, W.W. (1984). Soil structure in saline and sodic soils. In: Shainbert, I.; Shalhevet, J. (Eds.). Soil salinity under irrigation. Springer, Berlin.
46. FAO. (1978). Soil map of the world. VIII. North and Central Asia. UNESCO, Paris, France.
47. FAO. (1991). World Soil Resources. An explanatory note on the FAO world soil resources map at 1:25000000 scale. World Soil Resources Rep. 66. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
48. FAO. (2006). Dirección de estadísticas de la FAO. http://www.fao.org/es/ess/es/index_es.asp
49. Fattah, A.H.; Upadhyaya, S.K. (1996). Effect of soil crusting and soil compaction on infiltration in a Yolo loam soil. Transaction of the ASAE 39 (1): 79-84.
50. Ferrer, J.A.; Ourracariet, G. (1996). Riesgo de colapso en suelos yesosos incorporados al riego. XV° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Santa Rosa, Argentina, 19 – 24 mayo, p. 297.
51. Fitzpatrick, R.W.; Boucher, S.C.; Naidu, R.; Fritsch, E. (1994). Environmental consequences of soil sodicity. Aust. J. Soil Res. 32: 1069 – 1093.
52. Foster, R.H.; De, P.K. (1971). Optical and electron microscopic investigation of shear induced structures in lightly consolidated (soft) and heavily consolidated (hard) kaolinite. Clays and Clay Minerals, 19, 31-47.
53. Frenkel, H., Goertzen, J.O., Rhoades, J.D. (1978). Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 32 – 39.
54. Geeves, G. W., Cresswell, H. P., Murphy, B. W. (1998). Two indices of soil structure based on prediction of soil water processes. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 223 – 232.
55. Ghassemi, F; Jakeman, A.J.; Nix, H.A. (1995). Salinization of Land and Water Resources. Human Causes, Extent, Management and Cases Studies, CAB International, 526 pp.
56. Grant, C.D.; Dexter, A.R. (1989). Generation of microcracks in moulded soils by rapid wetting. Aust. J. Soil Res. 27, 169-82.
57. Griffiths, F.J.; Joshi, R.C. (1989) Change in pore size distribution due to consolidation of clays. Geotechnique, 39, 159-67.
58. Guarnieri, A.; Fabbri, A.; Molari, G. (2005). Influence of sodicity and salinity on the mechanical properties of two italian soils. Biosystems Engineering. 91 (2), 239-243.
59. Gulhati, S.K. (1978) Engineering properties of soils. McGraw-Hill. New Delhi. 198 pp.
60. Gupta, B.R. (2006). Efficacy of organic amendments integrated with gypsum on amelioration and crop productivity of sodic land. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
61. Hail, Z.; Runge-Metzer, A. (1992). Calibrar un patrón de la sostenibilidad. CERES 138: 36 – 39.

62. Hartge, K.H. (1992). The role of soil mechanics and physics in agricultural production. *Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencia del Suelo*. México. (Editors Tovar, S.R.; Quintero, L.)
63. Haynes, R.J.; Rietz, D.N. (2006). Effect of irrigation-induced salinity and sodicity on sugarcane yields, soil chemical and microbial properties. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
64. Hettiaratchi, D.P.R. (1987). A critical state soil mechanics model for agricultural soil. *Soil use and manag.* 3, 94-105.
65. Hettiaratchi, D.P.R.; O'Callaghan, J.R. (1980). Mechanical behaviour of agricultural soils. *J. Agric. Engng. Res.* 25, 891-904.
66. Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. 771pp. Academic Press.
67. Hillel, D. (2006). Uses and abuses of soil and water resources: an historical review. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
68. Irurtia, C. B., Mon R. (1998). Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la Región Pampeana después de cinco años de riego suplementario. XVI° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, Argentina, 4 – 7 mayo, p. 241 – 242.
69. Jassogne, L.T.P.; Davidson, R.; McNeill, A.; Chittleborough, D. (2006). How do roots cope with sodic hostile subsoils?. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
70. Jayawardane, N.S., Chan, K.Y. (1994) The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils. A review. *Australian Journal of Soil Research*. 32 (1) pp. 13-44.
71. Kaur, J.; Choudhary, O.P.; Singh, B. (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 (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
72. Kay B.D. (1990). Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12: 1 – 52.
73. Kay, B.D., Dexter, A.R. (1992). The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.* 30, 297-310.
74. Kay, B.D., Angers, D.A., Groenevelt, P.H., Baldock, J.A. (1988). Quantifying the influence of cropping history on soil structure. *Can. J. Soil Sci.* 68, 359-68.
