

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**QUALIDADE FÍSICA DE UM VERTISSOLO E
PRODUÇÃO FORRAGEIRA EM CAMPO NATIVO
MELHORADO, COM IRRIGAÇÃO E PASTOREIO**

TESE DE DOUTORADO

Enrique Perez Gomar Capurro

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**QUALIDADE FÍSICA DE UM VERTISSOLO E PRODUÇÃO
FORRAGEIRA EM CAMPO NATIVO MELHORADO, COM
IRRIGAÇÃO E PASTOREIO**

por

Enrique Perez Gomar Capurro

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2005

P438q

Perez Gomar Capurro, Enrique, 1953-

Qualidade física de um vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio / por Enrique Perez Gomar Capurro ; orientador José Miguel Reichert. – Santa Maria, 2005.

85 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

1. Ciencia do solo 2. Compressibilidade do solo 3. Pastagem 4. Água no solo 5. Propriedade física do solo I. Reichert, José Miguel, orient. II. Título

CDU: 631.43

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes CRB-10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2005

Todos os direitos autorais reservados a Enrique Perez Gomar Capurro. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser com autorização por escrito do autor.

Endereço: Ruta 5 km 386, s/n, Tacuarembó, Uruguai

Fone (0xx)5986324560; Fax (0xx)5986323969; End. Eletr: eperezgomar@tb.inia.org.uy

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**QUALIDADE FÍSICA DE UM VERTISSOLO E PRODUÇÃO
FORRAGEIRA EM CAMPO NATIVO MELHORADO, COM IRRIGAÇÃO
E PASTOREIO**

elaborada por
Enrique Perez Gomar Capurro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert, PhD.
(Presidente/Orientador)

Afrânio Almir Righes, PhD. (UNIFRA)

Dalvan José Reinert, PhD. (UFSM)

Fernando García Préchac, PhD. (UDELAR)

Reimar Carlesso, PhD. (UFSM)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005.

Agradecimentos

À CAPES dentro do Programa PEC/PG, por haver me brindado a bolsa de estudos, que possibilitou o custeio do desenvolvimento de meus estudos.

À Universidade Federal de Santa Maria, através do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela possibilidade de realização do curso de doutorado.

Ao Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA, e ao chefe do Programa Nacional de Forrajas, Engenheiro Agrônomo, MSc., Diego Riso, que possibilitaram a realização desta tese no campo experimental “Glencoe” do INIA, assim como, também, a utilização da equipe de irrigação e equipe de apoio para o desenvolvimento da mesma.

A meu orientador professor José Miguel Reichert que soube conduzir-me com habilidade, exigindo até onde eu poderia dar e brindando-me todo seu apoio em procura da meta a alcançar.

Especialmente ao co-orientador professor Fernando García, com quem contei desde o começo deste caminho até o final do mesmo, com toda sua capacidade intelectual e humana, brindando-me com seu aporte quando solicitado.

Ao professor Dalvan José Reinert, pelos aportes sensatos como professor co-orientador.

Ao Doutor Elbio Berreta em sua função de diretor do INIA/Tacuarembó, apoiando-me inquestionavelmente na minha decisão e proporcionando-me todos os elementos que estiveram ao seu alcance para facilitar o seguimento desse trabalho.

Ao Doutor Gustavo Ferreira, atual diretor do INIA/Tacuarembó, que em uma atitude muito compreensiva também me proporcionou todo seu apoio neste último período para que eu culminasse na forma mais satisfatória.

Ao professor Reimar Carlesso, que colaborou no início do presente trabalho na elaboração dos delineamentos da pesquisa.

Ao colega Luis Eduardo A.S. Suzuki, que com grande dedicação e entrega colaborou na elaboração formal e digitação na etapa final desta tese.

Ao Sr. Maximo Soares, por seu aporte no trabalho de campo na condução operativa dos experimentos.

À bolsista Letícia Sequinato, pelas determinações de compressibilidade.

Aos colegas André A. Brandt e Clóvis Berval, por colaborarem nas determinações da curva característica de retenção de água no solo.

Ao Sr. Tarcísio Uberti, por sua colaboração nos trâmites administrativos.

À Deus, que me acompanha em todas as situações que se apresentam, ajudando-me e iluminando-me no caminho da minha vida e podendo contar no presente, com todos os seres queridos que hoje me acompanham e que são fundamentais no meu andar.

Agradeço ao Brasil e a sua gente pela generosidade de haver me recebido, fazendo-me sentir como em minha própria casa neste período de minha vida. E a eles transmito o prazer do meu muito obrigado.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

QUALIDADE FÍSICA DE UM VERTISSOLO E PRODUÇÃO FORRAGEIRA EM CAMPO NATIVO MELHORADO, COM IRRIGAÇÃO E PASTOREIO

AUTOR: ENRIQUE PEREZ GOMAR CAPURRO

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005.

O sistema de produção de forma extensiva em campo nativo predominante na região Centro-Norte da República Oriental do Uruguai inclui o pastejo de bovinos e ovinos. Entre os solos encontrados estão os Vertissolos com argilas expansivas e alto teor de matéria orgânica no horizonte mais superficial. A partir dos primeiros anos na década de 90, houve forte expansão da cultura de arroz na região, com aumento da intensidade de uso do solo, e adoção de sistemas de produção arroz-gado de corte. Devido a variações da produção forrageira anual relacionada com as variações do regime hídrico, o trabalho teve como objetivo avaliar o uso da tecnologia de irrigação como alternativa para alcançar uma maior estabilidade na produção. Os efeitos sobre as características físicas dos Vertissolos foram avaliados em situações de baixa intensidade de uso, campo natural melhorado sob pastejo ou maior intensidade na rotação arroz-pecuária. Mais especificamente o trabalho procurou quantificar os efeitos do pisoteio animal em comparação com a pressão das máquinas de colheita de arroz na qualidade física de Vertissolos e encontrar uma relação quantitativa entre lâmina de água de chuva mais irrigação e produção de forragem. No campo experimental de basalto de INIA-Tacuarembó-Uruguai, foram realizados dois experimentos para avaliar os efeitos da compactação animal e a irrigação num campo natural melhorado, e noutro campo no departamento de Tacuarembó-Uruguai foi realizado um experimento para avaliar os efeitos da compactação durante a cultura e colheita de arroz. Do ponto de vista da qualidade física do solo, em geral, os resultados dos experimentos mostraram efeito da compactação superficial (0-3 cm), mas não subsuperficial (9-12 cm), devido ao pisoteio animal nos parâmetros densidade do solo, porosidade total,

macroporosidade, compressibilidade e resistência do solo à penetração. Na colheita do arroz, foram evidenciados os efeitos de deformação do solo pelo tráfego de colheitadeiras em condições de alto conteúdo de água no solo. A produção forrageira não apresentou diferença para as freqüências de irrigação usadas no ano chuvoso (2003), enquanto que durante o ano seco (2004) os tratamentos irrigados produziram 425 % mais que o não irrigado e o irrigado mais freqüentemente produziu 35 % mais que o irrigado menos freqüentemente. A resposta da produção forrageira à água foi de 8,95 kg de MS ha⁻¹ mm⁻¹. O trevo vermelho apresentou maior resposta da produção forrageira à água do que o trevo branco, 11 kg de MS ha⁻¹ mm⁻¹ e 9 kg de MS ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. O efeito do pisoteio animal na produção forrageira reduziu a produção do trevo vermelho, mas não do trevo branco. Com relação à composição botânica, no ano seco, houve redução na porcentagem de cobertura por leguminosas no melhoramento nas situações sem irrigação.

Palavras-chave: propriedades físicas do solo, compressibilidade do solo, pastagem, água no solo.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis
Soil Science Postgraduate Program
Santa Maria Federal University

EFFECT OF IRRIGATION AND ANIMAL GRAZING ON A VERTISOL PHYSICAL QUALITY AND ON FORAGE PRODUCTION OF AN IMPROVED NATURAL PASTURE

AUTHOR: ENRIQUE PEREZ GOMAR CAPURRO

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Date and place of defense: Santa Maria, February 28, 2005.

The predominant production system in North central Uruguay is based on the combined beef cattle and sheep cattle grazing of native grasslands. Soils include an important area of Vertisols, with high content of expansible clays and high organic matter in the surface horizon. At the beginning of the 90's there was a rapid expansion in rice production in this part of the country, increasing soil use intensity. Rice is grown in rotations with seeded pastures. Due to variations in annual forage production because variations of the hydric regime, irrigation technology was studied as an alternative to achieve greater inter-annual production stability. The effect of soil compaction, is to be considered when managing "Vertisols" especially in low soil use intensity situations, like natural pastures improved by overseeding and fertilization, or the more intense rice – pastures rotation. The objectives of this research were to quantify the effects of animal trampling, as compared with rice harvesting, on the physical quality of the "Vertisols" and to obtain a quantitative relationship between rain plus irrigation water input and forage production. Two experiments were conducted in the basaltic experimental field of INIA-Tacuarembó-Uruguay, to evaluate the effects of irrigation and animal compaction on the improved natural pasture. Another on farm experiment was also conducted to evaluate soil compaction due to rice cropping and harvesting. Physical quality results, showed animal trampling compaction effect in the surface layer (0-3 cm), but not in subsurface (9-12 cm), due animal trampling on bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity, compressibility, and penetration resistance. In the rice field, effects of soil deformation by harvesting-combine traffic were evident to 20 cm depth under of high soil moisture conditions. Forage production did not show differences between the irrigation frequencies used in a rainy year (2003). Meanwhile in a dry year (2004), the

irrigation treatments produced more (425 %) than the non irrigated, and the one irrigated more frequently produced more (35 %) between the two irrigated ones. General response to water was $8.95 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Red clover showed greater response than white clover. The effect of animal trampling was significant on forage yield production of red clover, but there was no effect on white clover production. The botanical composition, in a dry year, showed loss of legume presence without irrigation.

Keywords: soil physical properties, soil compressibility, pasture, soil water.

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 - Probabilidad de $>F$, según Anova conjunto, para densidad del suelo (D_s), porosidad total (P_t), macro e microporosidad y humedad gravimétrica (U_g) a 33 y 10 kPa.	36
Cuadro 2 - Significación estadística (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza para la profundidad de 0 – 3 cm.	39
Cuadro 3 - Significación estadística (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza para la profundidad de 9 – 12 cm.	39
Cuadro 4 - Significación estadística del estudio de compresibilidad (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza, en muestras equilibradas a 33 kPa de tensión a la profundidad de 0 - 3 cm y de 9 - 12 cm, y en muestras equilibradas a 10 kPa a la profundidad de 0 - 3 cm.	42
Cuadro 5 - Medias de presión de preconsolidación (σ_p), índice de compresión (I_c), índice de relajación (I_r) y densidad del suelo (D_s), equilibrados a 10 y 33 kPa de tensión, en las profundidades de 0 a 3 cm y 9 a 12 cm, en los 2 tratamientos de pastoreo (Past 1 y Past 2) y en la exclusión (Exc).	42
Cuadro 6 - Significación estadística del estudio de compresibilidad (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza, entre muestras equilibradas a 33 kPa de tensión a la profundidad de 0 - 3 cm y de 9 - 12 cm.	44
Cuadro 7 - Significación ($P > F$) de los contrastes ortogonales de las medias de riego y de la interacción Riego x Pastoreo en la producción de materia seca.	66
Cuadro 8 - Significación (Prob. $>F$) de los contrastes ortogonales de las medias de riego y de la interacción Riego x Pastoreo en % de cobertura.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema y fotos de la disposición experimental del experimento 1.	28
Figura 2 - Esquema y foto de la disposición experimental del experimento 2.	29
Figura 3 - Esquema para determinación de la curva de compresibilidad: presión de preconsolidación (σ_p), índice de compresión (Ic) e índice de relajación (Ir) (adaptado de Braida, 2004).	32
Figura 4 - Curvas características de retención de agua y densidad del suelo (D_s), de los tratamientos de Riego R30 (a), R 60 (b) y seco (c), bajo exclusión de pastoreo (Exc) y con pastoreo (Past) en el experimento 1 en la profundidad de 0 – 3 cm.	35
Figura 5 - Valores de densidad del suelo por el método del terrón parafinado, en suelo excluido y pastoreado (compactado) en experimento 1, en la profundidad de 0 8 cm.	36
Figura 6 - Curva característica de agua en el suelo en las profundidades de (a) 0 - 3 cm y (b) 9 – 12 cm, en el experimento 2.	37
Figura 7 - Valores de densidad del suelo D_s (a), porosidad total P_t (b) y macroporosidad (c), en el ensayo 2, en la profundidad de 0 – 3 cm.	38
Figura 8 - Deformación del suelo con contenido de agua volumétrico en el suelo de 39 %, frente a diferentes presiones en suelo excluido de pastoreo y pastoreado, en el ensayo 1. Letras diferentes indican diferencias significativas según ANOVA.	40
Figura 9 - Deformación del suelo con contenido de agua volumétrico en el suelo de 39 %, frente a diferentes presiones, en suelo excluido de pastoreo y pastoreado, en el ensayo 2. Se presentan los valores de Prueba T, Prob de error Tipo 1.	41
Figura 10 - Curva de compresión y recompresión del suelo para los tratamientos en estudio. Exclusión (a), Pastoreo 1 (b), Pastoreo 2 (c) en las profundidades de 0-3 y 9-12 cm. D_{si} = D_s inicial.	45
Figura 11 - Relación entre la resistencia a la penetración (RP) y el contenido de agua volumétrico en el suelo hasta 6 cm de profundidad.	46
Figura 12 - Resistencia a la penetración (Figura la izquierda) y su respectivo contraste para las profundidades y tratamientos en estudio (Cuadro a la derecha de la Figura).	48

Figura 13 - Resistencia a la penetración en suelo bajo cultivo de arroz, a – antes de inundar el área (AIn) el 5/12/1999 con 22% de humedad y después de inundado (In) el 15/01/2000, suelo saturado; b – antes de la cosecha de arroz (AC), el 15/3/2000, suelo con 25% de humedad, y en la huella (LT) de la cosechadora, suelo con 25% de humedad ; c – antes de la cosecha de arroz, el 25/3/2001, suelo saturado (ACSat) y en la huella de la cosechadora (LTSat), suelo saturado. (*-significativo al 5 %).	50
Figura 14 - Imágenes de perfilómetro en condición de cultivo de arroz, antes de la cosecha (izquierda) y post cosecha, en la huella de la rueda de la cosechadora. (derecha).	51
Figura 15 - Resistencia a la penetración en suelo bajo campo natural a diferentes condiciones de humedad del suelo.	52
Figura 16 - Producción de materia seca en las diferentes épocas del año, manejadas en exclusión de pastoreo, en los tratamientos con regímenes hídricos de 30 mm, 60 mm y sin riego del experimento 1. LSD = diferencia mínima significativa.	62
Figura 17 - Precipitaciones ocurridas en los años 2002, 2003 e 2004.	63
Figura 18 - Evolución del contenido del agua en el suelo en 80 cm de profundidad en los regímenes de riego de 30 mm (Contenido de agua 30), 60 mm (Contenido de agua 60) y sin riego (Contenido de agua s/r) y precipitaciones o riego en el período 01 al 31/01/2003 (a) y 01 al 31/01/2004 (b). Las líneas son el resultado de los balances hídricos y los puntos representan las mediciones realizadas con sonda de neutrones y TDR.	64
Figura 19 - Producción de materia seca bajo tres regímenes de riego (R 30, R 60 y sin riego), en las estaciones Primavera 2003, Verano de 2004 y Otoño de 2004, en condiciones sin pastoreo directo con animales o con pastoreo en el experimento 1. Las líneas verticales en el límite superior de las barras indican la desviación standard de cada media.	65
Figura 20 - Porcentaje de suelo cubierto por leguminosas, gramíneas o suelo descubierto en exclusión de pastoreo, bajo diferentes regímenes hídricos y secano (R 30=régimen hídrico de 30 mm; R 60= régimen hídrico de 60 mm; Secano=sin riego).	67

Figura 21 - Porcentaje de suelo cubierto por leguminosas, gramíneas o suelo descubierto en condición de pastoreo, bajo diferentes regímenes hídricos y secano (R 30= régimen hídrico de 30 mm; R 60= régimen hídrico de 60 mm; Secano=sin riego).	67
Figura 22 - Respuesta de la producción de forraje al agua por riego, discriminada por especie de leguminosa y presión de pastoreo.	70
Figura 23 - Respuesta de la producción del componente leguminosa en cada uno de los mejoramientos a la RP, discriminada por presión de pastoreo.....	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. OBJETIVO GERAL	17
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. HIPÓTESES.....	17
5. ESTUDIO I. "CALIDAD FÍSICA EN VERTISOLES DE BASALTO AFECTADA POR PASTOREO EN UN MEJORAMIENTO EXTENSIVO A DIFERENTES REGÍMENES HIDRICOS Y BAJO CULTIVO DE ARROZ.".....	18
5.1. INTRODUCCIÓN.....	18
5.1.1. Característica generales y distribución geográfica de los Vertisoles.....	18
5.1.2. Los vertisoles del Uruguay	19
5.1.3. Compactación	21
5.1.4. Resistencia a la penetración	23
5.1.5. Principales propiedades físicas del suelo (calidad física del suelo) que influyen en el desarrollo radicular de las pasturas	24
5.1.6. Contenido de agua en el suelo.....	25
5.2. MATERIALES Y METODOS.....	26
5.2.1. Curva de retención característica, densidad del suelo, porosidad total, macro y microporosidad.....	30
5.2.2. Determinación de la densidad del suelo por el método del terrón parafinado	30
5.2.3. Deformación de la superficie por simulación mecánica de pisoteo animal.....	31
5.2.4. Ensayo de compresibilidad	31
5.2.5. Resistencia a la penetración y contenido de agua del suelo.....	33
5.2.6. Análisis estadístico.....	33
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
5.3.1. Curva de retención de agua, densidad, porosidad del suelo.....	34
5.3.2. Deformación de la superficie por simulación mecánica de pisoteo	39
5.3.3. Compresibilidad del suelo	41
5.3.4. Resistencia a la penetración	45
5.4. CONCLUSIONES	52

6. ESTUDIO II. “RESPUESTA AL RIEGO DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO NATURAL DE BASALTO, BAJO DIFERENTE MANEJO DEL PASTOREO ANIMAL.”	54
6.1. INTRODUCCIÓN	54
6.1.1. Efectos climáticos sobre los mejoramientos de campo	54
6.1.2. El riego como estrategia para contrarrestar los déficit hídricos estivales	55
6.1.3. Efectos de la compactación animal sobre la producción de forraje	57
6.1.4. Riego de pasturas en Vertisoles	58
6.2. MATERIALES Y MÉTODOS	58
6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
6.3.1 Producción de forraje	61
6.4. CONCLUSIONES	71
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXO	82

QUALIDADE FÍSICA DE UM VERTISSOLO E PRODUÇÃO FORRAGEIRA EM CAMPO NATIVO MELHORADO, COM IRRIGAÇÃO E PASTOREIO

1. INTRODUÇÃO GERAL

No centro de norte do Uruguai encontra-se a região Basáltica, ocupando uma área aproximada de 4.000.000 ha. O sistema de produção predominante, pecuária extensiva, compreende o uso do campo natural por meio do pastejo direto com bovinos e ovinos.

Os solos da região, de acordo com Durán (1985), variam em profundidade, encontrando-se Litossolos com profundidades inferiores a 25 cm, até solos mais profundos, maiores que 45 cm de espessura, os Vertissolos, passando por solos de profundidade intermediária entre os extremos mencionados.

Os Vertissolos caracterizam-se por apresentarem altas porcentagens de argila expansiva em todo perfil (superiores a 50%) e altos níveis de matéria orgânica (8,7%), conferindo uma fertilidade natural elevada e uma estrutura granular forte, com características de autogranulado.

A produção forrageira anual é extremamente variável nos distintos anos, estando intimamente relacionada com variações do regime hídrico (Berretta & Bemhaja, 1998). Existe uma significativa variação mensal da produção forrageira, encontrando-se as menores produções nos meses de inverno, conseqüência dos menores níveis de radiação, e as maiores nos meses da primavera. É possível alcançar altos níveis de produção de forragem nos meses de verão, se o regime hídrico superar a evapotranspiração, ou níveis de produção muito baixos ou nulo em condições de seca extrema.

Visando melhorar a produção pecuária da região, surgem duas medidas de manejo a considerar: (i) a introdução de espécies produtivas (leguminosas) nos ambientes naturais, com elevação dos níveis de fósforo do solo mediante adubação fosfatada; dessa forma, é possível atenuar os baixos níveis produtivos registrados nos períodos de inverno; e (ii) o uso da tecnologia de irrigação, frente aos possíveis déficit hídricos severos, alcançando uma maior estabilidade na produção entre anos.

A introdução de espécies produtivas sobre o campo natural mediante semeadura em cobertura, aliado ao prévio acondicionamento da vegetação existente mediante uso do pastejo e o aumento da fertilidade natural com adubação fosfatada, é conhecida como melhoramento do campo (Carámbula et al., 1994). A persistência desses melhoramentos dependerá do manejo adequado do pastejo, considerando os aspectos momento e intensidade de desfolhação e manejo dos efeitos do pisoteio, manejo da resemeadura e da readubação fosfatada.

Por razões da magnitude dos investimentos necessários e da probabilidade de retorno imediato destes investimentos, a utilização dos melhoramentos de campo já apresentou importância na região, enquanto o uso de irrigação em pastagens tem desenvolvimento escasso, principalmente associado a alguns sistemas de produção de arroz. Isso não invalida conhecer as relações físicas entre o regime hídrico e produção de forragem nos solos de maior potencial da região, como também a interação com o nível de compactação causado pelo pisoteio animal. Conhecendo-se as relações físicas água - produção, será possível determinar tanto uma equação econômica da viabilidade do investimento com irrigação, como estimar a magnitude da produção esperada dos melhoramentos do campo se ocorrerem certos regimes de precipitações. Esse último pode ser muito importante no planejamento estratégico em estabelecimentos que apresentem áreas melhoradas sem irrigação disponível, se as previsões climáticas de médio prazo continuam melhorando.

Embora a tecnologia proposta apresente um caráter conservacionista, do ponto de vista do uso e manejo do solo, deve-se atuar de forma cuidadosa tanto sobre a vegetação existente como sobre o solo na utilização do forragem, conhecendo o impacto causado pelo pisoteio animal em alguns atributos físicos do solo.

Juntamente com o estudo da resposta da produção forrageira em função do regime hídrico, também há necessidade de estudar o efeito do pisoteio animal sobre as propriedades físicas do solo e sua repercussão ou interação com a produção forrageira e comparativamente o estudo da qualidade física do solo em condições de uso e manejo mais intensivos na rotação arroz-pecuária.

Os solos profundos desenvolvidos sobre basalto caracterizam-se por apresentarem altas porcentagens de argila expansiva (Durán, 1985; Puentes et al., 1988), fazendo com que estes solos sejam plásticos, e muito suscetíveis à compactação em condições de alto conteúdo de água no solo. O pisoteio animal, em sistemas de pastejo de baixa intensidade de uso do solo, altera as propriedades

físicas do solo compactando-o, o que repercutirá no desenvolvimento e eficiência funcional do sistema radicular, afetando a absorção de água e de nutrientes exigidos para satisfazer as demandas da planta (Cornish et al., 1987).

2. OBJETIVO GERAL

Quantificar os efeitos do regime hídrico e pisoteio animal, na qualidade física do solo e produção forrageira, em melhoramento de campo nativo em Vertissolo de basalto.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(i) Obter uma relação quantitativa entre lâmina de água de chuva mais irrigação com a produção de forragem, em diferentes momentos de uso.

(ii) Quantificar os efeitos do pisoteio animal sobre a produção e persistência do melhoramento de campo e sua interação com o regime hídrico.

(iii) Avaliar os efeitos dos tratamentos de regime hídrico e pisoteio animal sobre alguns atributos físicos do solo.

(iv) Avaliar o efeito da deformação e compactação do solo na colheita de arroz sob diferentes conteúdos de água no solo.

4. HIPÓTESES

(i) A irrigação mais freqüente favorecerá a produção e persistência do melhoramento de campo com predominância de trevo branco.

(ii) Os pastejos realizados com diferentes conteúdos de água no solo provocam compactações diferenciadas.

(iii) A compactação superficial causada pelo pisoteio animal é revertida pelos processos naturais que ocorrem em Vertissolos de basalto.

5. ESTUDIO I. “CALIDAD FÍSICA EN VERTISOLES DE BASALTO AFECTADA POR PASTOREO EN UN MEJORAMIENTO EXTENSIVO A DIFERENTES REGÍMENES HIDRICOS Y BAJO CULTIVO DE ARROZ.”

5.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos profundos desarrollados sobre basalto se caracterizan por presentar altos porcentajes de arcillas con características expansivas (Durán, 1985; Puentes et al., 1988), con alta plasticidad y por lo tanto, son muy susceptibles a compactarse en condiciones de alto contenido de agua. El tráfico animal, si altera las propiedades físicas del suelo compactándolo, repercutirá en el desarrollo radicular y su eficiencia funcional, afectando la absorción de agua y nutrientes requeridos para satisfacer las demandas de la planta (Cornish et al., 1987).

5.1.1. Característica generales y distribución geográfica de los Vertisoles

De acuerdo a Hubble (1984) y Dudal & Eswaran (1988), las dos principales características de estos suelos son alto contenido (mayor a 30 %) de arcillas expansivas (smectitas) y evidencias de expansión y contracción con cambios marcados en su contenido de agua. A su vez, es evidente que la segunda característica deriva de la primera. Además de estas características, presentan una o más de otras, entre las que se destacan el microrrelieve de gilgai y las caras de deslizamiento en los horizontes más profundos (slikensides). Ambas también relacionadas con movimientos en el suelo generados en los cambios de contenido de agua.

A nivel del planeta, su distribución geográfica es ampliamente mayoritaria en las zonas tropicales (60% de los 320.000.000 ha que ocupan de la superficie terrestre) y subtropicales (30%). Solo un 10% de las áreas con vertisoles están fuera de dichas áreas (Dudal & Eswaran, 1988). Estos mismos autores indican que la distribución del área ocupada por vertisoles es como sigue: 65% en zonas

semiáridas, 18% en zonas áridas, 13% en zonas húmedas y subhúmedas y 4% en zonas de clima mediterráneo.

Por lo tanto, es evidente que exista una diversidad importante en otras propiedades de estos suelos, diferentes de las que les son comunes y fueron indicadas. Entre los vertisoles los hay, como surge de lo anterior, con muy diferente régimen hídrico, lo cual es recogido por la Soil Taxonomy al separar los subórdenes del orden de los vertisoles, de acuerdo a la duración del período en que permanecen abiertas las grietas que provoca la desecación del suelo (Dudal & Eswaran, 1988). A nivel de subgrupo, se los divide por presentar colores oscuros (Pell) o más vivos (Chrom). Si bien se mencionan varias causas para los colores oscuros, una de las más importantes es el contenido de materia orgánica, que es ampliamente variable entre los vertisoles del mundo. Pero a este nivel también se han propuesto subdivisiones basadas en contenido de aluminio intercambiable, salinidad, alcalinidad y presencia de diferentes horizontes diagnóstico como el Cálcio, Petrocálcio, Gípsico y Argílico.

5.1.2. Los vertisoles del Uruguay

Los Vertisoles en Uruguay ocupan 1.000.000 ha, de las 16.000.000 ha del territorio continental del país (Dudal & Eswaran, 1988). Según Durán (1985), los Vertisoles de Uruguay, son suelos profundos, oscuros y presentan microrrelieve de gilgai. Sus contenidos de arcilla varían entre 40 y 60%, normalmente con un incremento en profundidad. Los contenidos de materia orgánica son altos, entre 4 y más de 8% en suelos no cultivados. La estructura del horizonte superficial es granular o en bloques finos, con alto grado de agregación y autoagranulación (“self-mulching”).

A diferencia de la generalidad de la mayoría de los Vertisoles del mundo, los de Uruguay se han desarrollado en condiciones muy semejantes a los Mollisoles, que constituyen los suelos clímax, bajo vegetación de pradera en clima templado-subtropical húmedo. La no presencia del horizonte diagnóstico subsuperficial Argílico en forma horizontalmente continua en los Vertisoles, a diferencia de los Molisoles de Uruguay, se atribuye principalmente al automezclado que ocurre en los

Vertisoles, generado por los movimientos de expansión y contracción. Comparten con los Mollisoles, el poseer altos contenidos de materia orgánica, pero esta es, en promedio, mayor en los Vertisoles. Además, los Molisoles y Vertisoles de Uruguay poseen mayores contenidos de materia orgánica que otros suelos del mundo formados en condiciones comparables (Durán, 1985).

Los Vertisoles en Uruguay se presentan en dos tipos de posiciones topográficas: (1) en posiciones de deposición, de baja pendiente, casi planas y (2) en lomadas convexas de entre 1 y 4% de pendiente. Los primeros son típicos de la zona centro-norte del país, donde predominan materiales geológicos basálticos. Los segundos son comunes en las regiones centro-sur y suroeste, sobre materiales sedimentarios pleistocenos de texturas arcillo limosas o franco arcillo limosas, con alto contenidos de calcáreo. En la primera zona, es dudoso que los Vertisoles se formen a partir de la alteración del Basalto (Durán, 1985). Se piensa que su material parental es el relleno de los valles con una mezcla de materiales alóctonos y los derivados de la alteración de las rocas basálticas, retransportados localmente en los procesos de erosión-sedimentación que dieron origen al actual paisaje. Estos materiales (horizonte C de dichos Vertisoles), presentan características texturales y contenidos de calcáreo muy semejantes a los materiales pleistocénicos que dan origen a los Vertisoles en el sur. Los vertisoles de los valles de deposición en el norte presentan microrelieve de gilgai de montículos característico. Los del sur, presentan un microrelieve, también característico pero de gilgai lineal en oleadas. Las orientaciones de dichas líneas de microcrestas y microdepresiones son a favor de las pendientes, que por ser convexas se separan a partir de una línea central en la parte más alta (diseño en pluma). En este caso, el contacto entre el material parental y el suelo es más ondulado aún que la superficie, estando muy cercano a ella en las microcrestas y a alrededor de un metro en las microdepresiones, por lo que a poca distancia varía mucho, pero sistemáticamente, la profundidad del suelo; se los conoce como suelos de doble perfil. En cambio, los Vertisoles de los valles de deposición en la región basáltica del norte son homogéneamente profundos (80 a 100 cm de solum).

Los Vertisoles del Uruguay son suelos de alta fertilidad natural, pero con baja disponibilidad de fósforo, como la enorme mayoría de los suelos del país. Tienen alta capacidad de retención de agua disponible y la distribución de la materia orgánica en

el perfil indica que, con la excepción de las fases superficiales del doble perfil de los Vertisoles del Sur (microcrestas), son suelos de menor riesgo de sequía, comparados con el resto de los suelos del Uruguay. Los Vertisoles del sur tienen drenaje moderado, mientras que los del norte, por las posiciones que ocupan en el paisaje, tienen drenaje moderado a pobre. Por la misma razón, estos últimos poseen bajo riesgo de erosión, en cambio los del sur, en posiciones topográficas convexas de pendiente suave, tiene un riesgo de erosión algo mayor, a pesar de la alta estabilidad de su estructura. Como es obvio, este riesgo de erosión solo se puede efectivizar durante las épocas de exceso o alto contenido de agua en el perfil, que determina la expansión de los coloides y por lo tanto, baja infiltración y permeabilidad. Cuando estos suelos están secos y con rajaduras no permiten prácticamente que el agua escurra superficialmente, minimizando su riesgo de erosión.

Una limitante general de los Vertisoles es su mala consistencia. Estos suelos son muy plásticos y pegajosos cuando húmedos y sus agregados son muy duros cuando el suelo está seco (Durán, 1985; Puentes et al., 1988). Estas características dificultan su laboreo y en este aspecto están en desventaja frente a otros suelos también fértiles y de drenaje moderado, en cuanto a su aptitud de uso agrícola.

Los altos contenidos de arcillas expansivas que presentan estos suelos, le confieren ciertas características que inciden en su comportamiento físico y que son importantes desde el punto de vista del manejo agronómico de los mismos.

5.1.3. Compactación

Los vertisoles por su alto contenido de arcilla expansiva tienen la característica de ser susceptibles a compactarse cuando son traficados o pisoteados con contenidos de agua en el suelo en los que tiene características plásticas.

La capacidad de compactarse un suelo depende del tipo de suelo, el contenido de agua que presente y la compactación inicial. (Hakansson et al., 1988).

En condiciones de sistemas pastoriles, la compactación del suelo es causada por el efecto repetitivo y acumulativo producido por el pastoreo excesivo con el consiguiente pisoteo animal, en condiciones de humedad del suelo dentro de los

límites de plasticidad (Proffit et al., 1995). Edmond (1963) menciona que en condiciones de altos contenidos de agua en el suelo los efectos de la compactación provocados por el pisoteo animal, alteran las propiedades del suelo, las que repercuten en forma indirecta sobre la producción de las pasturas. El mismo autor señala que en condiciones de suelo seco, el daño por el sobrepastoreo es mas un efecto directo, provocando una restricción en el área foliar, disminuyendo la capacidad fotosintética. Además, el sobrepastoreo en condiciones extremas, causa la eliminación de la cobertura vegetal, resultando en una mayor exposición del suelo al contacto directo de la pezuña del animal con el suelo y por otro lado, al mayor efecto a los agentes erosivos incrementando el riesgo de erosión.

La reducción de la porosidad es uno de los mayores impactos físicos que produce la compactación. Este aspecto incide en una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas (Cornish et al., 1987). Al mismo tiempo, las raíces tienen más dificultad en penetrar en el suelo y un acceso reducido a los nutrientes. La actividad biológica queda de esta forma, sustancialmente disminuida. Otro efecto de la compactación es el aumento de la escorrentía, disminuyendo la tasa de infiltración del agua de lluvia. Esto incrementa el riesgo de erosión y la pérdida de las capas superficiales de suelo. Sin embargo las características anteriormente mencionadas de los vertisoles, de expansión-contracción frente a las variaciones de los contenidos de agua en los diferentes períodos del año, y los altos contenidos de materia orgánica que presentan, les confieren una gran capacidad de resiliencia frente a los efectos de compactación provocados por el pisoteo animal. En condiciones de sistemas de producción de ganadería extensiva, cuya base de producción forrajera es el campo natural, existe una acumulación importante de materia orgánica en superficie, que determina una mayor capacidad de soporte al pisoteo. Soane (1990) destaca las propiedades de la materia orgánica del suelo, que le confieren mayor elasticidad, así como también mayor estabilidad de los agregados (Carpenedo & Mielniczuk, 1990). En condiciones similares en relación a la no remoción del suelo en sistemas de siembra directa, Bayer et al. (2000) y Amado et al. (2001) destacan la acumulación de materia orgánica en superficie, que le confieren al suelo una mayor resistencia a la compactación (Braidá, 2004).

5.1.4. Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) es una medida de la resistencia del suelo a la introducción de un objeto. El instrumento utilizado para medir este parámetro es el penetrómetro, que consta de un sensor que registra las variaciones de RP del suelo cuando se introduce un vástago de metal de punta cónica. Esta medida permite estimar el impedimento mecánico del suelo al crecimiento radicular, detectando capas compactadas. Se han establecido valores críticos para el crecimiento radicular, que indican que por encima de 2.0 MPa se impide el crecimiento y funcionamiento del sistema radicular (Taylor et al., 1966).

De acuerdo con Bradford (1986), los factores del suelo que influyen en la RP son el contenido de agua, la textura, la densidad, la compresibilidad y la estructura.

El contenido de agua en el suelo actúa sobre las fuerzas físicas de atracción entre partículas que intervienen en el suelo: cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión entre las partículas de suelo disminuye cuando el contenido de agua en el suelo es mayor. Por otro lado, cuando el contenido de agua en el suelo es mayor, las fuerzas que predominan son las de adhesión, que intervienen por atracción entre las partículas de suelo y las películas de agua que las recubren (Baver et al., 1972). Martino & Shakewich (1994), reportan la relación entre resistencia a la penetración y contenido de agua en el suelo. Los contenidos de materia orgánica y la naturaleza y contenido de arcilla, determinan los límites de consistencia propuestos por Atterberg (Ordoqui et al., 1980). Para los tres estados de contenido de agua en el suelo (seco húmedo y mojado), corresponden diversas formas de consistencia. La consistencia dura se presenta en suelo seco, coincidiendo con la mayor atracción partícula-partícula, y es mayor cuando el suelo es más arcilloso porque existen más puntos de contacto entre las partículas del suelo. En este estado de consistencia la RP es máxima. Cuando el suelo está húmedo, presenta consistencia friable, la cual se caracteriza por deformarse frente a determinadas presiones y recuperar el estado original. Finalmente si el contenido de agua en el suelo aumenta hasta el punto de suelo mojado, la consistencia puede ser plástica, pegajosa y aún fluída. El suelo, cuando se encuentra en consistencia plástica, si es sometido a fuerzas externas manifiesta una deformación y no recupera el estado original al cesar dicha fuerza. Desde el punto de vista de la compactación, este estado es en el que el suelo tiene mayor susceptibilidad de compactarse (Soane & Owerkerk, 1994).

Busscher et al. (1997) estudiaron la variación de la RP con el contenido de agua en el suelo y concluyeron que es necesario la corrección por dicho contenido.

La compactación incrementa la densidad del suelo y aumenta la RP, por provocar un acercamiento entre las partículas de suelo, aumentando la unión entre las mismas.

5.1.5. Principales propiedades físicas del suelo (calidad física del suelo) que influyen en el desarrollo radicular de las pasturas

El desarrollo radicular y su eficiencia funcional juegan un rol fundamental en la absorción de agua y nutrientes requeridos para satisfacer las demandas de la planta. Así es que en la medida que las limitaciones proporcionadas por el medio donde se desarrollen sean menores, mejores serán los niveles de establecimiento, crecimiento, producción y sobrevivencia de las especies forrajeras.

Los efectos provocados por el tráfico animal sobre algunas propiedades físicas del suelo durante el período de pastoreo ha sido reportado por varios autores. Laycock & Conrad (1967) evaluaron el efecto de diferentes cargas animales sobre la densidad del suelo, encontrando que la misma era mayor cuando mayor era la carga animal. En un trabajo en el que evaluaron el efecto de 25 años de pastoreo con ganado, McCarty & Mazurak (1976) encontraron diferencias en densidad del suelo y conductividad hidráulica cuando compararon las áreas pastoreadas y excluidas. Los resultados obtenidos por Abdel-Magid et al. (1987) no presentaron diferencias en la densidad del suelo ni en la infiltración, en sistemas de rotación con pastoreo. El contenido de agua en el suelo en el momento de pastoreo, y la cantidad de cobertura vegetal, afectan en forma diferente las alteraciones en las propiedades físicas provocadas por el pisoteo animal (da Silva et al., 2003).

Cornish et al. (1987) trabajando con especies forrajeras estudió la respuesta del sistema radicular a los estreses físicos. Encontró que a medida que la densidad del suelo se incrementaba, disminuía el espacio poroso disponible para el intercambio gaseoso, incrementando los riesgos de anaerobiosis. Por otro lado, bajos contenidos de agua en el suelo limitaban la extensión radicular por el incremento en la impedancia mecánica ofrecida por el suelo.

Las mismas conclusiones son presentadas por Letey (1985), trabajando con cultivos. Dicho autor introduce el concepto de “non-limiting water range” (o intervalo

de agua no limitante), que considera el intervalo de agua en el suelo por encima del cual comienza a limitarse el intercambio gaseoso, y por debajo del cual la limitante es la resistencia mecánica a la penetración. Da Silva et al. (1994), modificaron ese concepto e introdujeron el concepto de intervalo hídrico óptimo (IHO) que es el rango de contenido de agua en el suelo donde el crecimiento vegetal no es limitado. El incremento de la densidad del suelo por compactación, resulta en una disminución del espacio poroso, principalmente de la macroporosidad, como consecuencia de la degradación de la estructura. Este efecto de compactación provoca una reducción o estrechamiento del IHO.

Las condiciones físicas del suelo que determinan el crecimiento radicular son la resistencia mecánica, el contenido de agua en el suelo, la aireación y la temperatura del suelo, evaluadas a través de resistencia a penetración, potencial de agua en el suelo, difusión de oxígeno y temperatura respectivamente.

5.1.6. Contenido de agua en el suelo

El suelo actúa como reservorio del agua de lluvia a través de fenómenos de adsorción y capilaridad. Este fenómeno permite suministrar agua a los vegetales en los períodos comprendidos entre dos lluvias consecutivas.

El contenido de agua en el suelo va afectar tanto el desarrollo vegetal, como la temperatura del suelo, la resistencia a la penetración y el intercambio gaseoso del sistema radicular.

La fuerza con la que el agua es retenida en el suelo depende del contenido presente (Hillel, 1998), siendo mayor la fuerza de retención cuando el contenido de agua en el suelo es menor. La relación entre el contenido de agua y la energía necesaria para extraerla, en diferentes momentos, responde a una función denominada curva característica de agua. Dicha curva sirve para conocer el contenido de agua del suelo expresado en masa o en volumen, a los diferentes valores de energía necesaria para extraerla. Esta energía es evaluada por el ψ_m (potencial de matriz, cuando el signo es negativo) o la succión de matriz (cuando tiene signo positivo). La curva característica, cuando el contenido de agua se expresa en base al volumen del suelo, permite caracterizar la distribución por tamaño del espacio poroso y también, estimar la conductividad hidráulica (Poulsen et al., 1999).

Es importante conocer como incide el manejo al cual son sometidos los vertisoles en las características físicas que determinen una buena calidad de suelo.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto sobre la calidad física del suelo, del pisoteo animal en la utilización del forraje por pastoreo directo y bajo condiciones de cultivos de arroz en sistema arroz ganadería.

5.2. MATERIALES Y METODOS

En el campo experimental de INIA Glencoe, se realizaron dos experimentos, con la finalidad de conocer la respuesta al riego de pasturas de mejoramientos de campo. En el primero fue utilizado un diseño clásico que permitió estudiar la respuesta a un número limitado de regímenes de riego. Este experimento estuvo conformado por dos ensayos uno pastoreado y otro sin pastorear. En el segundo experimento, se utilizó la variación continua de precipitación generada de un aspersor (cañón de riego), con la finalidad de ajustar la función de respuesta de producción de materia seca con muchos niveles de régimen hídrico.

Ambos experimentos estuvieron ubicados sobre un Vertisol de Basalto, caracterizado por un solum de 92 cm, con un horizonte A de 19 cm de espesor, arcillo limoso y con estructura granular. La descripción completa del suelo se presenta en el anexo A y los análisis de caracterización en el anexo B.

En el área donde fueron realizados ambos experimentos existían mejoramientos de campo, establecidos en el año 2000. El mejoramiento sobre el que se instaló el experimento clásico, consistía en la introducción en el campo natural de *Trifolium repens*. El segundo experimento se realizó sobre un mejoramiento de dos especies individuales en áreas contiguas, *Trifolium repens* y *Trifolium pratense*.

En el primer año no se realizaron pastoreos. Estos comenzaron en el segundo año, a partir del invierno de 2003, realizándose uno por período de crecimiento.