75. Keren, R. (2000). Salinity. In: *Handbook of soil science 2000*. Editor Malcolm E. Summer, CRC Press. pp 23.
76. Kirby, J.M. (1989). Measurements of the yield surfaces and critical state of some unsaturated agricultural soils. *Journal of soil science*,
77. Kirby, J.M. (1991a). Strength and deformation of agricultural soil: measurement and practical significance. *Soil use and management*. Vol 7- N° 4. Pp223-229.

78. Kirby, J.M. (1991b). Critical-state soil mechanics parameters and their variation for Vertisols in eastern Australia. *Journal of Soil Science* 42, 487-499.
79. Kirby, J.M. (1991c). The influence of soil deformations on the permeability to air. *J. Soil Sci.* 42, 277-35.
80. Kirby, J.M. (1994). Simulating soil deformation using a critical-state model: I. Laboratory tests. *European Journal of Soil Science.* 45, 239-248.
81. Kirby, J.M., Blunden, B.G. (1991). Interaction of soil deformations, structure and permeability. *Aust. J. Soil Res.* 29, 891-04
82. Koolen, A.J., Kuipers, H. (1983). In "Agricultural soil mechanics". pp. 34-44. (Springer-Verlag)
83. Lebron, I.; Suarez, D. L.; Alberto, F. (1994). Stability of the Calcareous Saline-Sodic Soil During Reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1753 – 1762.
84. Lentz, R. D.; Sojka, R. E.; Carter, D. L. (1996). Furrow Irrigation Water-Quality Effects on Soil Loss and Infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 238 – 245.
85. Levy, G.J.; Miller, W.P. (1997). Aggregate stability of some southern US soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1176-1182.
86. Levy, G.J. (2000). Sodicity. In: *Handbook of soil science 2000*. Editor: Malcolm E. Summer, CRC Press. pp 37.
87. Massoud, F.I. (1981). Salt affected soils at global scale and concepts for control. FAO, Rome, Italy.
88. McKyes, E. (1985). *Soil Cutting and Tillage*. Elsevier Science Publisher B.V., 1985.
89. McKyes, E.; Yong, R.N. (1971) Three techniques for fabric viewing as applied to shear distortion of a clay. *Clay and Clay Minerals*, 19, 289-93.
90. Micklethwaite, E.W.E. (1944) *Soil mechanics in relation to fighting vehicles*. Military College of Science. Chertsey.
91. Minhas, P.S.; Gupta, R.K. (1992). Quality of irrigation water. *Assessment and Management*. Information and Publication, ICAR, p. 102.
92. Mitchell, J.K. (1976) *Fundamentals of Soil Behaviour*. pp.222-223. Wiley: New York.
93. Moreno, I.; Bonadeo, E.; Hampp, E.; Urbani, D.; Bongiovanni, M. (2006). Agregado de yeso y dinámica de sales y pH en suelos con horizontes salinos subsuperficiales. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19 al 22 de septiembre de 2006. Salta. Argentina.
94. Morgenstern, N.R.; Tchalenko, J.S. (1967). Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. *Geotechnique*, 17, 309-28.
95. Moutier, M., Shainberg, I., Levy, G.J. (1998). Hydraulic gradient, aging, and water quality effects on hydraulic conductivity of a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1488 – 1496.
96. Naylor, D.J. 1978. *Stress-Strain laws for soil*. *Developments in soil mechanics-1*. London: Applied Science Publishers.
97. Naylor, D.J. and Pande, G.H. (1981). *Finite Elements in Geotechnical Engineering*. Pineridge, Swansea.

98. Northcote, K.H. y Skene, J.K.M. 1972. Australian soils with saline and sodic properties. CSIRO Soil Publ. 27pp.
99. Ohu, J.O.; Raghavan, G.S.V; Mckyes, E. (1985). Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. Transactions of the ASAE. 28 (5), 420-424.
100. Olson, R.E. (1962). The shear strength properties of calcium illite. Geotechnique, 12- 23-43.
101. Peinemann, N.; Díaz Zorita, M.; Villamil, M.B.; Lusarreta, H.; Grunewald, D. (1998). Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. Ciencia del Suelo 16 (1): 39 – 42.
102. Pizarro, F. (1985). Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Ed. Agrícola Española S.A., 2º Ed., Madrid. Cap. 3 y 4. 542 p.