En el experimento 1 se utilizó una carga instantánea elevada con vacunos, 30 animales/ha de 385 kg promedio de peso vivo, durante 4-7 días. Tuvo un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en dos regímenes de riego y un seco. El tratamiento de riego mas frecuente consistía en

reponer la lámina de agua cuando la ETP acumulada era de 30 mm y el riego menos frecuente cuando la ETP acumulada era de 60 mm. La información de la ETP utilizada puede consultarse en la página Web de INIA www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima. Los riegos se realizaron con un equipo de aspersión de instalación permanente, con disposición cuyo diseño permitió una lluvia de riego uniforme en cada una de las parcelas a las que el azar les adjudicó una de los regímenes hídricos descritos arriba. La intensidad usada fue uniforme (6 mm/h), por lo que cada riego del régimen menos frecuente insumió el doble de tiempo que el del régimen más frecuente. Una de las parcelas fue pastoreada y la otra se mantuvo con exclusión de pastoreo. Como estas dos mitades no se aleatorizaron en cada parcela de frecuencia de riego se consideró que el experimento estuvo constituido por dos ensayos independientes con y sin pastoreo. En la figura 1 se presenta el esquema y fotos del experimento 1.

El experimento 2 consistió en superposición del círculo de riego de un aspersor con alcance de 30 m de radio, sobre franjas contiguas de mejoramientos con dos especies forrajeras, *Trifolium repens* (trébol blanco) y *Trifolium pratense* (trébol rojo), cruzadas perpendicularmente por franjas de utilización del forraje mediante 3 intensidades de pastoreo. Los tratamientos de intensidad de pastoreo fueron: (i) exclusión de pastoreo, (ii) pastoreo con carga baja (que consiste en el pastoreo de 20 animales ha⁻¹ de 385 kg de peso vivo promedio, durante 4 días) y (iii) pastoreo con el doble de la carga del tratamiento 2 (40 animales ha⁻¹ de 385 kg de peso vivo promedio durante 4 días). Los animales tuvieron acceso al experimento durante el invierno y primavera previos al riego, pastoreando con el régimen antes mencionado, y durante el verano.

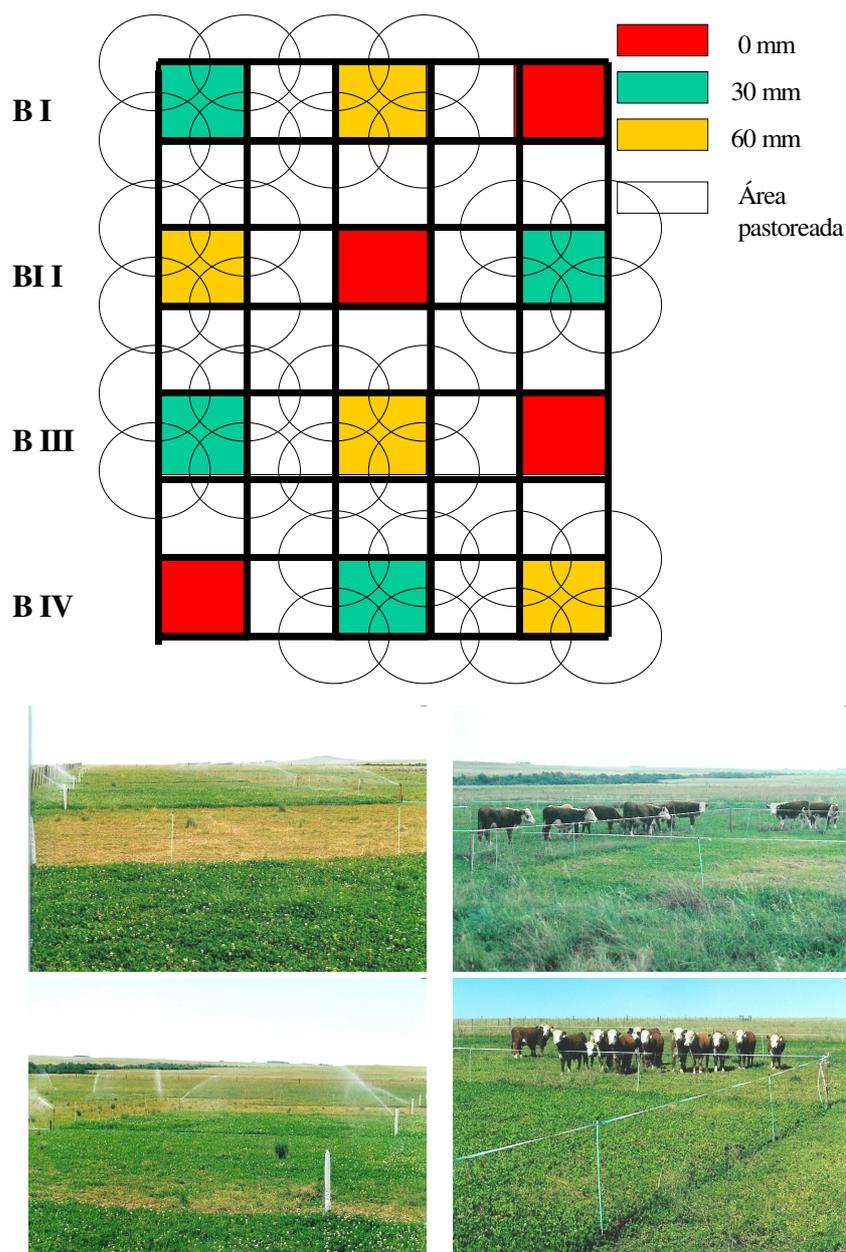


Figura 1 - Esquema y fotos de la disposición experimental del experimento 1.

El aspersor generó un gradiente de precipitación que fue medido mediante una retícula de 209 puntos (separados entre sí 3.5 m x 3.5 m) cubriendo en total un área de 2.700 m². En los puntos de la retícula se colocaba un recipiente de plástico de 8.4 cm de diámetro para medir la precipitación en cada riego. El período de riego estuvo comprendido entre el 05/01/2004 al 09/02/2004, no habiéndose registrado en dicho período ocurrencia de precipitaciones pluviales. En la figura 2 se presenta esquema y foto del experimento 2.

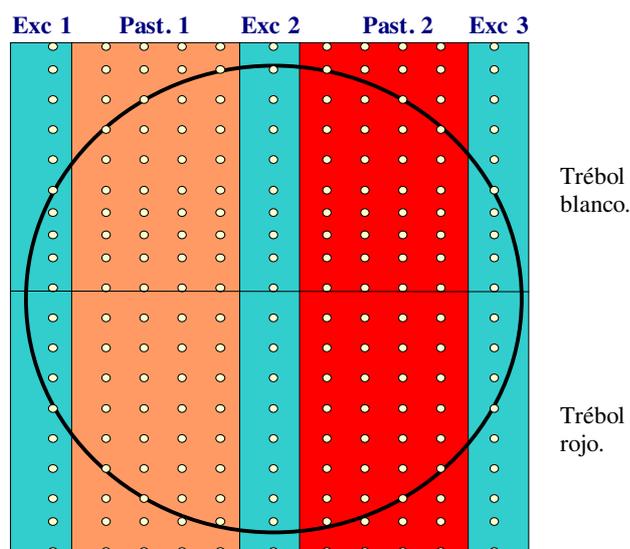


Figura 2 - Esquema y foto de la disposición experimental del experimento 2.

Experimento 3. Se condujo un tercer experimento realizado en un Vertisol de basalto localizado a $32^{\circ} 41'$ latitud S e $56^{\circ} 16'$ longitud W, en el departamento de Tacuarembó, en la República Oriental del Uruguay, en la Estancia "Mangarú", perteneciente a la sucesión de José Miguel Otegui.

En este trabajo se consideraron dos situaciones de uso de suelo: (a) Suelo bajo cultivo de arroz, que antes de comenzar el trabajo (1999) era campo natural y (b) Campo natural en condiciones de pastoreo con animales.

5.2.1. Curva de retención característica, densidad del suelo, porosidad total, macro y microporosidad

Fueron tomadas muestras imperturbadas de 68,7 cm³. En el laboratorio se saturaron de agua y cuando la expansión de los coloides generó aumento del volumen de la muestra, esta se recortó para que el volumen a considerar no superara los 68,7 cm³.

Las muestras se equilibraron a 1, 6, 33 y 100 kPa, en los dos primeros casos en mesa de tensión y en los dos segundos casos en aparato de placas porosas de Richards. Con los contenidos volumétricos en equilibrio con dichas presiones se construyó la curva característica de agua en el suelo.

Con la masa seca a 105 °C se calculó densidad del suelo (Ds). La porosidad total se calculó a partir de la Ds y una densidad de partículas de 2,60 Mg m⁻³ (Ponce de León, 1981).

Se consideró como macroporosidad, el porcentaje volumétrico de agua de las muestras, desalojado entre saturación y luego de equilibradas con 6 kPa. La microporosidad fue considerada como el contenido volumétrico de agua en equilibrio con 6 kPa.

En el experimento 1, se tomaron 3 muestras por unidad experimental a la profundidad de 0 – 3 cm, totalizando 36 muestras de las parcelas excluidas de pastoreo y otras 36 muestras de las parcelas que estuvieron pastoreadas.

En el experimento 2, se tomaron 3 muestras por unidad experimental a la profundidad de 0 – 3 cm, totalizando 12 muestras de las franjas excluidas de pastoreo y 12 muestras de las franjas que estuvieron pastoreadas. A la profundidad de 9 – 12 cm se tomaron 2 muestras por franja experimental totalizando 8 muestras de las franjas excluidas de pastoreo y 8 muestras de las franjas que estuvieron pastoreadas.

5.2.2. Determinación de la densidad del suelo por el método del terrón parafinado

En condiciones de suelo seco, el 29/03/2004 se extrajeron 3 muestras por unidad experimental, consistentes en terrones de aproximadamente 8 cm de diámetro en la profundidad de 0 – 10 cm de suelo, los cuales eran sumergidos en

parafina líquida para luego determinar su volumen por desplazamiento de agua y su masa seca, con los que se calculó la D_s .

5.2.3. Deformación de la superficie por simulación mecánica de pisoteo animal.

Se utilizó un aparato especialmente diseñado para este fin, consistente en un vástago de metal de un cm^2 de superficie de contacto con la superficie del suelo, soportado verticalmente, al cual se le aplicaban diferentes cargas para lograr presiones sobre la superficie del suelo de 300, 400, 500, 600, 1000, 1500 e 2000 kPa.

Las diferentes presiones fueron aplicadas en forma sucesiva e incremental, sin cambiar de posición del aparato. Se registró la magnitud de penetración (deformación) del vástago en el suelo, utilizando un calibre con precisión de centésima de mm.

Las determinaciones fueron realizadas el 21/08/2003, con contenido de agua en volumen en el suelo de 39 %. Las determinaciones realizadas en el experimento 1 fueron tres en las parcelas excluidas de pastoreo y tres en las parcelas pastoreadas. Las determinaciones realizadas en el experimento 2 fueron tres en las franjas excluidas y tres en las franjas de carga baja.

5.2.4. Ensayo de compresibilidad

En el experimento 2, el 02/12/2004 fueron extraídas 8 muestras por cada unidad experimental, totalizando 24 muestras a la profundidad de 0 – 3 cm y 4 muestras por cada unidad experimental, totalizando 12 muestras a la profundidad de 9 – 12 cm. Después de saturar las muestras, se separó la mitad de las muestras extraídas de 0 – 3 cm y se equilibraron a las tensiones a 33 kPa y a la otra mitad a la tensión 10 kPa en aparato de placas porosas de Richards, mientras que las extraídas a la profundidad de 9 a 12 cm se equilibraron a 33 kPa.

Para la evaluación de la compresibilidad, las muestras en los anillos metálicos fueron sometidas a un ensayo de compresión en una prensa de compresión uniaxial, con aplicaciones secuenciales de cargas estáticas de 12.5, 25, 50, 100, 200, 400 y 1600 kPa con un tiempo de carga de 5 minutos. En base a la variación

vertical, medido en la prensa después de la aplicación de cada una de las cargas, se calculó los correspondientes índices de vacío y densidad de la muestra de suelo, con los cuales fueron obtenidas las curvas de compresión, para determinar el coeficiente de compresión (C_c) y la presión de preconsolidación (σ_p) de cada una de ellas, a través del programa Compress (Reinert et al., 2003), conforme método de Casagrande (Holtz & Kovaks, 1981) esquematizado en la figura 3.

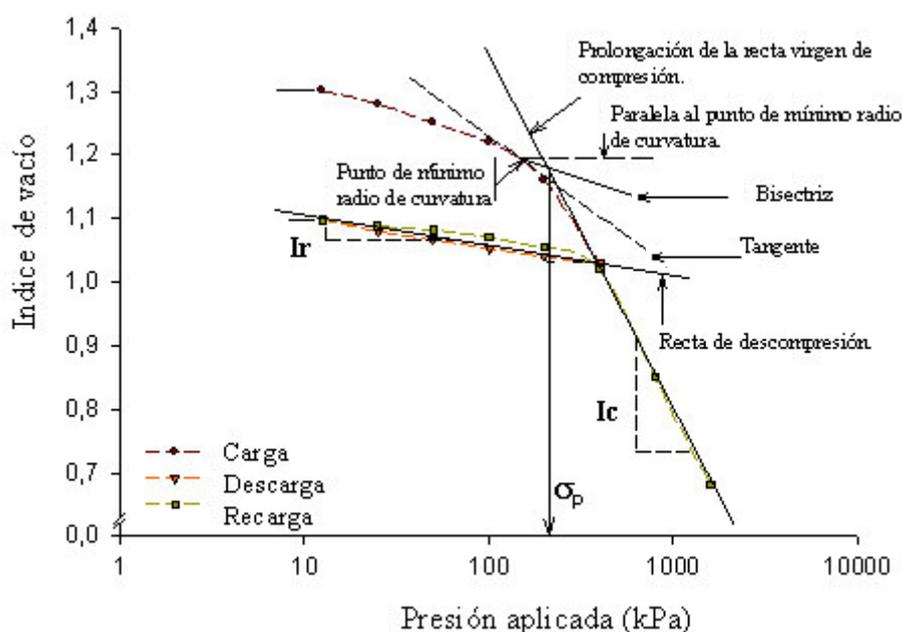


Figura 3 - Esquema para determinación de la curva de compresibilidad: presión de preconsolidación (σ_p), índice de compresión (I_c) e índice de relajación (I_r) (adaptado de Braida, 2004).

La elasticidad del suelo fue evaluada en las mismas muestras y condiciones en que fue evaluada la compresibilidad. Para eso, las cargas en la prensa uniaxial fue realizado en tres etapas: primero se aplicaron las cargas 12,5; 25; 50; 100; 200 y 400kPa, segundo se realizó la descarga secuencial de las cargas aplicada, y finalmente terminada la descarga, se procedió nuevamente a cargarse con todas las cargas incluyéndose además las cargas de 800 y 1600 kPa. Tanto en las cargas como en las descarga las lecturas fueron realizadas pasados 5 minutos de la aplicación de la carga.

5.2.5. Resistencia a la penetración y contenido de agua del suelo

En el experimento 2, el 29/01/2004 se tomaron medidas de resistencia a penetración (RP) mediante penetrómetro de cono (Bradford, 1986) y de contenido de agua volumétrico en los primeros 15 cm el suelo con TDR (Topp et al., 1980), en cada uno de los puntos de la retícula. En cada punto se obtuvo un valor de cada una de estas dos variables mediante el promedio de tres observaciones independientes.

Para comparar el efecto de la compactación superficial de suelo por el pisoteo animal y su variación con el contenido de agua en el suelo después de provocada la compactación por el pisoteo animal, se realizó un seguimiento de la variación de RP, a partir del momento que se retiraron los animales del pastoreo, con lecturas semanales de RP, y contenido de agua en el suelo desde el 26/03/2003 hasta el 02/04/2003.

En el experimento 3 se midió la RP en las diferentes etapas del cultivo de arroz y en diferentes posiciones en relación a la huella de la cosechadora (o zona de tráfico) a diferentes contenidos de agua en el suelo. Las lecturas fueron hechas con el penetrómetro con adquisición electrónica de datos cada 3 cm de incremento de profundidad. Fueron realizadas tres determinaciones por punto, con tres repeticiones de campo. Las determinaciones de RP realizadas fueron antes de inundar el área el 05/12/1999, después de inundado el 15/01/2000, antes de la cosecha de arroz el 15/03/2000 y antes de la cosecha de arroz y en la huella de la cosechadora, el 25/03/2001. A la cosecha en los dos años fue medida la deformación provocada por el tráfico de la cosechadora por el uso de un perfilómetro. En el campo natural también fueron realizadas determinaciones de RP a diferentes humedades del suelo.

5.2.6. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos fueron realizados por el paquete estadístico SAS, realizándose análisis de varianza en el experimento 1 y comparación de medias por prueba t en los experimentos 2 y 3. Las pruebas t se realizaron considerando la posibilidad que las varianzas de las medias comparadas pudieran ser diferentes.

El nivel de significación considerado fue del 10 %, excepto que expresamente se indique de otro modo. Ello es debido al alto error experimental asociado normalmente a las determinaciones de propiedades físicas y mecánicas de suelos.

5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. Curva de retención de agua, densidad, porosidad del suelo

Experimento 1

Los resultados a la profundidad de 0 – 3 cm se presentan en las figuras 4 y 5. En el Cuadro 1 se presenta la significación estadística de los contrastes ortogonales según el ANOVA conjunto de los dos ensayos (con pastoreo y con exclusión de pastoreo), observándose que las diferencias en D_s y P_t no fueron significativas.

Por tratarse de dos ensayos independientes, no puede objetivarse estadísticamente en forma directa la diferencia entre exclusión y pastoreo. Sin embargo, en las figuras 4a, 4b y 4c, puede observarse que siempre la tendencia es, a igual succión, mayores valores de contenido de agua en los tratamientos pastoreados, independientemente de la frecuencia de riego. Esto es coincidente con los resultados del experimento 2 (Figura 6a de 0 – 3 cm), en el que las diferencias pudieron objetivarse estadísticamente por prueba t (Cuadro 2). En las Figuras 4a, 4b y 4c, se presentan los resultados de D_s que no fueron estadísticamente diferentes entre los tratamientos de riego a pesar de la imposibilidad de comparación estadística ya señalada son casi iguales entre tratamientos pastoreados y no pastoreados. Cuantitativamente, la diferencia de D_s es mas marcada cuando se utilizó el método del terrón parafinado (Figura 5).

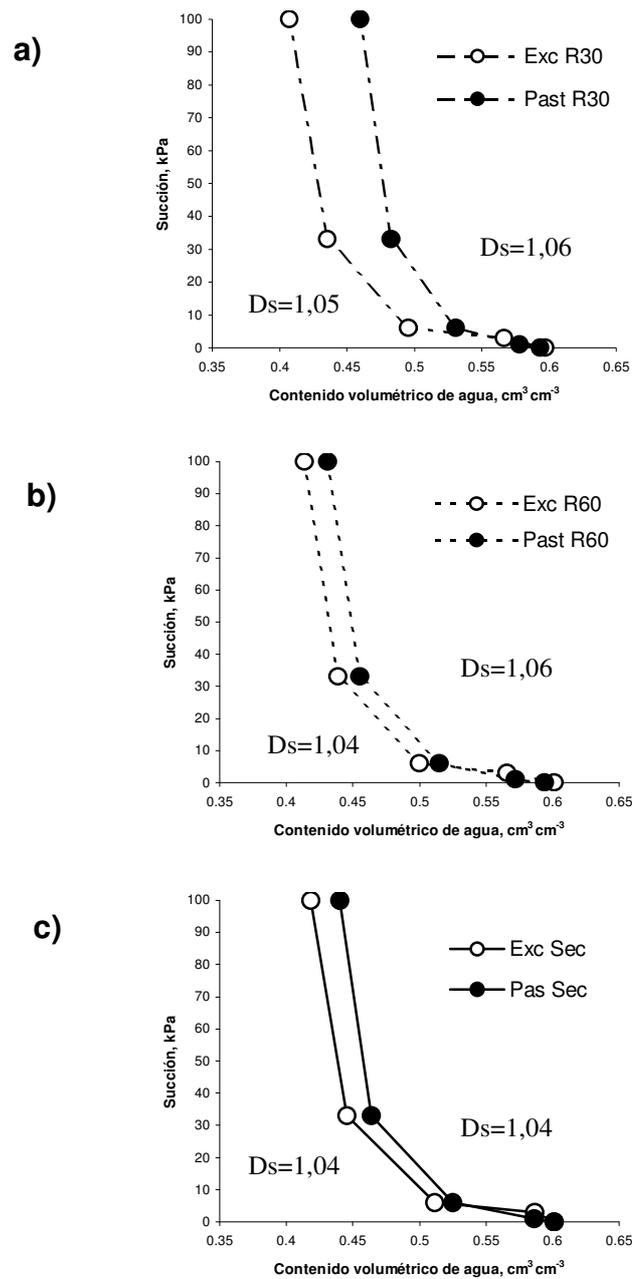


Figura 4 - Curvas características de retención de agua y densidad del suelo (D_s), de los tratamientos de Riego R30 (a), R 60 (b) y seco (c), bajo exclusión de pastoreo (Exc) y con pastoreo (Past) en el experimento 1 en la profundidad de 0 – 3 cm.

Cuadro 1 - Probabilidad de $>F$, según Anova conjunto, para densidad del suelo (Ds), porosidad total (Pt), macro y microporosidad y humedad gravimétrica (Ug) a 33 y 10 kPa.

Contraste	Ds	Pt	Macro	Micro	Ug	
					33 kPa	10 kPa
Secano (S) Riego (R)	NS	NS	0,080	NS	0,102	0,156
Riego (R) 30 vs Riego 60	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Pastoreo vs Exclusión, S vs R	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Pastoreo vs Exclusión, R30 vs R 60	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Sin embargo en el Cuadro 1, también se marca una diferencia en macroporosidad ($P>F = 0,08$), con mayor valor en secano que en el promedio de los tratamientos regados. Inversamente, a las dos succiones mayores (33 y 10 kPa), tiende a marcarse, con débil significación estadística ($P>F = 0,102$ y $0,156$ respectivamente), mayor retención de agua en los tratamientos regados que en el secano. Esto significaría que, con efecto menor que el del pisoteo, el riego si bien no alteró significativamente la Ds y por lo tanto la Pt, habría cambiado su distribución disminuyendo macroporos y aumentando los microporos mas pequeños.

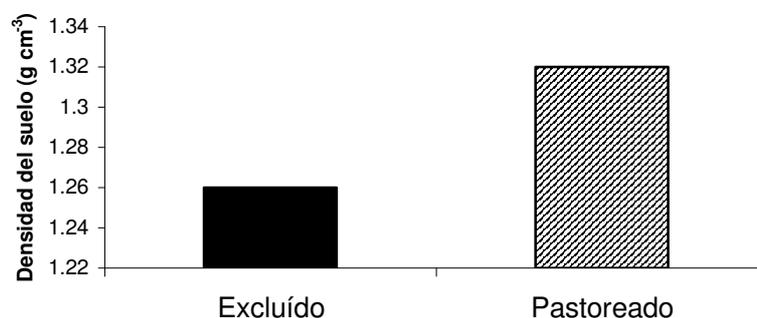


Figura 5 - Valores de densidad del suelo por el método del terrón parafinado, en suelo excluido y pastoreado (compactado) en experimento 1, en la profundidad de 0 8 cm.

Experimento 2

Los resultados se presentan en la Figuras 6 y 7. En este experimento, además de la profundidad de 0 – 3 cm (Figura 6a y Figuras 7a, 7b y 7c), también se estudió a la profundidad de 9 – 12 cm (Figura 6b). Como se indicó anteriormente, en este experimento, las medias fueron comparadas por Prueba t. Los resultados de esas comparaciones para las muestras de superficie (Cuadro 2), permiten observar diferencias significativas, mientras que a mayor profundidad (Cuadro 3), no se presentan diferencias significativas. Esto indicaría que el pisoteo animal afectó al suelo solo en superficie.

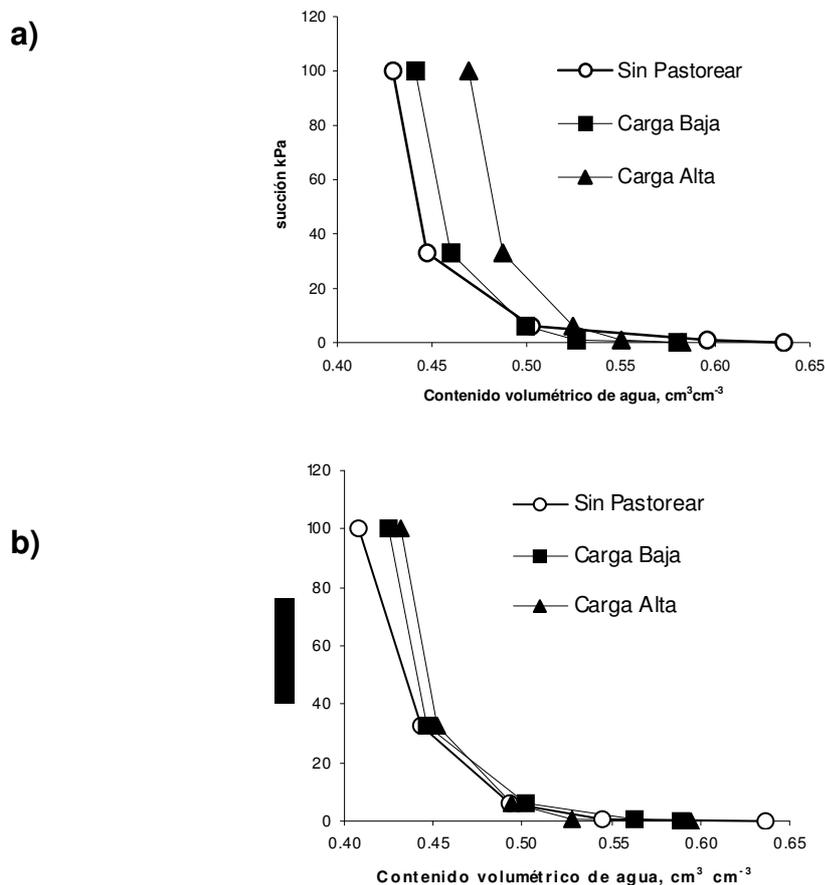


Figura 6 - Curva característica de agua en el suelo en las profundidades de 0 - 3 cm (a) y 9 – 12 cm (b), en el experimento 2.

En cuanto a las curvas características de agua en el suelo, en la profundidad de 0 - 3 cm (Figura 6a), se observa un comportamiento como era de esperar en un proceso de compactación. En efecto, cuando el suelo no ha sufrido compactación, tiene menor D_s (Figura 7a), mayor P_t (Figura 7b), y mayor macroporosidad (Figura 7c). Esto se refleja en las curvas características con mayores valores de contenido de agua a bajas succiones. Al compactarse el suelo por el pisoteo animal en los pastoreos, se reduce la D_s y P_t , pero a las succiones mayores (33 y 100 kPa) son los tratamientos pastoreados los que presentan mayores contenidos de agua. A la succión de 6 kPa, donde las curvas se cruzan, no hay diferencias significativas. Es decir que parte del espacio poroso de mayor tamaño, perdido por compactación, se transformó en microporos que retienen agua a succiones mayores (33 y 100 kPa).

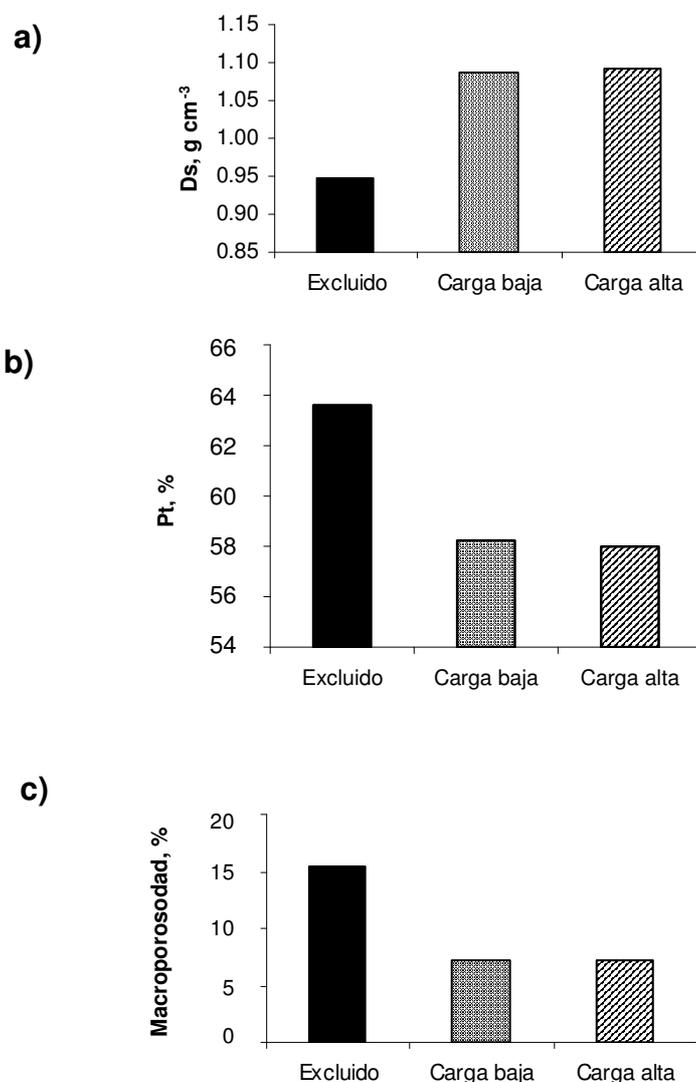


Figura 7 - Valores de densidad del suelo D_s (a), porosidad total P_t (b) y macroporosidad (c), en el ensayo 2, en la profundidad de 0 – 3 cm.

Cuadro 2 - Significación estadística (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza para la profundidad de 0 – 3 cm.

Ds	Macro	Micro	Pt	Humedad volumétrica				
				0 kPa	1 kPa	6 kPa	33 kPa	100 kPa
Exc vs CB 0,0396	Exc vs CB 0,0004	Exc vs CB NS	Exc vs CB 0,0396	Exc vs CB 0,0396	Exc vs CB 0,0679	Exc vs CB NS	Exc vs CB 0,0848	Exc vs CB 0,0728
Exc vs CA 0,0037	Exc vs CA 0,0002	Exc vs CA 0,1442	Exc vs CA 0,0037	Exc vs CA 0,0037	Exc vs CA 0,0012	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS
CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS					

Ds = densidad del suelo (g cm^{-3}); Macro=macroporosidad (%); Micro=microporosidad (%); Pt=porosidad total (%); Exc=exclusión de pastoreo; CB=carga baja; CA=carga alta.

Cuadro 3 - Significación estadística (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza para la profundidad de 9 – 12 cm.

Ds	Macro	Micro	Pt	Humedad volumétrica				
				0 kPa	1 kPa	6 kPa	33 kPa	100 kPa
Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS	Exc vs CB NS
Exc vs CA NS	Exc vs CA 0,0911	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS	Exc vs CA NS
CA vs CB NS	CA vs CB 0,0727	CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS	CA vs CB NS

Ds = densidad del suelo; Macro=macroporosidad; Micro=microporosidad; Pt=porosidad total; Exc=exclusión de pastoreo; CB=carga baja; CA=carga alta.

5.3.2. Deformación de la superficie por simulación mecánica de pisoteo

Los resultados de los dos experimentos se presentan en las Figuras 8 y 9. A bajas cargas o presiones de pisoteo simulado, se manifiesta poca deformación. En el experimento 1, para el análisis estadístico de esta variable se consideró que las áreas pastoreadas y excluidas de cada bloque conformaban un diseño den bloques al azar. En este experimento 1, las observaciones con las que se calculó el valor de cada unidad experimental 12 m x 12 m se tomaron a corta distancia unos de otros. En cambio las observaciones con las que se calculó la media de cada tratamiento de

intensidad de pastoreo en el ensayo 2 estuvieron mas apartadas entre sí, dentro de las franjas de 25 m x 50 m en que dichos tratamientos fueron aplicados. Ello determinó mayor precisión, menor error experimental en la estimación de las medias en el experimento 1 que en el experimento 2.

Lo anteriormente indicado puede explicar que, en el experimento 1, las diferencias sean todas significativas, excepto en la carga menor, mientras que en el experimento 2 solamente tengan significación de consideración las diferencias entre Exclusión y Pastoreado en las tres mayores cargas o presiones del simulador. De acuerdo con Mantovani (1987), las pisadas de animales de 400 kg. de peso vivo ejercen una presión sobre la superficie de aproximadamente 400 kPa. Estos resultados indican que a esas presiones de pisoteo la deformación no es de gran magnitud, tal como se observa en las propiedades físicas previamente discutidas.

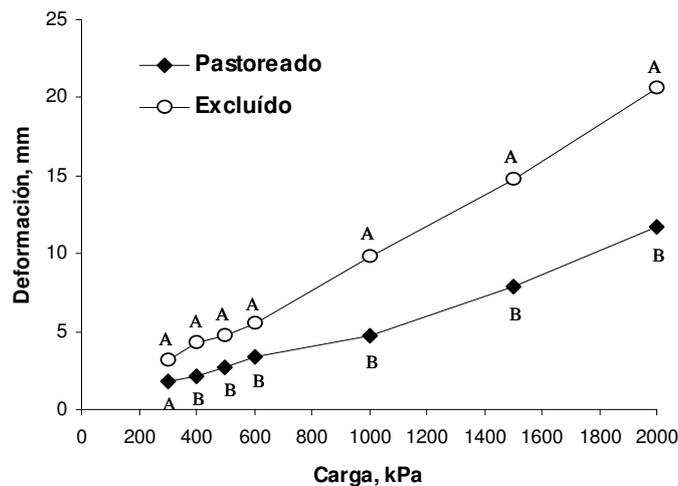


Figura 8 - Deformación del suelo con contenido de agua volumétrico en el suelo de 39 %, frente a diferentes presiones en suelo excluido de pastoreo y pastoreado, en el ensayo 1. Letras diferentes indican diferencias significativas según ANOVA.

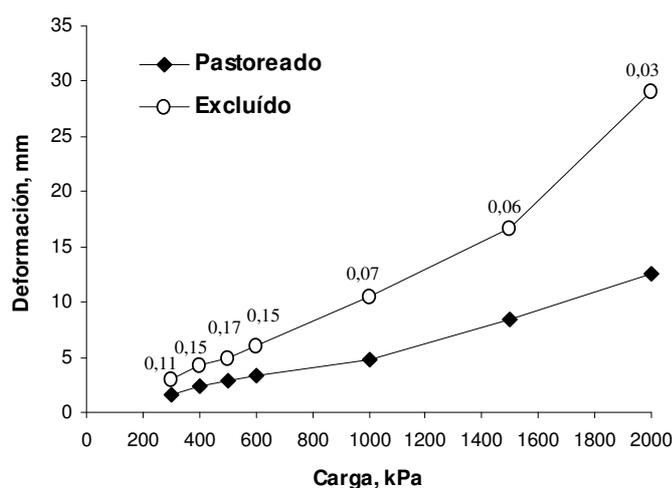


Figura 9 - Deformación del suelo con contenido de agua volumétrico en el suelo de 39 %, frente a diferentes presiones, en suelo excluido de pastoreo y pastoreado, en el ensayo 2. Se presentan los valores de Prueba T, Prob de error Tipo 1.

5.3.3. Compresibilidad del suelo

En el Cuadro 4 se presentan los resultados del análisis estadístico (Prueba T), donde no aparecen diferencias significativas entre las medias de los diferentes parámetros estudiados bajo los diferentes tratamientos. Esto puede deberse a que el número de muestras considerado fuera muy bajo, determinando un alto error experimental.

A pesar de lo anterior, es interesante verificar en el Cuadro 5 que en las muestras de 0 a 3 cm de exclusión de pastoreo equilibradas a 33 kPa, presentan valores de presión de preconsolidación (σ_p) menores a los pastoreados, y que lo mismo se repite en las muestras equilibradas a 10 kPa. La presión de preconsolidación es un estimativo de la capacidad de soporte del suelo, en este sentido la situación de suelo que previamente estuvo sometida al efecto del pisoteo animal, estuvo más compactada y por lo tanto presentó valores mayores de (σ_p).

Cuadro 4 - Significación estadística del estudio de compresibilidad (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza, en muestras equilibradas a 33 kPa de tensión a la profundidad de 0 - 3 cm y de 9 - 12 cm, y en muestras equilibradas a 10 kPa a la profundidad de 0 - 3 cm.

Prof.	Tensión 33 kPa											
	σ_p			Ic			I _r			D _s		
	Exc	Exc	P1	Exc	Exc	P1	Exc	Exc	P1	Exc	Exc	P1
	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs
	P1	P2	P2	P1	P2	P2	P1	P2	P2	P1	P2	P2
0 - 3 cm	0,3110	0,1382	0,6639	0,4833	0,3407	0,8673	0,7323	0,8765	0,9541	0,5265	0,5298	0,7100
0 - 9 cm	0,6394	0,1226	0,5081	0,9270	0,1226	0,3616	0,4456	0,0935	0,0634	0,9145	0,2436	0,2763
	Tensión 10 kPa											
0 - 3 cm	0,3070	0,2109	0,7326	0,3200	0,1857	0,7909	0,3973	0,6236	0,5846	0,3652	0,2497	0,8340

σ_p =presión de preconsolidación; Ic=índice de compresión, I_r=índice de relajación; D_s=densidad del suelo; Exc=exclusión; P1=pastoreo 1; P2=pastoreo 2.

Cuadro 5 - Medias de presión de preconsolidación (σ_p), índice de compresión (Ic), índice de relajación (I_r) y densidad del suelo (D_s), equilibrados a 10 y 33 kPa de tensión, en las profundidades de 0 a 3 cm y 9 a 12 cm, en los 2 tratamientos de pastoreo (Past 1 y Past 2) y en la exclusión (Exc).

Prof	Past	Tensión 33 kPa				Tensión 10 kPa			
		σ_p (kPa)	Ic	I _r	D _s (g cm ⁻³)	σ_p (kPa)	Ic	I _r	D _s (g cm ⁻³)
0 - 3 cm	Exc	38,96	0,70	0,21	0,91	32,48	0,66	0,29	0,92
	Past 1	45,53	0,62	0,22	0,92	43,00	0,50	0,20	1,01
	Past 2	47,53	0,61	0,22	0,94	40,05	0,54	0,24	0,99
9 - 12 cm	Exc	40,93	0,42	0,10	1,13				
	Past 1	34,05	0,43	0,09	1,14				
	Past 2	44,50	0,31	0,07	1,26				

σ_p =presión de preconsolidación; Ic=índice de compresión, I_r=índice de relajación; D_s=densidad del suelo; Exc=exclusión; Past 1=pastoreo 1; Past 2=pastoreo 2.

En coincidencia con lo comentado de lo observado en las medias de presión de preconsolidación (σ_p), de 0 a 3 cm, los valores del índice de compactación (Ic) aparecen mayores en la exclusión de pastoreo que en los tratamientos pastoreados, tanto a 33 kPa como a 10 kPa; estos últimos valores tienden a ser menores a los del equilibrio con 33 kPa. En este sentido, el Ic, que estima la susceptibilidad a la

compactación del suelo, muestra mayores valores en las situaciones excluidas, indicando que es más susceptible a registrar mayores deformaciones que un suelo más compactado cuando son sometidos a igual presión.

Cuando son comparados los valores de I_c a diferentes profundidades, estos aparecen con mayor valor en superficie (de 0 a 3 cm) que en las profundidades de 9 a 12 cm. De acuerdo con Braida (2004), los mayores contenidos de carbono orgánico y biomasa radicular correspondientes al estrato superior del suelo, podrían estar confiriéndole esa mayor capacidad de deformación así como también una mayor elasticidad.

Si se observan las medias del índice de relajación (I_r), se observa que estos presentan también mayores valores en el estrato de 0 a 3 cm que en el estrato de 9 a 12. Este índice que se refiere a la elasticidad del suelo y a su capacidad de recuperar su estado previo a compactarse, puede estar asociado al mayor contenido de carbono y presencia de raíces en superficie como ya fue comentado.

Los valores de densidad del suelo, si bien muy próximos, tienden a ser menores en el tratamiento sin pastoreo.

En la profundidad de 9 a 12, solo se hizo el test en muestras equilibradas a 33 kPa. Además de la no existencia de diferencias significativas, tampoco se observa tendencia entre las medias comparadas. Esto coincidiría con los resultados de los demás parámetros físicos hasta ahora discutidos, que indican que el efecto del pastoreo no se evidencia debajo de 10 cm.

En suma, si bien los parámetros del estudio de compresibilidad no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos de presión de pastoreo del experimento 2, las medias mostraron tendencia a diferenciar la exclusión de las zonas pastoreadas de 0 a 3 cm, pero no hubo ni siquiera tendencia en la profundidad de 9 a 12 cm. Esto tiende a concordar con los resultados de otras propiedades físicas presentadas precedentemente.

En el Cuadro 6, se presentan las diferencias estadísticas entre los diferentes índices de compresibilidad y elasticidad del suelo. Se observan diferencias significativas en los I_c e I_r entre las dos profundidades estudiadas para los tratamientos excluidos y pastoreados en alta carga. La diferencia significativa de D_s , siendo mayores los valores de D_s a la profundidad de 9-12 en relación a los de la profundidad de 0–3 cm, es lo que debe esperarse.

Cuadro 6 - Significación estadística del estudio de compresibilidad (Prob de error de Tipo 1) de comparación de medias de diferente varianza, entre muestras equilibradas a 33 kPa de tensión a la profundidad de 0 - 3 cm y de 9 - 12 cm.

Tratamiento	σ_p	I_c	I_r	D_s
Exc (0-3 vs 9-12)	0,7282	0,0198	0,0010	0,0069
Past 1 (0-3 vs 9-12)	0,4722	0,1863	0,0265	0,0241
Past 2 (0-3 vs 9-12)	0,4068	0,0038	0,0362	0,0684

σ_p =presión de preconsolidación; I_c =índice de compresión, I_r =índice de relajación; D_s =densidad del suelo; Exc=exclusión; Past 1=pastoreo 1; Past 2=pastoreo 2.

En las Figuras 10a, 10b y 10c se presentan las curvas de compresión y recompresión. Se observa que los valores de la curva en la deformación elástica llegan hasta densidades mas elevadas en la muestra superficial que en la mas profunda para las tres situaciones consideradas. Esto nos indica que el estrato superior del suelo es mas susceptible a deformarse. La curva de relajación muestra una mayor pendiente en la situación de suelo superficial, indicando una mayor capacidad de recuperarse de los efectos de compactación. Esto puede ser debido al mayor contenido de carbono orgánico que hay en superficie, como fuera discutido anteriormente.