103. Pla, I. (2006). Modelling the processes of soil salinization and sodification in irrigated lands: new approaches. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
104. Prasad, P.R.; Srinivas, D.; Satyanarayana, T.V. (2006). Effects soil resource investigation for drainage installation in mutluru channel command of Krishna western delta, Andhra Pradesh, India. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
105. Qadir, M.; Noble, A.; Yau, S.K.; Murtaza, G. (2006). Crop-based management opportunities for sodium- and boron-affected soils. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
106. Quirk, J.P., Aymore, L.A.G. (1971). Domains and quasi-crystalline regions in clay systems. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35: 652-654.
107. Quirk, J.P.; Murray, R.S. (1991). Towards a model for soil structural behaviour. Aust. J. Soil Res. 29, 829-867.
108. Rahimi, H.; Pazira, E.; Tajik, F. (2000). Efecto of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. Soil and Tillage Research. 54, 145-153.
109. Rajaram, G.; Erbach, D.C. (1999). Effect of wetting and drying on soil physical properties. J. of Terramechanics. 36, 39-49.
110. Rashid, A. (2006). Soil salinity and associated nutrient constraints in indian subcontinent. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
111. Rasiah, V.; Kay, B.D.; Martin, T. (1992). Variation of structural stability with water content: Influence of selected soil properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1604-1609.
112. 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, 3 – 6 Junio, p.1 – 42.
113. Richards, L. Editor. (1956). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Departamento de Agricultura (USDA). Washington. 172pp.

114. Ruiz Vera, V.M.; Wu, L. (2006). Effects of salinity, sodicity, and clay mineralogy on soil physical and hydraulic properties. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
115. Rycroft, D.W.; Kyei-Baffour, N.; Tanton, T. (2002). The effect of sodicity on the strength of a soil surface. *Irrigation and Drainage* 51: 339-346.
116. Sánchez Girón Renedo, V. (1996). *Dinámica y Mecánica de Suelos*. Ed. Agrotécnicas, S. L. Madrid. 426 pp.
117. Scher, S.J. (1999). Degradación del suelo: Una amenaza para la seguridad alimentaria de los países en desarrollo en el año 2020?. En *Una visión de la alimentación, la agricultura y el medio ambiente*. Trabajo N°27. Serie Visión 2020. Dto. de Economía Agrícola y de Recursos Naturales, Universidad de Maryland, College Park. USA. 4p.
118. Schofield, A.; Wroth, P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. London: McGraw-Hill.
119. Scott, R.F. (1963). *Principles of Soil Mechanics*. Addison-Wesley: Reading, Mass. 550p.
120. Shainberg, I.; Letey, J. (1984). Response of soils to sodic and saline condition. *Hilgardia* 52: 1 – 57.
121. Shanmuganathan, R.T.; Oades, J.M. (1982). Effect of dispersible clay on the physical properties of the B horizon of a red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.* 20, 315-324.
122. Singer, M.J.; Warrington, D.N. (1992). Crusting in the Western United States. In *Soil Crusting: Chemical and Physical Processes*. Sumner M.E. Stewart B.A (eds). Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, USA.
123. Singh, C.S.; Gupta, S.K.; Sewa Ram (1996). Assessment and management of poor quality waters for crop production: A simulation model (SWAM). *Agricultural water management* 30: 25 – 40.
124. Singh, R.P.; Singh, R.K.; Singh, S.N.; Singh, R.S. (2006). Micronutrients (Cu, Zn, Fe, Mn, Mo) status of a sodic soil under cultivation of aromatic crops. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
125. Smith, C.W.; Hadas, A.; Dan, J.; Koyumdjisky, H. (1985). Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. *Geoderma*. 35 (1) 47-65.
126. So, H.B.; Alymore, L.A.M. (1995). In "The effects of sodicity on soil physical behaviour. Australian sodic soils: distribution, properties and management". (Eds. R. Naidu, M.E. Summer and P. Rengasamy) pp.71-80 (CSIRO Aust.: Melbourne).
127. Soil Survey Staff (2003). *Keys to Soil Taxonomy*. Ninth Edition. USDA, Natural Resources Conservation Service. 332 p.
128. Sokal, R. R.; Rohlf, F.J. 1995. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. 3rd edition. W. H. Freeman and Co.: New York. 887 pp.