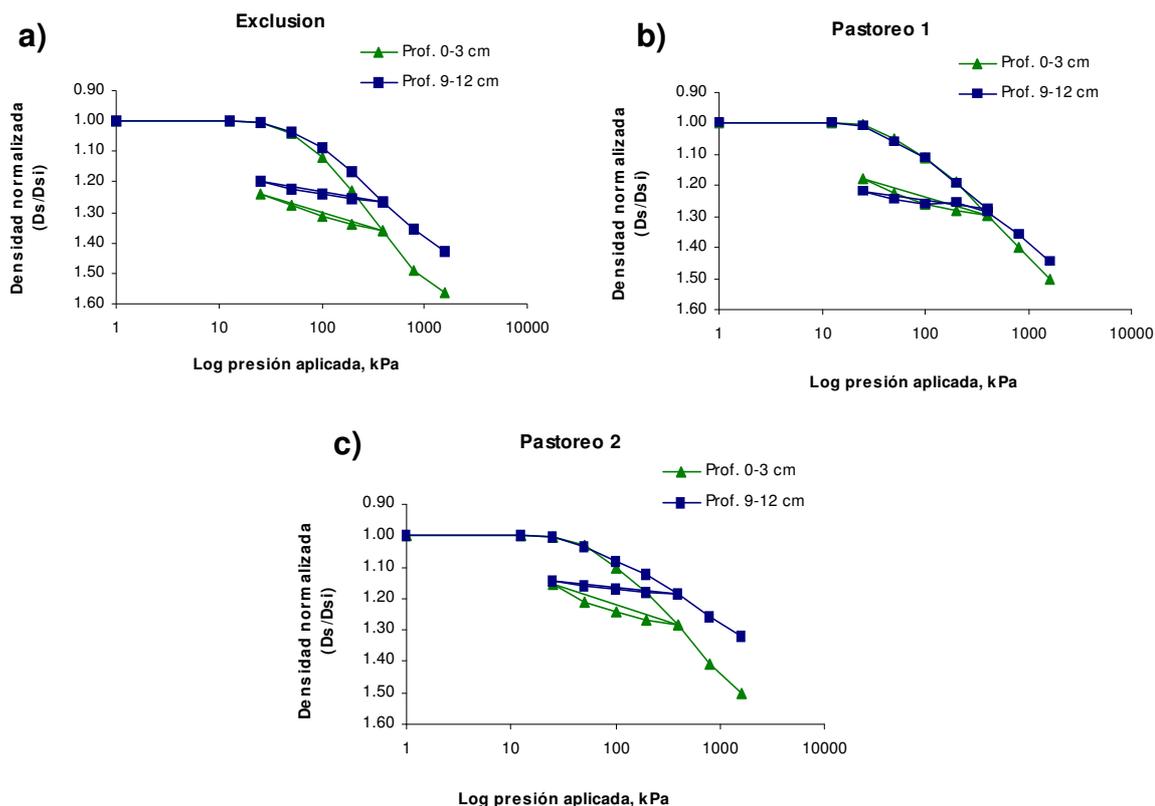


Figura 10 - Curva de compresión y recompresión del suelo para los tratamientos en estudio, Exclusión (a), Pastoreo 1 (b), Pastoreo 2 (c) en las profundidades de 0-3 y 9-12 cm. D_{si} = D_s inicial.

5.3.4. Resistencia a la penetración

Una relación inversa entre la resistencia a la penetración (RP) y contenido de agua en el suelo es demostrada en la figura 11 construida con datos del experimento 2. Ella es de carácter exponencial y, a pesar de la dispersión de puntos, tiene un R^2 con alta significación estadística. Esto evidencia la principal limitante de esta determinación física, que implica el lograr realizar la medida de RP a contenidos de agua (preferentemente succiones de matriz o espesores de las películas de agua alrededor de las partículas) semejantes entre los tratamientos a comparar. Es por lo anterior que dentro de las fajas de intensidades de pastoreo a comparar, los muestreos se realizaron en las zonas que recibieron una precipitación semejante del cañón de riego, destacándose además que el contenido de agua en el suelo era homogéneo por las abundantes lluvias ocurridas antes de realizar el primer muestreo.

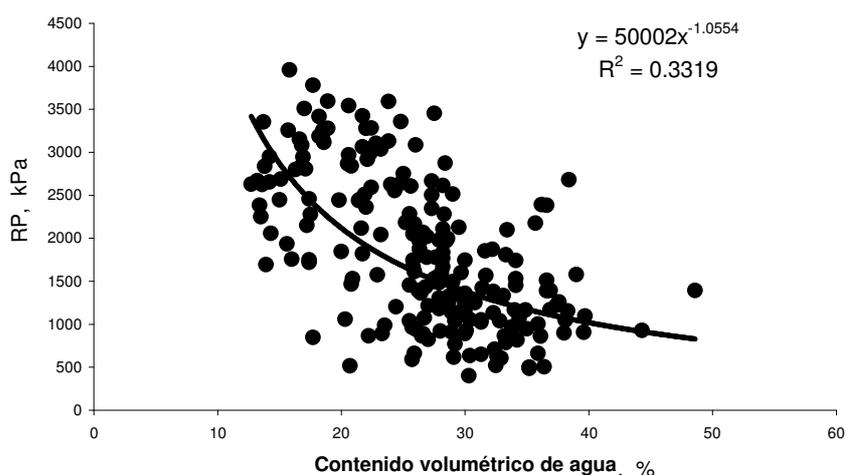


Figura 11 - Relación entre la resistencia a la penetración (RP) y el contenido de agua volumétrico en el suelo hasta 6 cm de profundidad.

Los perfiles de RP hasta 60 cm medidos semanalmente desde el 26/03/2003 hasta el 22/04/2003 se presentan en las Figuras 12a-e.

Previo a la primera fecha del muestreo y mientras los animales estaban pastoreando las parcelas correspondientes a los tratamientos de carga alta y carga baja, el suelo estaba a capacidad de campo (38 % en volumen), condición que se mantiene hasta el primer muestreo porque coincide el momento previo con una lluvia de 40 mm.

El cuadro al costado de la Figura 12a (26/03/2003), muestra que la comparación de medias por Prueba t no indica diferencias en RP con significación a ninguna profundidad, siendo muy bajos los valores de RP en superficie.

Desde la fecha anterior hasta el 03/04/2003, cuando se hicieron nuevamente las determinaciones de RP, llovieron 25 mm, manteniendo el contenido de agua en el suelo. Los resultados mostrados en la Figura 12b, son muy semejantes a los de la fecha anterior, y el cuadro muestra que las comparaciones entre medias no mostraron diferencias significativas.

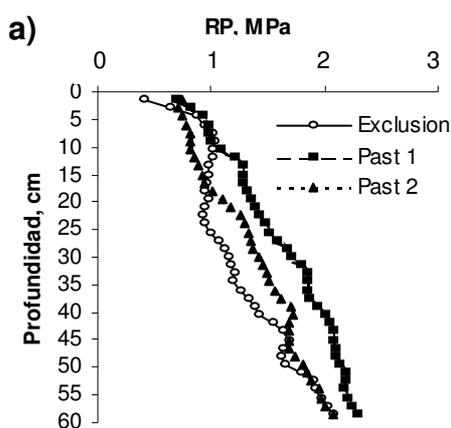
Hasta la tercer fecha de medida, el 08/04/2003, solo llovieron 12 mm el 05/04/2003, por lo que el suelo perdió algo de contenido de agua variando de 36% a 32% , elevándose la RP en superficie en de los tratamientos pastoreados (Figura

12c), cuyas medias superaron a las de la exclusión a 3 y 6 cm con alguna significación estadística (cuadro de la Figura 12c).

Desde la medida anteriormente mencionada y hasta el 17/04/2003, no ocurrieron precipitaciones. El contenido de agua en el suelo hasta 15 cm bajó a una media de 28 % en volumen y los valores de RP se incrementaron, principalmente en los tratamientos con pastoreo (Figura 12d). Según las comparaciones de medias que se presentan en el cuadro de la Figura 12d, aparecen diferencias con significación hasta 9 cm de profundidad. Las diferencias con mayor significación son entre exclusión y ambos tratamientos de pastoreo, pero aún entre estos las diferencias tienen alguna significación.

El día 18/04/2003 llovió 4 mm, por lo que la reposición de agua al perfil fue muy baja y continuó descendiendo el contenido de agua en el suelo hasta el día 22/04/2003 en que se realizó el último muestreo (la media general en la profundidad de 0 – 15 cm fue de 26 % en volumen). Los valores de RP, (Figura 12e) muestran que ello debe haber sido mas marcado en superficie, donde los valores de RP fueron de 2 MPa. Pero en la exclusión y cerca de la superficie, los valores de RP son muy similares a los registrados durante todo el período de medidas, aunque en esta fecha se incrementaron en profundidad. Las diferencias significativas (cuadro de la Figura 12e) fueron entre la exclusión y los tratamientos pastoreados y como en todas las medidas anteriores, perdieron la significación estadística por debajo de los 9 cm.

Las medidas de RP son consistentes con el resto de las propiedades físicas evaluadas, aunque muestran con mayor claridad la diferencia entre los tratamientos pastoreados y el que tuvo exclusión de pastoreo, así como que dichos efectos no tienen significación por debajo de 10 cm.

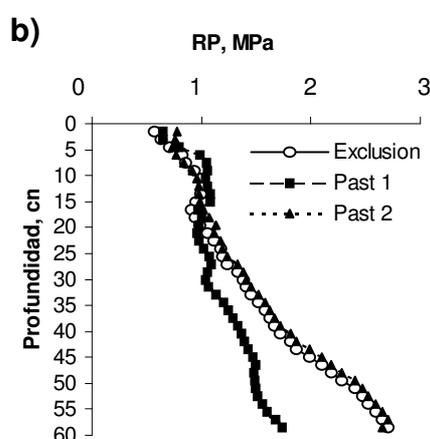


26/03/2003

38 % agua em volúmen.

Prof., cm	RP Exc vs P1	RP Exc vs P2	RP P1 vs P2
3	0,1397	0,1263	0,8163
6	0,3251	0,5598	0,5606
9	0,8033	0,3401	0,3466
12	0,8247	0,2925	0,3194
15	0,7592	0,1228	0,3100
18	0,8655	0,1860	0,1945
21	0,6203	0,2379	0,0744

P=resistencia a la penetración; Exc=exclusión;
P1=pastoreo 1; P2=pastoreo 2.

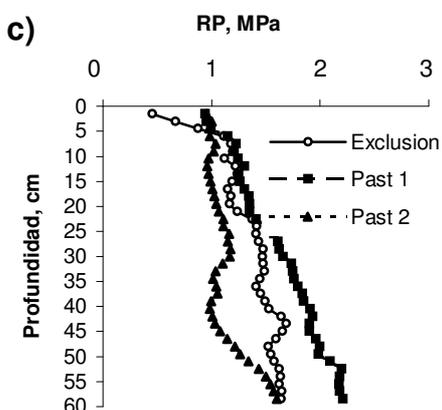


03/04/2003

36 % agua em volúmen.

Prof., cm	RP Exc vs P1	RP Exc vs P2	RP P1 vs P2
3	0,4956	0,2626	0,4418
6	0,8854	0,4223	0,4681
9	0,2948	0,7649	0,6124
12	0,0861	0,5293	0,0271
15	0,0359	0,7772	0,0198
18	0,2401	0,8635	0,0890
21	0,7956	0,7550	0,3257

RP=resistencia a la penetración; Exc=exclusión;
P1=pastoreo 1; P2=pastoreo 2.



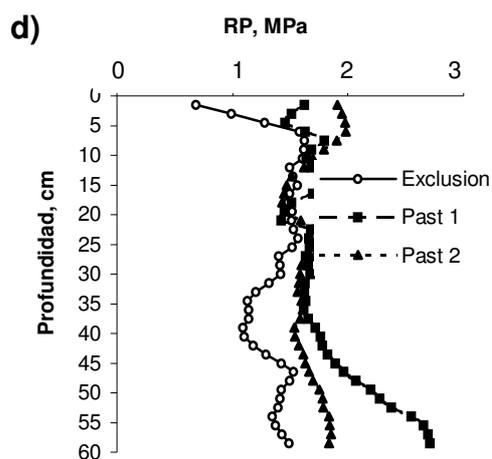
08/04/2003

32 % agua em volumen.

Prof., cm	RP Exc vs P1	RP Exc vs P2	RP P1 vs P2
3	0,0127	0,1192	0,9430
6	0,1419	0,0687	0,7133
9	0,3714	0,3114	0,9227
12	0,8484	0,3115	0,3626
15	0,8078	0,4223	0,2854
18	0,9439	0,2401	0,2701
21	0,4786	0,2763	0,1842

RP=resistencia a la penetración; Exc=exclusión;
P1=pastoreo 1; P2=pastoreo 2.

Figura 12 - Resistencia a la penetración (Figura la izquierda) y su respectivo contraste para las profundidades y tratamientos en estudio (Cuadro a la derecha de la Figura).

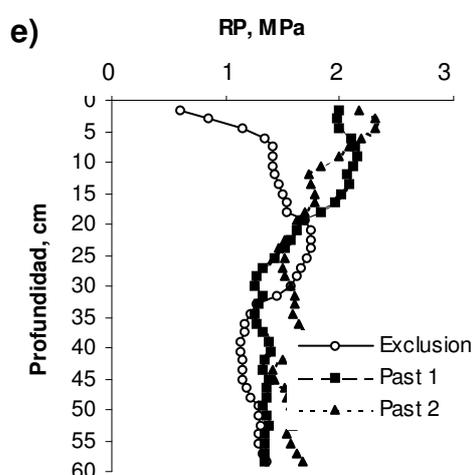


17/04/2003

28 % agua en volumen.

Prof., cm	RP Exc vs P1	RP Exc vs P2	RP P1 vs P2
3	0,0016	0,0032	0,1071
6	0,0493	0,0063	0,0891
9	0,4326	0,0520	0,1142
12	0,3751	0,0908	0,1501
15	0,1474	0,1497	0,6064
18	0,3473	0,2822	0,6661
21	0,7328	0,6399	0,8465

RP=resistencia a la penetración; Exc=exclusión;
P1=pastoreo 1; P2=pastoreo 2.



22/04/2003

26 % agua en volumen.

Prof., cm.	RP Exc vs P1	RP Exc vs P2	RP P1 vs P2
3	0,0542	0,0140	0,6695
6	0,0348	0,0344	0,4479
9	0,1015	0,0557	0,4857
12	0,0830	0,1647	0,8484
15	0,0569	0,2797	0,9033
18	0,0612	0,3608	0,7628
21	0,0538	0,4823	0,5975

RP=resistencia a la penetración; Exc=exclusión;
P1=pastoreo 1; P2=pastoreo 2.

Figura 12. Continuación.

En el **Experimento 3**, los resultados de resistencia a la penetración (RP) se presentan en las Figuras 13a, 13b y 13c. En el primer año de cultivo de arroz (1999) se observaron los mayores valores de compactación entre los 10 a 28 cm de profundidad, cuando el suelo presentaba 22% de contenido volumétrico de contenido volumétrico de agua después de la siembra y antes de la inundación (Figura 13a). Este efecto puede ser explicado por la compactación provocada por el pasaje de rastra de discos en la preparación del suelo para la siembra de arroz. Cuando el suelo fue inundado, la RP en la camada de 18 a 20 cm de profundidad se redujo significativamente, indicando que para esa condición de contenido de agua en el suelo, el mismo estado de compactación indujo a una baja resistencia del suelo, debido a la disminución de las fuerzas de cohesión que actúan entre las partículas de suelo y aumentando las fuerzas de adhesión. Esto cambia la consistencia de dura/friable a plástica (Hillel, 1998). En los primeros centímetros de la superficie del

suelo, en condición del suelo con baja humedad, la resistencia a la penetración era relativamente baja, como consecuencia de la remoción del suelo en la preparación para la sementera.

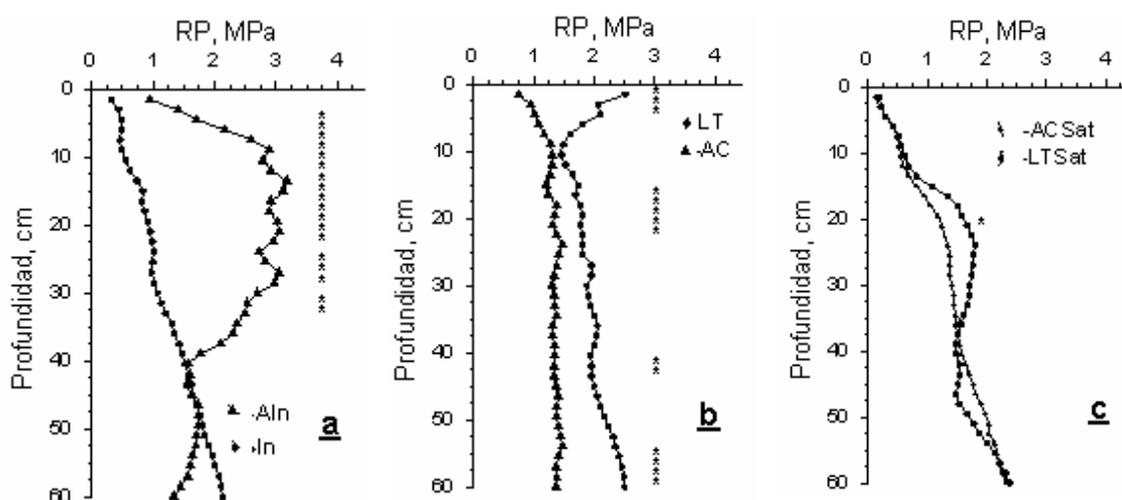


Figura 13 - Resistencia a la penetración en suelo bajo cultivo de arroz, a – antes de inundar el área (AIn) el 5/12/1999 con 22% de humedad y después de inundado (In) el 15/01/2000, suelo saturado; b – antes de la cosecha de arroz (AC), el 15/3/2000, suelo con 25% de humedad, y en la huella (LT) de la cosechadora, suelo con 25% de humedad ; c – antes de la cosecha de arroz, el 25/3/2001, suelo saturado (ACSat) y en la huella de la cosechadora (LTSat), suelo saturado. (*Significativo al 5 %).

Las curvas de RP y la cosecha en año mas seco (2000), con 25% de contenido volumétrico de agua (Figura 13b), muestran que la RP antes de la cosecha era de 1 MPa en los primeros centímetros de suelo. Después de realizada la cosecha, en la huella de la cosechadora se verificó un incremento de la RP hasta los 10 cm de profundidad, indicando compactación adicional superficial provocada por la rueda de la máquina.

Cuando la cosecha fue realizada en el año 2001 en condiciones de suelo saturado, la RP antes de la cosecha fue menor de 0,8 MP en los primeros 10 cm de suelo. Cuando la RP fue medida en la huella de la cosechadora, se observó un incremento de la RP en la camada de 15 a 30 cm, con diferencia significativa a 20 cm de profundidad, indicando compactación adicional a esta profundidad.

Cuando fueron medidas las deformaciones provocadas por el tráfico de la cosechadora en el año 2000, la profundidad de la huella varió de 2 a 4 cm; mientras que en un año húmedo (2001) (Figura 14), la deformación en relación a la horizontal del terreno llegó a 18 cm. Se observó también un desplazamiento lateral de suelo provocado por la rueda, que llegó a alcanzar una diferencia sobre el nivel horizontal del suelo de 10 cm. Esta deformación superficial provoca serias dificultades para aquellas situaciones de uso del suelo que incorporan el sistema de siembra directa de arroz, pues exigen acondicionamiento previo de la superficie del suelo para la próxima siembra.

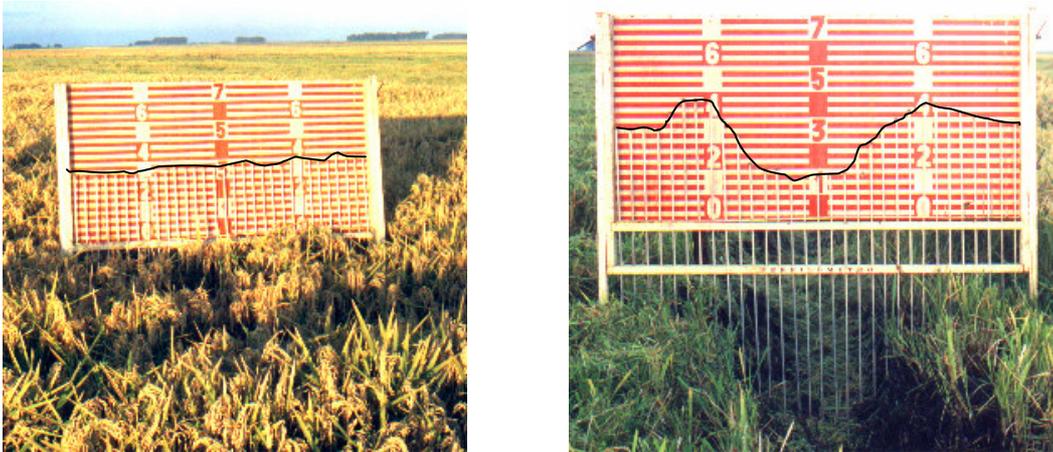


Figura 14 - Imágenes de perfilómetro en condición de cultivo de arroz, antes de la cosecha (izquierda) y post cosecha, en la huella de la rueda de la cosechadora (derecha).

En el campo natural, fueron comparadas las curvas de RP en tres condiciones de contenido volumétrico de agua en el suelo (Figura 15). Cuando el contenido volumétrico de agua en el suelo del suelo era de 24%, la RP tuvo valores superiores a los 2 MPa, encontrándose una zona más compactada entre 5 y 8 cm, resultado del efecto de las pezuñas del ganado que pastoreaba el área. A medida que el contenido volumétrico de agua en el suelo aumentó a valores de 29%, la RP disminuyó y la capa más resistente persistió. En la condición de suelo saturado, fueron registrados los menores valores de RP, inclusive en la zona más resistente.

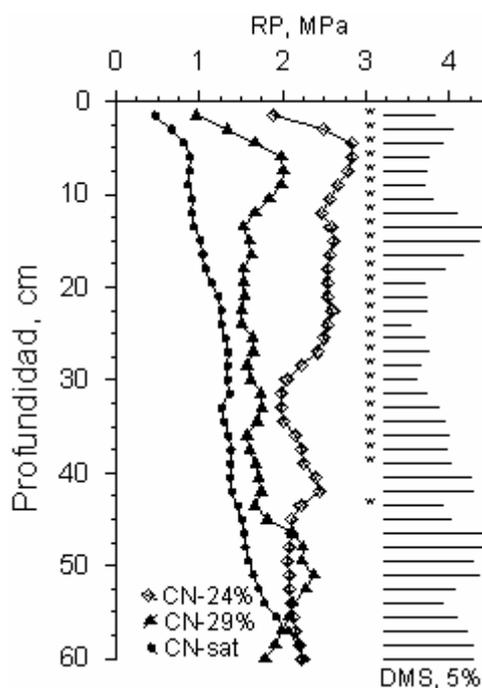


Figura 15 - Resistencia a la penetración en suelo bajo campo natural a diferentes condiciones de humedad del suelo.

5.4. CONCLUSIONES

Existe un efecto de compactación por pisoteo animal del suelo en directo contacto con la superficie. A la segunda profundidad estudiada (9 a 12 cm), no se detectó efecto significativo del pisoteo animal.

En varios casos, las diferencias señaladas fueron tendencias con baja significación estadística. Esto se entiende fue debido al número de repeticiones impuesto por el procedimiento experimental utilizado y su complejidad así como por la variabilidad espacial de las propiedades medidas.

Las medidas de RP fueron las que más consistentemente evidenciaron las diferencias entre los tratamientos de presión de pastoreo y su variación en profundidad.

El estudio de compresibilidad mostró diferencias en comportamiento en profundidad, lo que podría indicar que el efecto del mayor contenido de materia

orgánica y biomasa radicular de la pastura de campo natural confieren en superficie mayor capacidad de soportar los efectos de las presiones de compactación.

Los vertisoles presentan una alta resiliencia física a las alteraciones de manejo, resultado de los altos contenidos de carbono orgánico y de arcillas expansivas. Manejados con altos contenidos de agua, los Vertisoles son muy susceptibles a la deformación plástica.

6. ESTUDO II. “RESPUESTA AL RIEGO DE MEJORAMIENTOS DE CAMPO NATURAL DE BASALTO, BAJO DIFERENTE MANEJO DEL PASTOREO ANIMAL.”

6.1. INTRODUCCIÓN

Las deficiencias hídricas, que se manifiestan en el período estival en la región Norte del Uruguay, son magnificados en Vertisoles de basalto, por la gran variación de profundidad que presentan y por la textura pesada o arcillosa, que determina una mayor retención del agua en el suelo a tensiones no disponibles para las plantas.

La producción forrajera anual es muy variable entre los años, debido a las variaciones del régimen hídrico (Berretta & Bemhaja, 1998). A su vez, existe una importante variación de la producción forrajera dentro de cada año, con los mínimos de producción en invierno, consecuencia de las menores temperaturas y bajos niveles de radiación, y los máximos en primavera. En los meses de verano, es posible alcanzar importantes niveles de producción de forraje si la lluvia supera a la evapotranspiración, mientras que en condiciones de pocas lluvias, dicha producción puede ser muy baja o nula.

Los mejoramientos de campo, consistentes en la introducción en el tapiz del campo natural de especies leguminosas perennes de ciclo invierno – primaveral, mediante la siembra en cobertura y el aumento de la disponibilidad de fósforo con fertilización, atenúan los déficit forrajeros invernales (Carámbula et al., 1994), pero no la vulnerabilidad a las sequías estivales antes mencionadas.

6.1.1. Efectos climáticos sobre los mejoramientos de campo

Los mejoramientos de campo en suelos profundos desarrollados sobre basalto, incluyen como leguminosas introducidas *Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*. (Bemhaja, 1998 y Termezana, 1978). El aporte de estas especies al tapiz natural, hace que la producción forrajera se vea incrementada, sin embargo, la sobrevivencia de estas especies está limitada en aquellos años en los que ocurren

severos estrés hídricos. De acuerdo con Olmos (2004), las poblaciones de trébol blanco introducidas están en condiciones marginales desde el punto de vista de su origen. La superficialidad del sistema radicular del trébol blanco, lo hace muy susceptible al estrés hídrico estival (Frame & Newbold, 1986). Por otro lado McWilliam (1978), menciona el efecto de reducción de crecimiento en trébol blanco, causado por altas temperaturas. Olmos (2000) destaca que las plantas de trébol blanco introducidas en comunidades de especies de gramíneas nativas, en condiciones de estrés hídrico y en condiciones de pastoreo, presentan alta mortalidad.

Para las condiciones del norte de Uruguay, Olmos (1997) afirma que el balance hídrico en verano es una de las variables más importantes en el ecosistema, determinado cambios en las pasturas naturales y cultivadas. En el caso de las primeras, favoreciendo la proporción de especies invernales cuando ocurren veranos secos y en las cultivadas, afectando la supervivencia y por consiguiente su proporción en el tapiz. Menciona que en condiciones de severo estrés hídrico se eliminan las plantas de *Trifolium repens*, reduciendo así su proporción para el otoño siguiente. En tanto que *Lotus corniculatus* aumentará su proporción por la mayor capacidad de tolerar la falta de agua.

6.1.2. El riego como estrategia para contrarrestar los déficit hídricos estivales

Dada la gran variabilidad en el régimen de lluvias que se registra en el Uruguay y los balances hídricos deficitarios en los meses de verano (Corsi, 1978), podría justificarse la adopción del riego con carácter estratégico para lograr estabilidad en la producción forrajera, dependiendo de la relación costo beneficio (Pérez Gomar, 2004).

La información nacional de riego en forrajeras no es de gran magnitud, siendo mayor la referente a producción de semilla y más limitada la información en producción de forraje (Mas, 2004).

Arana et al. (2000), trabajaron con riego en trébol blanco y encontraron mayores niveles de producción de forraje en tratamientos regados que sin regar en cuatro años de evaluación. Ellos justificaron estos mayores niveles de producción en los tratamientos regados por un efecto directo de la mayor disponibilidad de agua

aumentando la producción de forraje, y por un efecto indirecto, o diferido, relacionado a la mayor sobrevivencia de los estolones de trébol blanco en los tratamientos regados, que permitía una mayor proporción de la especie en la composición botánica a lo largo de los años.

Sawchik & Formoso (2000), reportan que la respuesta al agua en producción de forraje de diferentes especies leguminosas forrajeras fue: *Medicago sativa* 16 kg de M.S. ha⁻¹mm⁻¹, *Trifolium pratense* 12 kg de M.S. ha⁻¹mm⁻¹ y *Lotus corniculatus* 4 kg de M.S. ha⁻¹mm⁻¹.

En las condiciones del Uruguay, Mas (2004) justifica el riego de especies de ciclo estival, especialmente gramíneas, ya que fisiológicamente son más aptas para responder productivamente al riego. Entre estas especies destaca *Setaria anceps* cv Kazungula, *Chloris gayana* cv Katambora y *Panicum maximum* cv Gatton.

En producción de semillas forrajeras, Formoso & Sawchik (2000) afirman que la región debe ser considerada como marginal en cuanto a producción de semilla, por la gran variabilidad climática que presenta. Ellos estudiaron la respuesta al agua en producción de semilla y encontraron que *Medicago sativa* y *Lotus coniculatus* no presentaron efectos positivos del riego en el momento de floración y maduración de semilla. *Trifolium pratense* en años lluviosos, así como en años de pequeños déficits a comienzos de floración, no mostró respuesta al riego. Sin embargo, en años secos, esta especie presentó respuesta en crecimiento vegetativo, que repercutió en mayores niveles de producción de semilla.

Con relación a la producción de semilla de *Trifolium repens*, García et al. (2000) señalan que en años normales se encontró respuesta al riego de los semilleros cuando el cierre de los mismos al pastoreo animal se realizaba en forma tardía. Por otro lado señalan la importancia del riego para la obtención de una segunda cosecha. Los mismos autores destacan el trébol blanco como una especie muy sensible al déficit hídrico, demostrando respuesta al riego en producción de semilla en aquellos años en los que otras especies leguminosas (alfalfa, y trébol rojo), no mostraron respuesta o lo hicieron negativamente (lotus).

6.1.3. Efectos de la compactación animal sobre la producción de forraje

Ya fueron comentados, en el Estudio I de esta tesis, los efectos de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo. En este capítulo, se abordarán los efectos del pisoteo animal sobre la producción vegetal.

Nie et al. (1997) estudiaron los efectos de la exclusión del pastoreo animal durante la estación de crecimiento sobre la biomasa radicular de especies forrajeras. Reportaron que en la profundidad de 0 – 5 cm la biomasa radicular era menor cuando el pastoreo fue excluido que cuando el forraje era utilizado por pastoreo directo. Esto se atribuyó a una mayor pérdida de plantas cuando se eliminó el pastoreo, que promueve el macollaje y mayor número de plantas por unidad de superficie. Los mismos autores estudiaron los efectos del pisoteo animal sobre propiedades físicas del suelo, y encontraron que la conductividad hidráulica en flujo saturado y la porosidad total era mayor con la exclusión del pastoreo, mientras que la densidad del suelo era menor.

En un estudio de riego y pastoreo directo con ovejas sobre pasturas compuestas por trébol subterráneo y raigras, Witschi & Milchalk (1979) reportaron que los efectos provocados por el pastoreo realizado en otoño en el momento de riego, repercutieron en una reducción del 33 % de la producción de forraje en primavera siguiente. En el mismo trabajo, se vio que cuando la carga de ovejas variaba de 0 a 39 ovejas ha⁻¹ el efecto sobre la densidad del suelo significaba un incremento en un 40 %, atribuyéndole a este efecto de compactación sobre el suelo la reducción en producción de forraje y que el mayor efecto era provocado en una disminución del aporte del raigras.

En una revisión, realizada por Brown & Evans (1973) señalan la importancia del pastoreo animal en el que conceptualmente implica un cierto grado de daño sobre la pastura y el suelo, debiéndose tener presente en el manejo la posibilidad de minimizar tales efectos bajo todas las circunstancias. En un trabajo que realizaron dichos autores con diferentes cargas y condiciones de humedad del suelo durante el pastoreo, concluyeron que el trébol blanco es una especie con alta tolerancia a las condiciones de pastoreo directo y que se debe evitar el pastoreo con contenidos de agua excesivo en el suelo.

Moraes & Lustosa (1997) reportan los efectos del pisoteo animal sobre las propiedades físicas del suelo, densidad del suelo, resistencia a la penetración,

conductividad hidráulica y sus efectos sobre la producción de forraje. Ellos relativizaron los efectos provocados por las diferentes especies animales utilizadas en los pastoreos, los contenidos de agua en el suelo, el tipo de cobertura, el volumen de forraje existente en el momento de pastoreo, la duración del pastoreo.

Frame (1983), señala efectos directos e indirectos del pastoreo animal sobre la producción de una pastura. Los efectos directos están relacionados a la defoliación por la utilización del forraje por parte de los animales y a la destrucción de plantas o puntos de crecimiento causada por el pisoteo. Los efectos indirectos se relacionan a el daño estructural del suelo causado por la compactación superficial, que repercute en el crecimiento de la pastura.

6.1.4. Riego de pasturas en Vertisoles

La utilización del riego con un criterio estratégico puede permitir una mayor estabilidad de la producción y persistencia de los mejoramientos, dependiendo su adopción de la relación costo-beneficio que implique la realización de la misma. Existe interés en conocer la respuesta productiva al uso de la tecnología del riego por parte de emprendimientos asociados a algunos sistemas de producción arroceros y concretamente a la rotación arroz-pasturas.

Al no existir información para el área basáltica, se justifica estudiar las relaciones físicas entre el régimen hídrico y producción de forraje de los mejoramientos de campo, en los suelos de mayor potencial de la región. El objetivo del trabajo fue conocer la respuesta al riego en pasturas de mejoramientos de campo.

6.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Dos experimentos diferentes fueron realizados. En el primero fue utilizado un diseño clásico que permite estudiar la respuesta a un número limitado de regímenes de riego. En el segundo, se utilizó la variación continua de precipitación generada de un aspersor (cañón de riego), con la finalidad de ajustar una función de respuesta entre producción de forraje y lámina de agua aplicada.

Los experimentos estuvieron ubicados en un Vertisol de basalto, en el campo experimental de INIA Glencoe, en Uruguay. El suelo es caracterizado por presentar un solum de 92 cm, con un horizonte A de 19 cm de espesor, franco arcilloso y con estructura granular. La descripción completa del suelo se presenta en el anexo A y anexo B.

Ambos experimentos fueron realizados en un área en la que existían mejoramientos de campo, establecidos en el año 2000. En el mejoramiento sobre el que se instaló el experimento clásico, la especie introducida en el campo natural que predominaba fue *Trifolium repens*. El segundo experimento se desarrolló sobre un mejoramiento de dos especies individuales en áreas contiguas, *Trifolium repens* y *Trifolium pratense*.

En el primer año no se realizaron pastoreos. Estos comenzaron en el segundo año, a partir del invierno de 2003, realizándose uno por estación de crecimiento. Se utilizó una carga instantánea elevada con vacunos, 30 animales ha⁻¹ de 385 kg promedio de peso vivo, durante 4-7 días.

El experimento 1 tuvo un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en dos regímenes de riego y un tratamiento de secano. El tratamiento de riego más frecuente consistía en reponer la lámina de agua cuando la ETP acumulada era de 30 mm y el riego menos frecuente cuando la ETP acumulada era de 60 mm. Los riegos se realizaron con un equipo de aspersión de instalación permanente, con disposición equidistante de los aspersores (12 m x 12 m), cuyo diseño permitió una lluvia de riego uniforme en cada una de las parcelas a las que el azar les adjudicó una de los regímenes descritos arriba. La intensidad usada fue uniforme (6 mm h⁻¹), por lo que cada riego del régimen menos frecuente insumió el doble de tiempo que el del régimen más frecuente. Una de las parcelas fue pastoreada y la otra se mantuvo con exclusión de pastoreo. Como estas dos mitades no se aleatorizaron en cada parcela de frecuencia de riego se consideró que el experimento estuvo constituido por dos ensayos independientes con y sin pastoreo.

Los niveles de producción de forraje fueron determinados en las diferentes estaciones de crecimiento mediante cortes y luego se determinó la materia seca, mediante el secado a 60° C durante 48 h. Para evaluar la producción forrajera se realizaron 6 cortes por parcela de 3 m x 0,6 m. Se hicieron dos cortes, uno anterior y

otro posterior al período de riego, considerándose el último para evaluar la producción de forraje.

La evaluación de la composición botánica se realizó al final de la estación estival, en el lugar donde posteriormente se realizara el corte de evaluación de producción de forraje. Se estimó mediante apreciación visual el porcentaje de la superficie ocupada por leguminosas, gramíneas o suelo desnudo.

La evolución del contenido de agua en el suelo fue determinada con TDR de 0 a 15 cm de profundidad (3 medidas por unidad experimental), y con sonda de neutrones a 20, 40, 60 y 80 cm de profundidad (un tubo de acceso por unidad experimental), durante la estación de riego. Estas medidas se hicieron semanalmente durante la estación de riego. También se calculó el balance hídrico del contenido de agua en el suelo, considerando que tanto las lluvias como los riegos infiltraron 100 % y que la ET fue igual al 80 % de la evaporación de "Tanque A".

Determinaciones de la cualidad física del suelo fueron realizadas, incluyéndose: densidad del suelo, porosidad total, curva característica de retención de agua, resistencia a penetración y deformación de suelo. La metodología utilizada para la realización de estas medidas esta detallada en el ESTUDIO 1 de esta Tesis.

Se hizo un análisis estadístico conjunto de los dos ensayos (pastoreado y sin pastorear) fue hecho para poder estudiar la interacción entre la realización o no del pastoreo y los tres regímenes de riego. En dicho análisis, el efecto principal de frecuencia de riego se testeó usando la fuente de variación repetición anidada dentro de pastoreo o no pastoreo, como término de error. La interacción se testeó contra el remanente del modelo general lineal utilizado. El nivel de significación utilizado fue 10 % excepto que se indique otro para alguna comparación concreta.

El experimento 2 consistió en superposición del círculo de riego de un aspersor con alcance de 30 m de radio, sobre franjas contiguas de mejoramientos con dos especies forrajeras, *Trifolium repens* (trébol blanco) y *Trifolium pratense* (trébol rojo), cruzadas perpendicularmente por franjas de utilización del forraje mediante 3 intensidades de pastoreo. Los tratamientos de intensidad de pastoreo fueron: (i) exclusión de pastoreo, (ii) pastoreo con carga baja (que consiste en el pastoreo de 20 animales ha⁻¹ de 385 kg de peso vivo promedio, durante 4 días) y (iii) pastoreo con el doble de la carga del tratamiento 2 (40 animales ha⁻¹ de 385 kg de peso vivo promedio durante 4 días). Los animales tuvieron acceso al experimento durante el

invierno y primavera previos al riego, pastoreando con el régimen antes mencionado, y durante el verano.

El aspersor generó un gradiente de precipitación que fue medido mediante una retícula de 209 puntos (separados entre sí 3,5 m x 3,5 m) cubriendo en total un área de 2.700 m². En los puntos de la retícula se colocaba un recipiente de plástico de 8,4 cm de diámetro para medir la precipitación en cada riego. El período de riego estuvo comprendido entre el 05/01/04 al 09/02/04, no habiéndose registrado en dicho período ocurrencia de precipitaciones pluviales.

La evaluación de la producción forrajera fue realizada mediante cortes de 3 m x 0.6 m en cada uno de los puntos antes mencionados. Se realizaron dos cortes, uno anterior y otro posterior al período de riego, considerándose el último para evaluar la producción de forraje.

Medidas de resistencia a penetración (RP) se tomaron mediante penetrómetro de cono, modelo Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer, y el contenido de agua volumétrico en los primeros 15 cm el suelo con TDR (Time Domain Reflectometry) de la Soil Moisture, en cada uno de los puntos de la retícula. También se realizó un estudio de densidad del suelo por el método de terrón parafinado y cilindros de Ulhand y un estudio de capacidad de soporte del suelo y deformación a diferentes cargas o presiones, que se detallan en el ESTUDIO I de esta Tesis.

Los datos fueron analizados utilizando el procedimiento del modelo mixto de SAS con las dos especies de leguminosas y las tres intensidades de pastoreo como variables de clase y la precipitación en cada punto como variable continua. También fueron calculadas regresiones entre las variables continuas.

6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.3.1 Producción de forraje

Experimento 1

Las medias y su estimación de precisión (LSD o desviación standard, según corresponda) se presentan en las Figuras 16 y 19. La Figura 16 presenta las medias

de las tres frecuencias de riego durante el año 2002 – 2003, en el que no se realizó utilización del forraje por pastoreo animal. Por lo tanto se manejó el conjunto de los futuros ensayos con y sin pastoreo , como un único ensayo.

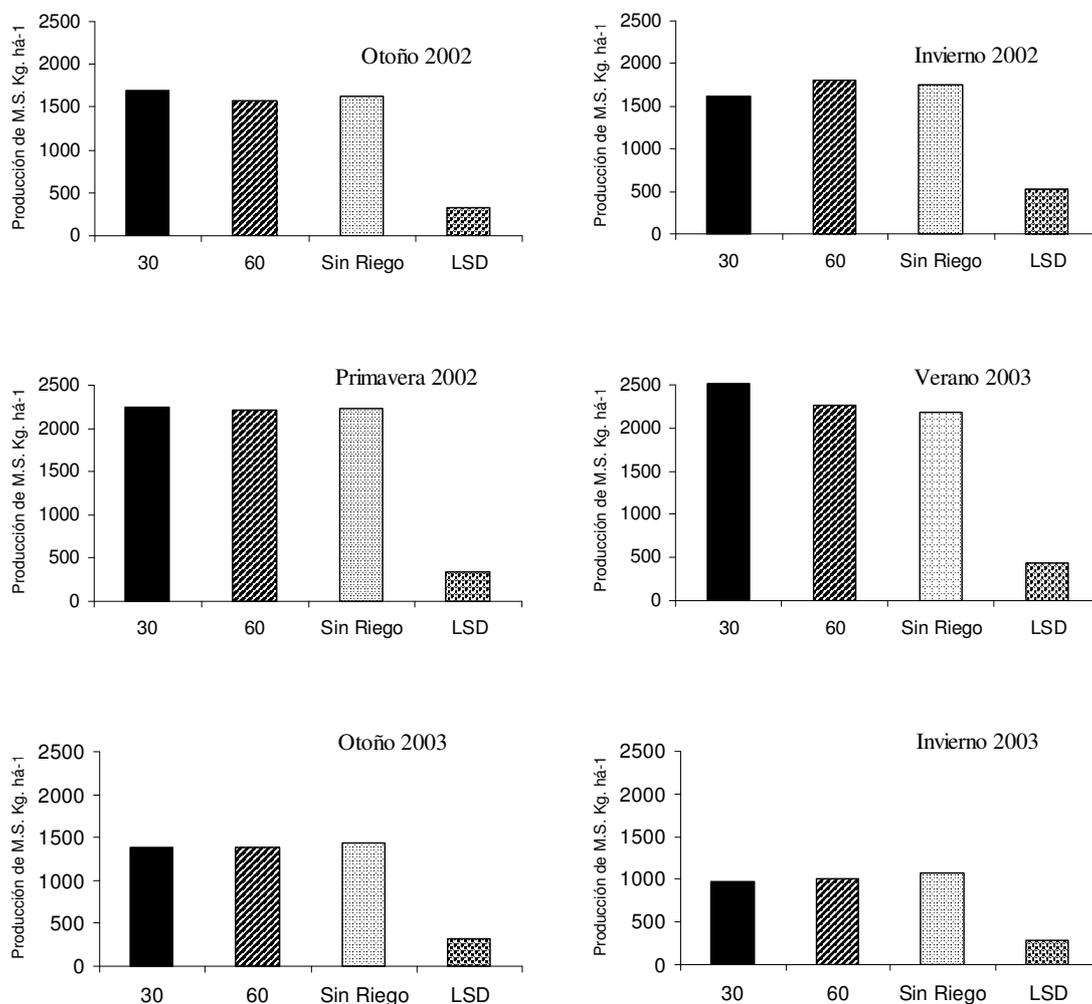


Figura 16 - Producción de materia seca en las diferentes épocas del año, manejadas en exclusión de pastoreo, en los tratamientos con regímenes hídricos de 30 mm, 60 mm y sin riego del experimento 1. LSD = diferencia mínima significativa.

No se encontraron diferencias significativas en producción de materia seca de forraje entre los diferentes regímenes hídricos. Ello es razonable hasta el corte de verano, ya que recién en esa estación es que comenzaron a aplicarse los diferentes

regímenes de riego. Sin embargo, dada la ocurrencia de importantes precipitaciones (Figura 17) y la aplicación de riegos, existió buena disponibilidad de agua en el suelo (Figura 18a), en el período estival en todas las situaciones estudiadas. Es por ello que la producción forrajera no mostró diferencias entre tratamientos (Figura 16). En las estaciones siguientes de dicho año, se continuó sin diferencias significativas.