129. Spoor, G.; Godwin, R.J. (1979) Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents. *J. Soil Sci.* 30, 483-98.

130. Spugnoli, P., Baldi, F., Cioni, A. (1988). Stato del suolo, trafficabilità, lavorabilità e giorni disponibili. Convegno AIGR, Sassari, 4-6 maggio 1988.
131. Spugnoli, P., Baldi, F., Parenti, A. (1993). Prediction of trafficability and workability from uniaxial soil compression relationships. CIGR international Seminar, Accademia dei Georgofili 1-2 Oct. 1993.
132. Spugnoli, P., Melani, E. (2005). Proprietà meccaniche degli aggregati di un suolo sodicizzato. AIIA2005. Catania. L'ingegneria agraria per lo sviluppo sostenibile dell'area mediterranea. Codice Lavoro: 1006.
133. Spugnoli, P.; Parenti, A.; Baldi, F. (1990). Test di compressione uniaxiale per valutare la trafficabilità di un suolo agricolo. Riv. di Ingegneria Agr. 4, 193-198.
134. Spugnoli, P.; Soverini, E.; Palancar, T.C.; Pagliai, M.; Jones, R. (2002) "Effects of irrigation with brackish water on soil trafficability and workability". Sustainable Land Management - Environmental Protection A Soil Physical Approach. ISBN 3-923381-48-4 Advances in Geocology. Marcello Pagliai and Robert Jones (Editors). 35, pp. 267–278
135. Suarez, D.L. (1981). Relation ship between pH and SAR and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage water. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 469 – 475.
136. Suarez, D.L.; Lesch, S.M.; Wood, J. (2006). Impact of irrigation water quality on infiltration in a combined irrigation-rain system. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
137. Summer, M. (editor) 2000. Handbook of Soil Science.
138. Szabolcs, I. 1989. Salt affected soils. CRC Press, Boca Raton, FL. EE.UU.
139. Thompson, L.M. y Troeh, F.R. (1982). Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverté, S.A. 649 pp.
140. Tisdall, J.M., Oades, J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates. J. Soil Sci. 33: 141-163.
141. Umali, D.L. (1993). Irrigation-Induced Salinity, A Growing Problem For Development and Environment. Technical Paper, World Bank, Washington D.C.
142. Utomo, W.H., Dexter, A.R. (1981a). Soil friability. J. Soil Science, 32, 203-213
143. Utomo, W.H.; Dexter, A.R. (1981b). Tilth mellowing. J. Soil Sci. 32, 187-201.
144. Van Olphen, H. (1977). An introduction to clay colloid chemistry . 2nd ed., Ed. Wiley – Interscience, New York. 234 p.
145. Varallyay, G. (2002). Enviromental stresses induced by salinity/alkalinity in the Carpathian Basin (Central Europe) Symposium N° 33 Paper N° 1570. 17th World Congress of Soil Sciences. 14-21 de agosto 2002. Tailandia.
146. Vázquez, M (2003). Evaluación de la alteración de algunas propiedades edáficas bajo riego complementario en suelos de la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral.

147. Velazco Molina, H.A., Swoboda, A.R., Godfrey, C.L. (1971). Dispersion of soils of different mineralogy in relation to sodium adsorption ratio and electrolytic concentration. *Soil Sci.* 111: 282 – 287.
148. Vincent, B.; Wu, J.; Vidal, A.; Yang, J.; Bouarfa, S.; Tong, J. (2006). The environmental evolvement of the Hetao irrigation district: an equilibrium between the combat facing irrigation induced soil salinity and the respect of the receiving media. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
149. Waldrom, L.J., Constantin, C.K. (1968). Bulk volume and hydraulic conductivity changes during sodium saturation test. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 175 – 179.
150. Ward, P.A.; Carter, B.J. (2004). Dispersion of saline and non-saline nitric mollisols and alfisols. *Soil Science.* 169(8): 554-566.
151. Warkentin, B.P.; Yong, R.N. (1962). Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces. *Clay and Clay Minerals*, 9, 210-18.
152. Wiedenfeld, R.; Enciso, J. (2006). Effect of water availability on sugarcane responses to N fertilization. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
153. Wong, V.N.L.; Greene, R.S.B.; Dalal, R.C.; Murphy, B.W.; Mann, S. (2006). Carbon dynamics in salt-affected soils. 18th World Congress of Soil Science (July 9-15, 2006). Philadelphia, USA.
154. Zinck, J.A. (2000) Monitoring soil salinity from remote sensing data. 11^{ava} Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del Suelo. 22 al 27 de Octubre de 2000. Buenos Aires. Argentina.