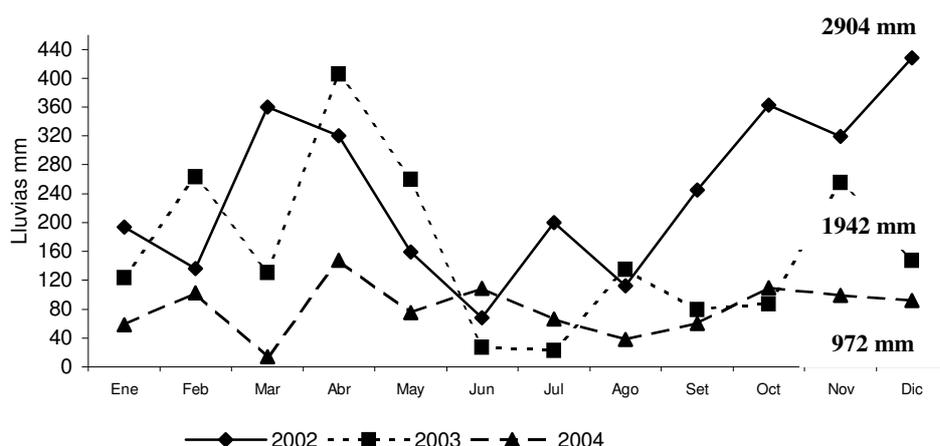


Figura 17 - Precipitaciones ocurridas en los años 2002, 2003 e 2004.

Durante el segundo año, en el que se comenzó a realizar pastoreo en uno de los ensayos, se encontraron diferencias significativas (Cuadro 7 y Figura 19) debidas a la aplicación de riego, en el verano del 2003 – 2004 y en el otoño del 2004.

En 2003 – 2004, el régimen de precipitaciones, determinó déficit hídrico durante el verano y otoño, por lo que se evidenció la respuesta al riego aplicado en la estación de verano de 2004 (Figura 18b, Figura 19b y Figura 19c), cuyo efecto se prolonga hasta el otoño de 2004, ya que en esta estación continúa con bajas precipitaciones.

En la estación de primavera de 2003, no se aplicaron riegos por lo que no aparecen diferencias significativas entre los tratamientos de riego (Cuadro 7).

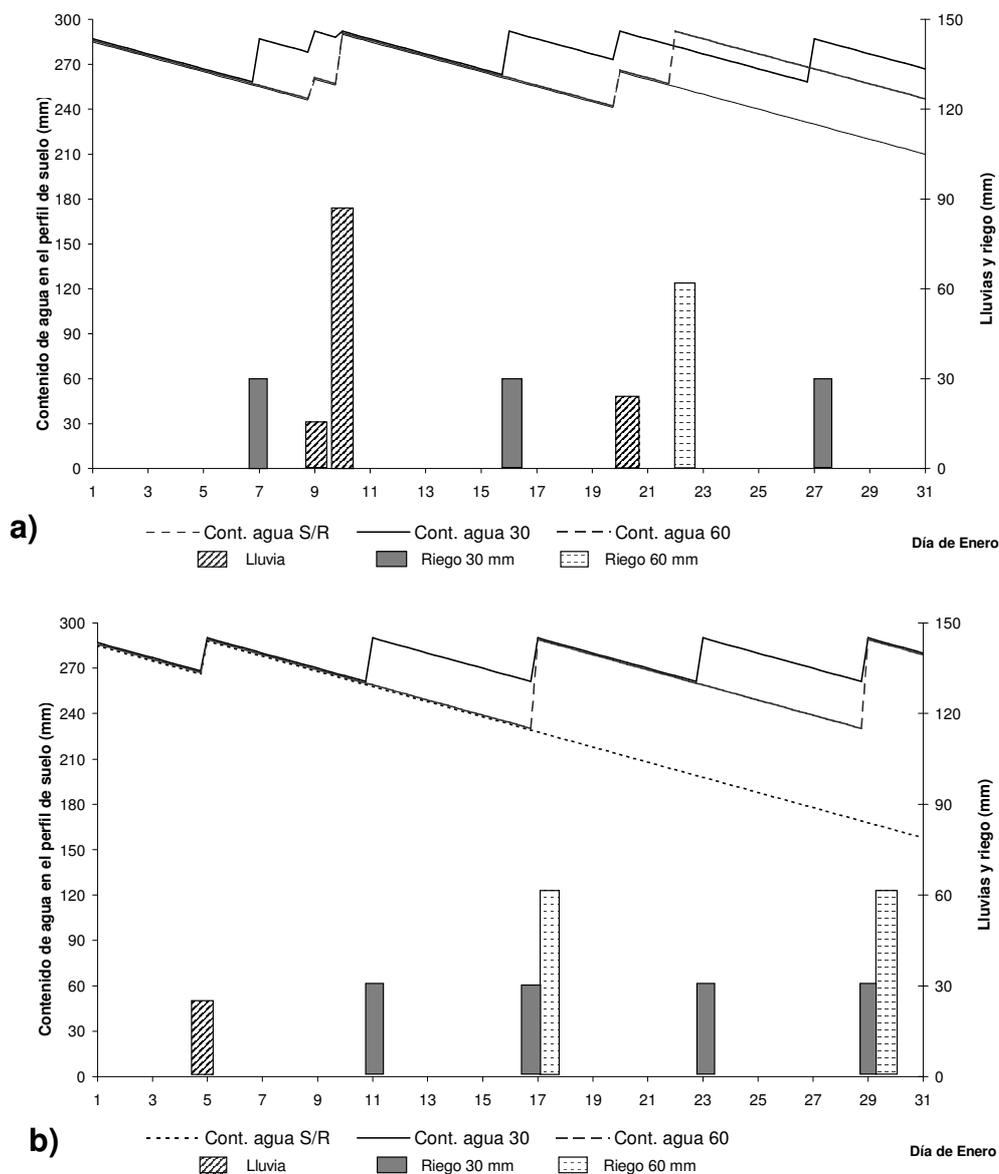


Figura 18 - Evolución del contenido del agua en el suelo en 80 cm de profundidad en los regímenes de riego de 30 mm (Contenido de agua 30), 60 mm (Contenido de agua 60) y sin riego (Contenido de agua s/r) y precipitaciones o riego en el período 01 al 31/01/2003 (a) y 01 al 31/01/2004 (b). Las líneas son el resultado de los balances hídricos y los puntos representan las mediciones realizadas con sonda de neutrones y TDR.

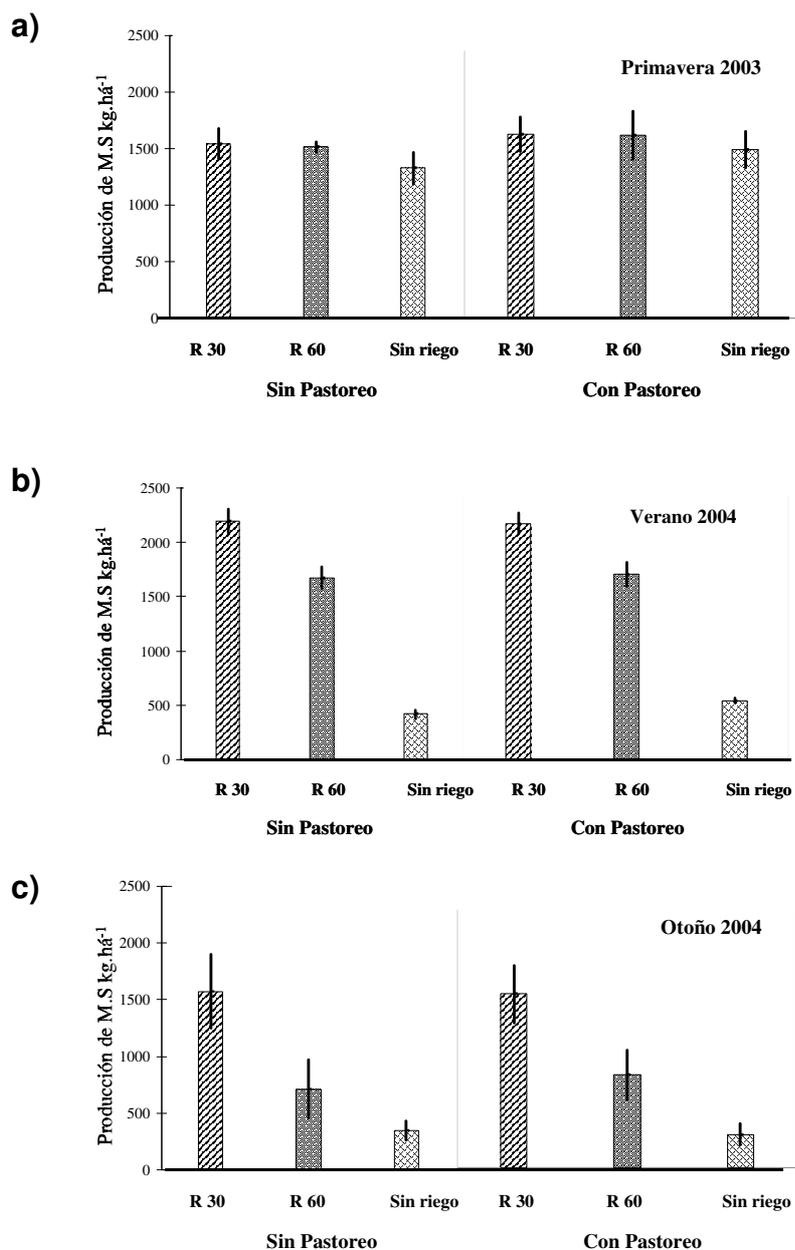


Figura 19 - Producción de materia seca bajo tres regímenes de riego (R 30, R 60 y sin riego), en las estaciones Primavera 2003 (a), Verano de 2004 (b) y Otoño de 2004 (c), en condiciones sin pastoreo directo con animales o con pastoreo en el experimento 1. Las líneas verticales en el límite superior de las barras indican la desviación standard de cada media.

Cuadro 7 - Significación ($P > F$) de los contrastes ortogonales de las medias de riego y de la interacción Riego x Pastoreo en la producción de materia seca.

Contraste	Primavera	Verano	Otoño
	2003	2004	2005
1) Riego vs Secano	NS	0,0001	0,0088
2) Riego 60 vs Riego 30	NS	0,0016	0,0211
3) R vs Sec, Past vs no Past	NS	NS	NS
4) R60 vs R30, Past vs no Past	NS	NS	NS

R=riego, Sec=secano, Past=pastoreo, NS=no significativo.

En ninguna de las tres estaciones de crecimiento de la pastura se encontró que los contrastes de la interacción fueran significativos (Cuadro 7, contrastes 3 y 4). Ello implica que la utilización por pastoreo no generó diferencias en la producción de la pastura en relación a la exclusión del pastoreo, tanto en la primavera cuando aún no había sido regado, como en verano cuando los riegos causaron cambios en contenido de agua en el suelo, ni en el otoño siguiente.

En relación a la cobertura del suelo en función de la composición botánica en el primer año de ensayo, no se vieron diferencias significativas y en todas las parcelas la dominancia de trébol blanco en la cobertura del suelo presentaba valores superiores al 90 %. Esto es explicable por la muy buena disponibilidad de agua que favoreció el desarrollo de trébol blanco en todo el año y especialmente en verano.

La cobertura del suelo en función de la composición botánica en el segundo año, se presenta en las Figuras 20 y 21. En ellas se muestra la cobertura del suelo por leguminosas, gramíneas o suelo descubierto en los ensayos sin pastoreo y con pastoreo, respectivamente.

En el Cuadro 8 se presenta la significación estadística de los contrastes de las medias de acuerdo con el ANOVA conjunto.

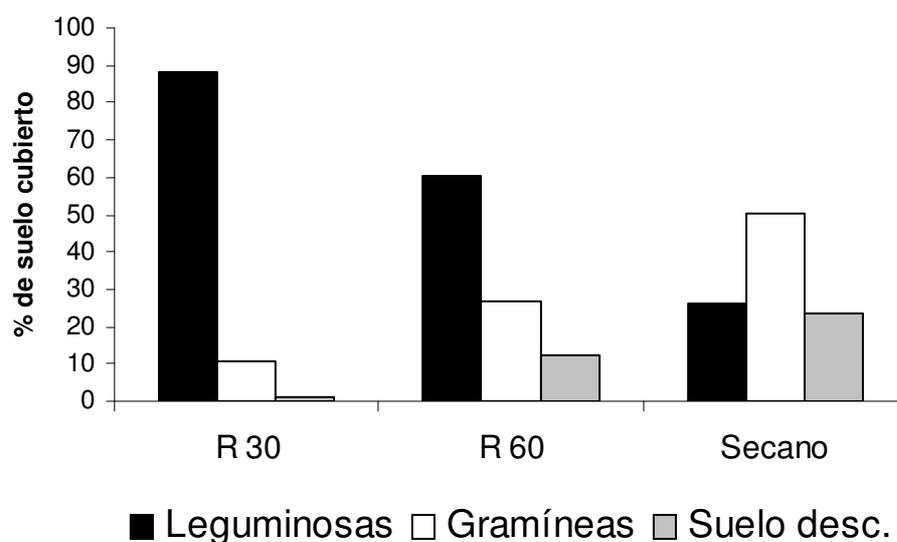


Figura 20 - Porcentaje de suelo cubierto por leguminosas, gramíneas o suelo descubierto en exclusión de pastoreo, bajo diferentes regímenes hídricos y secano (R 30=régimen hídrico de 30 mm; R 60= régimen hídrico de 60 mm; Secano=sin riego).

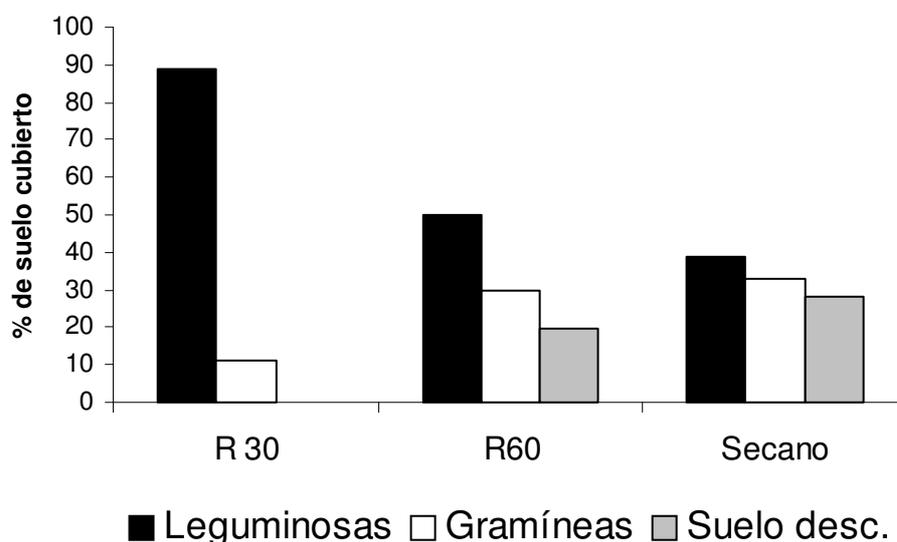


Figura 21 - Porcentaje de suelo cubierto por leguminosas, gramíneas o suelo descubierto en condición de pastoreo, bajo diferentes regímenes hídricos y secano (R 30= regímen hídrico de 30 mm; R 60= régimen hídrico de 60 mm; Secano=sin riego).

Cuadro 8 - Significación (Prob.>F) de los contrastes ortogonales de las medias de riego y de la interacción Riego x Pastoreo en % de cobertura.

Contraste	Leguminosas	Gramíneas	Suelo descubierto
Riego vs Secano	0,001	0,020	0,014
R 30 vs R 60	0,004	0,072	0,038
Past vs Exc, R vs Sec	NS	NS	NS
Past vs Exc, R 30 vs R 60	NS	NS	NS

R=riego, Sec=secano, Past=pastoreo; Exc=exclusión, NS=no significativo.

Los resultados indican mayor porcentaje de suelo cubierto por el componente leguminosa con la mejor disponibilidad de agua estival generada por los tratamientos de riego, se presentó con mayores proporciones de cobertura del suelo siendo mayor aún en el riego mas frecuente. El trébol blanco es una especie perenne de clima templado, y por lo tanto sufre los déficit de agua estivales, aún los de baja intensidad, por lo que los resultados muestran una mayor sobrevivencia y producción estival bajo riego.

La presencia de gramíneas se comportó en forma exactamente inversa a la del componente leguminosa y su presencia tendió a ser mayor o igual en el tratamiento sin riego, en el que la producción total fue menor. Este comportamiento de las gramíneas a estar mas presente en los tratamientos antes mencionados, puede obedecer a la mayor adaptación de las especies gramíneas predominantes a las condiciones de estrés hídrico.

La presencia de suelo descubierto también fue proporcionalmente inversa a la disponibilidad de agua para las plantas.

Los contrastes de la interacción fueron no significativos, señalando que lo discutido anteriormente fue independiente de la realización o no del pastoreo animal.

Experimento 2

El coeficiente de regresión de respuesta de la producción forrajera promedio a la adición de agua por riego fue $8,95 \text{ kg MS a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de agua agregado, siendo significativo. La respuesta del mejoramiento con trébol blanco fue en promedio 7,20

kg MS a^{-1} mm $^{-1}$ de agua agregado, mientras que la del trébol rojo fue de 9,52 kg MS a^{-1} mm $^{-1}$ de agua agregado, resultando la diferencia significativa.

La respuesta discriminada por especie de leguminosa y por tratamiento de utilización por los animales se representa en la Figura 22. La mayor respuesta, para los mejoramientos con ambas especies, ocurrió cuando el pastoreo fue excluido (Figura 22a y Figura 22d). Sin embargo, bajo las dos intensidades de utilización por pastoreo, el trébol blanco tuvo la misma respuesta, 6,20 y 6,28 kg MS ha^{-1} mm $^{-1}$ de agua agregado, para las cargas baja y alta respectivamente, (Figura 22b y Figura 22c), mientras que el trébol rojo disminuyó su respuesta con la presión de pastoreo, 10,83 y 6,06 kg MS ha^{-1} mm $^{-1}$ de agua agregado, en carga baja y alta, respectivamente (Figura 22e y Figura 22f).

Las producciones de materia seca del componente leguminosa para cada uno de los mejoramientos están graficadas en la Figura 23. Hubo una reducción de producción de materia seca de ambas leguminosas con el incremento de RP (resistencia a la penetración). Esta variable está determinada por el contenido de agua en el suelo (Ver capítulo I, Figura 11). Por lo tanto, es muy probable que la menor producción de forraje está altamente explicada por menor disponibilidad de agua para las plantas asociada a mayor RP.

El efecto de los tratamientos de presión de pastoreo, aparentemente no determinaron gran variación en la RP, con su consecuente efecto sobre la producción forrajera, ya que en la Figura 23 se observan puntos bajo los tres manejos en todo el rango de RP.

También se observan, en la Figura 23, diferencias significativas entre los mejoramientos con las dos leguminosas. Bajo exclusión de pastoreo, la producción del trébol rojo con alta disponibilidad de agua y consecuente baja RP, duplica la producción de trébol blanco, ocurriendo algo similar con la baja presión de pastoreo. Sin embargo ambos mejoramientos muestran bajos niveles de producción comparables, en el tratamiento de alta presión de pastoreo. En esta situación, la producción de trébol rojo disminuyó notoriamente, seguramente consecuencia del incremento de la mayor presión de pastoreo y sus efectos de pisoteo y defoliación. Este efecto no se observó en el caso del trébol blanco por se una especie de hábitos mas rastreros.

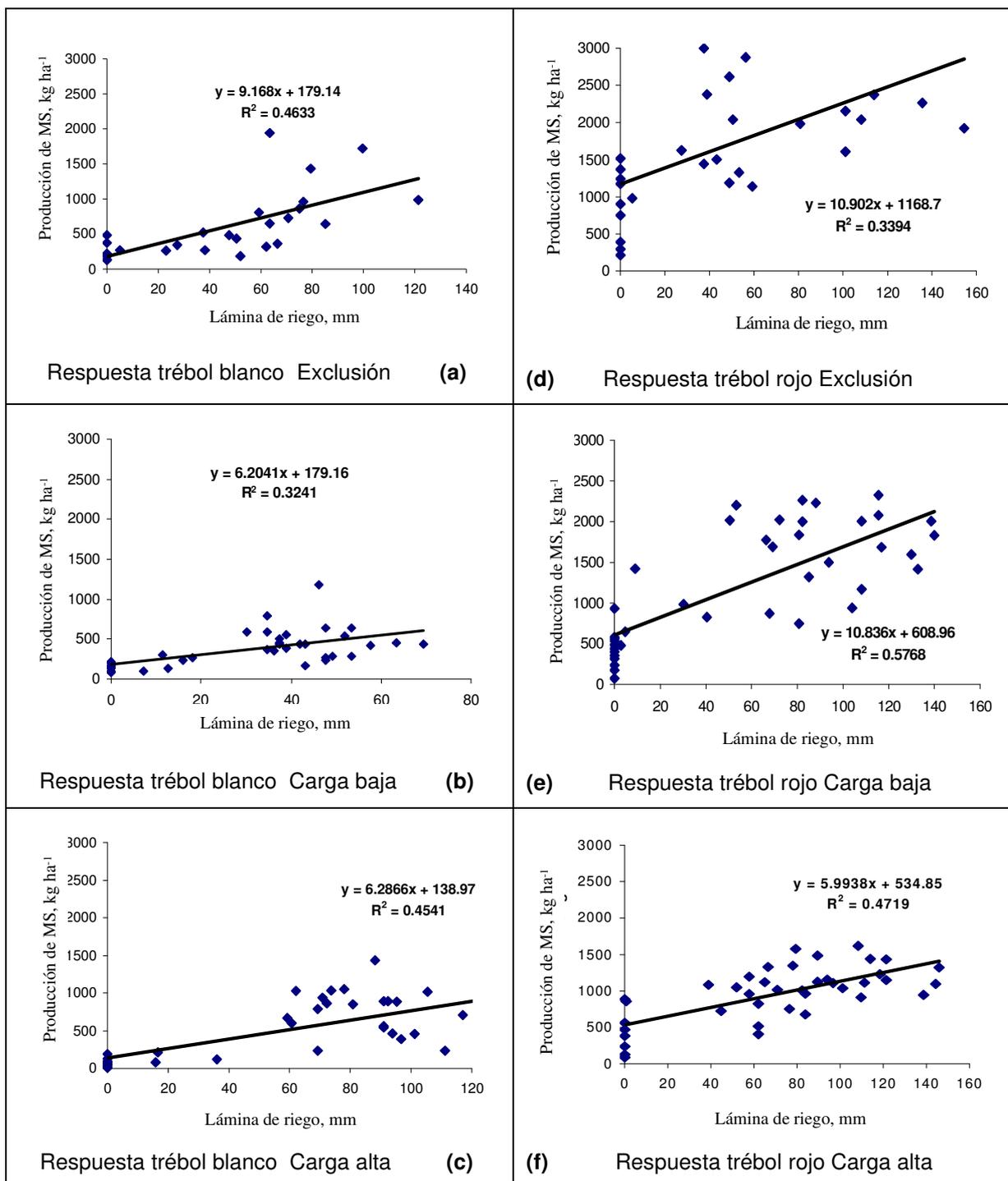


Figura 22 - Respuesta de la producción de forraje al agua por riego, discriminada por especie de leguminosa y presión de pastoreo.

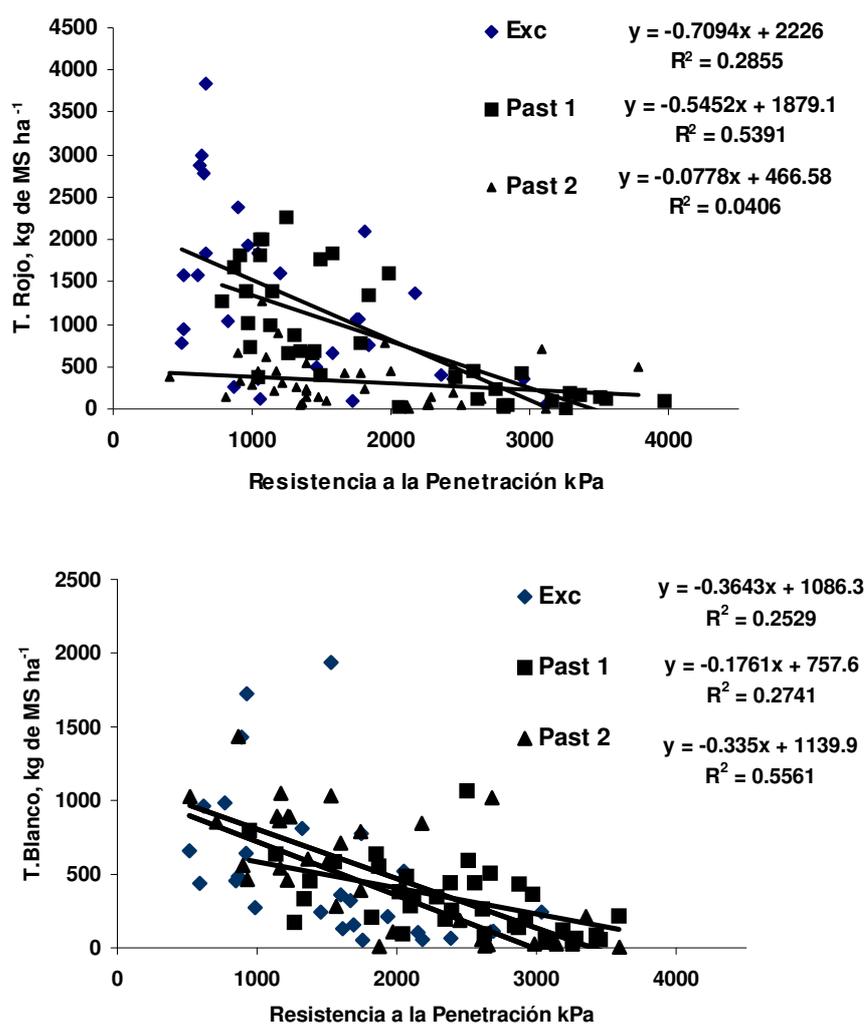


Figura 23 - Respuesta de la producción del componente leguminosa en cada uno de los mejoramientos a la RP, discriminada por presión de pastoreo.

6.4. CONCLUSIONES

Los niveles productivos de forraje y la persistencia de los mejoramientos de campo en el período estival son altamente dependientes del régimen hídrico.

Los efectos del pisoteo animal en las condiciones que se condujeron los experimentos marcaron un efecto directo sobre la producción del trébol rojo, no así sobre el trébol blanco.

La respuesta de producción de materia seca al agua fue de 11 kg mm^{-1} de agua, en trébol rojo manejado en exclusión de pastoreo y de 9 kg mm^{-1} de agua en trébol blanco manejado en iguales condiciones.

Si bien los resultados mostraron que el aumento de RP afecta negativamente la producción forrajera de los mejoramientos, no es posible llegar a esa conclusión por que las medidas de RP están altamente correlacionadas con el contenido de agua en el suelo, el cual seguramente sea el factor determinante.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do ponto de vista da qualidade física do solo, em geral, os resultados dos experimentos mostraram efeito da compactação superficial do solo por pisoteio animal, mas a magnitude desse efeito foi pequena. Contudo, na segunda profundidade estudada (9 a 12 cm) não foi verificado efeito significativo do pisoteio animal.

A produção e persistência dos melhoramentos de campo nativo estiveram intimamente relacionadas com os níveis de água recebidos no período de verão. No primeiro ano de avaliação (2003), as precipitações abundantes igualaram os níveis de produção de matéria seca entre os tratamentos considerados, enquanto no segundo ano (2004) foi observada maior produção de matéria seca nos tratamentos irrigados em comparação com os não irrigados. Do ponto de vista da persistência do melhoramento do campo, ao haver um marcado predomínio de uma espécie de inverno de clima temperado (trevo branco), observou-se uma forte dependência do regime hídrico. No ano seco em condições de ausência de irrigação, observou-se uma perda do componente leguminosa na cobertura do solo, comprometendo a persistência do melhoramento.

No segundo ano foi possível obter uma função de resposta à água aportada em melhoramento com trevo branco e trevo vermelho; o mesmo foi de 8,92 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Destacou-se a maior resposta do trevo vermelho frente ao trevo branco. Quando é considerado o efeito do pisoteio animal e sua repercussão sobre a produção forrageira, o mesmo mostrou efeito na produção de trevo vermelho mas não no trevo branco.

Quando se compararam duas intensidades de pisoteio por pastejo no experimento 2, não se encontraram diferenças significativas nas propriedades físicas estudadas. Isso significa que a menor carga animal produziu a maior parte do efeito, sendo que o pastejo de carga alta não resultou em compactação adicional.

Em vários casos, as diferenças assinaladas foram apenas tendências sem significação estatística, possivelmente devido ao número de repetições imposto pelo conjunto do procedimento experimental utilizado e pela variabilidade espacial das variáveis.

De todas as determinações realizadas, as medidas de RP no experimento 2 foram as que mais consistentemente evidenciaram as diferenças entre os tratamentos de pressão de pastejo sobre o estado da qualidade física do solo e sua variação em profundidade.

Independentemente da existência ou não do pastejo (experimento 1), observou-se que os tratamentos irrigados diminuíram ligeiramente a macroporosidade e aumentaram a microporosidade, não afetando a umidade a 33 e 10 kPa de sucção matricial. Essa redistribuição do tamanho de poros ocorreu sem haver, contudo, diferença significativa da D_s e P_t . Isso sugere que, além de uma mudança da porosidade entre macroagregados também ocorreu uma mudança na distribuição dos microagregados dentro dos macroagregados. Essa mudança na distribuição da porosidade tem a mesma tendência a que gerou a compactação por pisoteio, com a diferença que, como já exposto, a irrigação não reduziu a P_t . A explicação pode estar relacionada com o alto conteúdo de argilas expansivas, que somado aos altos conteúdos de água aumentariam o volume total do macroagregados. Esses ganhariam espaço em seu interior (microporos) e ao aumentar trariam próximo entre eles, e reduzindo o espaço que os separa (macroporos).

O estudo da compressibilidade e elasticidade (experimento 2) mostrou diferenças no comportamento em profundidade.

Uma situação particular de uso do solo em condições de cultivo de arroz foi considerada no terceiro experimento, evidenciando que os Vertisolos apresentam uma grande resiliência a diferentes condições de manejo. As alterações físicas causadas no solo que embora apresente grande capacidade de recuperação está associada ao recente histórico agrícola, que podem vir a comprometer-se no futuro.

Comparando os sistemas de manejo dos experimentos, destaca-se que os experimentos 1 e 2 são sistemas que compreendem melhoramentos do campo com um forte componente do campo natural, enquanto que no experimento 3 provoca-se uma maior alteração no equilíbrio do qual esses solos evoluíram. Isso implica, do ponto de vista da sustentabilidade, em maior cuidado com as propriedades físicas nesses sistemas de manejo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-MAGID, A; SCHUMAN, G; HART, R. Soil Bulk Density and Water infiltration as affected by Grazing Systems. **Journal of Range Management**, v. 40, p. 307-309, 1987.

ALVAREZ, C.; MAY, H.; MOLFINO, J. **Estúdios de suelos Glencoe**. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes, 1974. 55p.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 189-197, 2001.

ARANA, S.; PIÑEIRO, G.; MALDRUP, P.; YMAGUCHI, T.; JACABSEN, H. Riego y manejo en la productividad de pasturas con trébol blanco. In: JORNADA DE TRÁBOL BLANCO, 2000, La Estanzuela. **Anales...** La Estanzuela: INIA, 2000. p. 5-12. (Serie actividades de difusión; 241).

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil Physics**. 4rd ed. New York: John Willey & Sons, 1972. 498p.

BAYER, C.; MIELNIZUK, J.; MARTÍN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 599-607, 2000.

BEMHAJA, M. Mejoramiento de campo en basalto profundo. Evaluación de géneros especies y variedades In: SEMINARIO DE ACTUALIZACIÓN EN TECNOLOGÍAS PARA BASALTO, 1998, Tacuarembó. **Anales...** Tacuarembó: INIA, 1998. p. 33-42. (Serie Técnica; 102).

BERRETTA, E.J.; BEMHAJA, M. Produccion de comunidades nativas sobre suelos de basalto de la unidad Itapebí Tres Árboles son diferentes frecuencias de cortes. In: SEMINARIO DE ACTUALIZACIÓN EN TECNOLOGÍAS PARA BASALTO, 1998, Tacuarembó. **Anales...** Tacuarembó: INIA, 1998. p. 21-33. (Serie Técnica; 102).

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2. ed. American Society of Agronomy, 1986. p. 463-477.

BRAIDA, J.A. **Materia orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico de solo sob plantio direto**. 2004. 107f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

BROWN, K. R.; EVANS, P. S. Animal treading a review of the work of the late D.B. Edmond. **New Zeland Journal of Experimental Agriculture**, v. 1, p. 217-226, 1973.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.

CARÁMBULA, M.; AYALA, G.; GARCÍA, F.; FERNÁNDEZ, C.J. **Siembra de mejoramientos en cobertura**. Uruguay: INIA, 1994. 19p. (Boletín de divulgación; 46).

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 99-105, 1990.

CORNISH, P.S.; SO, H.B; MC WILLIAM, J.R. Efects of soil bulk density and water regimen on the uptake of phoforus by ryegrass Aust. **Journal of Agriculture Research**, v. 35, p. 631-644, 1987.

CORSI, W. Clima. In: **Pasturas IV**. Montevideo: Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerguer", 1978. 266p. p. 255-266. (Miscelánea 18).

da SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of least limiting ranges of soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

da SILVA. A.P.; IMHOFF. S.; CORSI. M. Evaluation of soil compactation in an irrigated short-duration grazing system. **Soil & Tillage Research**, v. 70, p. 83-90, 2003.

DUDAL, R.; ESWARAN. H. Distribution, properties and classification of Vertisols. In: Wilding, L.P.; Puentes, R. (Eds). **Vertisols: their distribution, properties, classification and management**. Texas: Texas A&M University Printing Center, College Station, 1988. p. 1-22.

DURÁN, A. **Los suelos del Uruguay**. Montevideo: Editorial Hemisfério Sur. 1985. 398p.

EDMOND, D. B. Effects of treading perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and white clover (*Trifolium repens* L.) pasture in winter and summer at two soils moisture levels. **New Zeland Journal of Agriculture Research**, v. 6, p. 265-76, 1963.

FORMOSO, F.; SAWCHIK, J. Producción de semillas leguminosas con riego. In: INIA. **Tecnología de producción de cultivos y pasturas bajo riego**. La Estanzuela: INIA, 2000, p. 27-46. (INIA actividades de difusión; 227).

FRAME, J., Efecto de los animales sobre la pastura. In: REUNIÓN TÉCNICA SOBRE PERSISTENCIA DE PASTURAS MEJORADAS, 5., 1983, Montevideo. **Anales...** Montevideo: IICA Cono sur BID, 1983. p. 53-69.

FRAME, J.; NEWBOLD, P. Agronomy of white clover. **Advances in Agronomy**, v. 40, p. 1-88, 1986.

GARCÍA, J.; BARÚ, N.; VERNAZZA, R. Riego y producción de semillas de trébol blanco. In: JORNADA DE TRÉBOL BLANCO, 2000, La Estanzuela. **Anales...** La Estanzuela: INIA, 2000. p. 13-18. (Serie actividades de difusión; 241).

HAKANSON, I., VOORHEES, W.B., RILEY, H., Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, v. 11, p. 239-282, 1988.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. Massachusetts, USA, 1998. 771p.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HUBBLE, G.D. The cracking clay soils: Definition, distribution, nature, genesis, and use. In: McGarity, J.W.; Hoult, E.H; So; H.B. (Eds.). **The properties and utilization of cracking clay soils**. Armidale: New South Wales, 1984. p. 3-13. (Reviews in Rural Science 5)

LAYCOCK, W.A.; CONRAD, P.W. Effect of Grazing on Soil compaction as measured by Bulk density on a high elevation cattle range. **Journal of Range Management**, v. 20, p. 136-140, 1967.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, v. 13, p. 52-55, 1987.

MARTINO, D.L.; SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal Soil Science**, v. 74, p. 193-200, 1994.

MAS, C. Algunos resultados de riego en pasturas en el este. In: **Clima y respuesta hídrica de pasturas en zonas ganaderas**. Tacuarembó: INIA, 2004. p. 23-30. (INIA serie actividades de difusión; 364).

McCARTY, M.K.; MAZURAK, A.P. Soil Compaction in Eastern Nebraska after 25 Years of cattle Grazing Management and Weed Control. **Journal of Range Management**, v. 29, p. 384-386, 1976.

MCWILLIAM, J. R. Response of pasture plants to temperature. In: Wilson, J.R. (Ed.). **Plant relations in pastures**. East Melbourne: CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1978. p. 17-34.

MORAES, A.; LUSTOSA, S.B.C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE PASTAGENS COM ANIMAIS, 1997, Maringá. **Anais...** Maringá: CCA/UEM, 1997. p. 129-149.

NIE, Z. N.; MACKAY, A.D.; VALENTINE, I.; BARKER, D.J.; HODGSON, J. Influence of pastoral fallow on plant root grow and soil physical and chemical characteristics in a hill pasture. **Plant and Soil**, v. 197, p. 201-208, 1997.

OLMOS, F. **Efectos climáticos sobre la productividad de pasturas en la región noreste**. Tacuarembó: INIA, 1997. 26p. (Boletín de divulgación; 64).

OLMOS, F. **Variation and adaptation in *Trifolium repens* from pastures in Uruguay, with a preliminary assessment of a native clover, *Trifolium polymorphum***. 2000. 298f. PhD Thesis - The University of Wales Aberystwyth, 2000.

OLMOS, F. Impacto del estrés hídrico en plantas de trébol blanco. In: **Clima y respuesta hídrica de pasturas en zonas ganaderas**. Tacuarembó: INIA, 2004. p. 10-22. (INIA Serie actividades de difusión; 364).

ORDOQUI, V.; JUÑEN, G.; GARCÍA, F.; FERNÁNDEZ, C.J. Determinación de límites de plasticidad para algunos suelos del Uruguay. In: REUNIÓN TÉCNICA, 3., 1980, Montevideo. **Anales...** Montevideo: Facultad de Agronomía UDELAR, 1980. p. 77.

PÉREZ GOMAR, E., Respuesta al agua en un mejoramiento forrajero en suelos profundos de basalto bajo diferentes condiciones de pastoreo. In: **Clima y respuesta hídrica de pasturas en zonas ganaderas**. Tacuarembó, 2004. p. 23-30. (INIA Serie actividades de difusión; 364).

PONCE DE LEÓN, J. **Caracterización de un vertisol de la unidad “La Carolina”**. I. **Propiedades físicas**. 1981. 244f. Tesis (requisitos para obtener título de Ingeniero Agrónomo). Facultad de Agronomía, Universidad de la República Oriental del Uruguay, Uruguay, 1981.

POULSEN T.G.; MALDRUP, P.; YMAGUCHI, T.; JACABSEN, H. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. **Soil Science**, p.877-887, 1999.

PROFFIT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; MCGARRY, D. A comparison between continuous and controlled grazing on a red duplex soil. I. Effects on soil physical characteristics. **Soil & Tillage Research**, v. 35, p. 199-210, 1995.

PUENTES, R.; HARRIS, B.L.; VICTORIA, C. Management of Vertisols in temperate regions. In: WILDING L.P.; PUENTES, R. (Eds.). **Vertisols: their distribution, properties, classification and management**. Texas: Texas A&M University, 1988. p. 129-145.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS, 2003. (CD-ROM).

SAWCHIK, J.; FORMOSO, F. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. In: INIA. **Tecnología de producción de cultivos y pasturas bajo riego**. La Estanzuela: INIA, 2000. p. 13-26. (INIA actividades de difusión; 227).

SOANE, B.D. The role of organic mater in soil compactibility: a reviw of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in Crop Production**. Elsevier: Amsterdam, 1994. 662p.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 151-162, 1966.

TERMEZANA, A. Región basáltica. In: **Pasturas IV**. Montevideo: Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerguer", 1978. 266p. p. 9-24. (Miscelánea 18).

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resource Research**, v.16, p. 547-582, 1980.

WITSCHI, P.A.; MICHALK, D. L. The effect of sheep treading and grazing on pasture and soil characteristics of irrigated annual pastures. **Australian Journal Agricultural Research**, v. 30, p. 741-750, 1979.

ANEXO

ANEXO A

- Horizonte A₁ Profundidad: 0-19 cm.
Color en húmedo: negro (10 YR 2/1).
Estructura: bloques subangulares de 5 a 10 mm y 10 a 20 mm. Fuerte.
Textura: arcillo limoso.
Consistência: ligeiramente duro, debilmente plástico, debilmente pegajoso.
Concreciones de Fé y Mn, de 1 mm, pocas, friables.
Raíces: abundantes.
Minerales primarios: cuarzo.
Transición: clara.
- Horizonte B₂₁ Profundidad: 19-51 cm.
Color en húmedo: negro (5 YR 2/1).
Textura: arciloso.
Estructura: bloques subangulares de 20 a 50 mm, moderada, que rompe en bloques subangulares y angulares de 10 a 20 mm.
Revestimiento: películas de qrcilla, delgadas, discontinúas.
Consistencia: firme, muy plástico, muy pegajoso.
Concreciones: Fe y Mn de 1 mm, pocas, friables.
Raíces: abundantes.
Minerales primarios: cuarzo.
Transición: gradual.
- Horizonte B₂₂ Profundidad: 57-78 cm.
Color en húmedo: pardo rojizo oscuro (5 YR 2/2).
Textura y pedregosidad: arcilloso, gravillas angulosas de 2 a 10 mm, pocas.
Estructura: bloques angulares de 20 a 50 mm, moderada, que rompe en bloques angulares de 10 a 20 mm.
Revestimiento: slickensides, delgados, continuos.

Consistencia: muy plástico, muy pegajoso.

Raíces: comunes.

Mineral primario: cuarzo.

Transición: difusa.

Horizonte CC_a

Profundidad: 78-92 cm.

Color en húmedo: pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2).

Textura y pedregosidad: Arcilloso con gravillas angulosas y redondeadas de 2 a 10 mm, abundantes y angulosas de 10 a 50 mm, comunes.

Estructura: bloques angulares de 20 a 50 mm, moderada.

Reacción al HCl.

Minerales primarios > cuarzo.

Transición: abrupta.

Horizonte R

Profundidad 92 y más cm.

Basalto.

Fuente: Alvarez et al., 1974.

ANEXO B

Prof. (cm)	Granulometría			PH agua	Matéria orgánica				CaCO ₃ %
	Ar	L	Arc.		Humus	C	N	C/N	
0-19	13,1	46,3	40,6	6,20	6,89	3,99	0,29	13,8	
19-51	7,4	27,4	65,2	6,80	3,12	1,81	0,13	13,9	
51-78	7,1	28,4	64,5	7,50	1,74	1,01	0,09	11,2	0,29
78-92	10,8	28,1	61,1	7,80	1,01	0,59	0,05	11,8	1,13

Prof. (cm)	Complejo intercambio em m.e./100 gr. Suelo seco							Fe ₂ O ₃ %
	Ca	Mg	K	Na	H	C.I.C.	% S	
0-19	22,4	6,3	0,8	0,8	5,5	35,8	84,7	1,18
19-51	39,3	11,7	1,5	1,4	3,4	56,3	94,0	0,91
51-78	31,3	10,6	1,8	1,5		53,2		0,69
78-92	35,1	11,6	0,8	1,4		48,9		0,74

Fuente: Alvarez et al., 1974.