

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ALTERAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO, SOB
PASTAGEM DEGRADADA, SUBMETIDO À ESCARIFICAÇÃO**

MARCELO JOSÉ COLET

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ALTERAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO, SOB
PASTAGEM DEGRADADA, SUBMETIDO À ESCARIFICAÇÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola, na Área de
Concentração Água e Solo.

MARCELO JOSÉ COLET

ORIENTADOR: Prof. Dr. CLÁUDIO BIANOR SVERZUT

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIZ ANTONIO DANIEL

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

C679a Colet, Marcelo José
Alteração de atributos físicos de um solo, sob
pastagem degradada, submetido à escarificação /
Marcelo José Colet. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientadores: Cláudio Bianor Sverzut, Luiz Antonio
Daniel
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solos - Compactação. 2. Solos - Degradação. 3.
Solos - Manejo. 4. Solos - Densidade. 5. Solos -
Porosidade. 6. Teste de penetração do solo. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Physical attributes changes on a soil, under degraded pasture,
submitted to the scarification

Palavras-chave em Inglês: Soil compaction, Soil degradation, Soil management,
Bulk density, Soil porosity, Soil penetration resistance

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Mara de Andrade Marinho Weill e João Batista de Andrade

Data da defesa: 20/02/2006

AGRADECIMENTOS

À namorada, Maria Eliene Ferreira Barros, por seu apoio, compreensão e companheirismo.

Aos meus pais, Darcy Antonio Colet e Marlene Teresinha Colet, e irmã, Márcia Fátima Colet.

Ao orientador, prof. Dr. Cláudio Bianor Sverzut, por sua orientação, dedicação e cumplicidade.

Ao prof. Dr. Pedro Henrique Weirich Neto pelo inestimável auxílio, amizade e companheirismo.

Ao Dr. João Batista de Andrade e Luiz Fernandes Petri, pela sua prestatividade e colaborações inestimáveis para realização deste experimento.

À prof. Dra. Mara de Andrade Marinho Weill, pela sua colaboração para realização deste trabalho.

Aos pesquisadores Ângelo Rafael Chiquette Lopes, Hevandro Colonhese Delalibera, Nátali Maidl de Souza, Marcio William Roque, Adriana Schimandei e Daniel Coelho Rosim, pela sua colaboração para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Agrônomo M.Sc. Wagner Antonio Chueiri, assessor agrônomo da Manah/Bunge Fertilizantes.

Ao Instituto de Zootecnia de Nova Odessa - SP, pela concessão da área para realização do experimento e suporte ao mesmo.

Ao Centro de Tecnologia da Unicamp, pelo desenvolvimento e calibração de instrumentos utilizados para a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Mecanização Agrícola (Lama) da UEPG, pelo auxílio para instalação do experimento.

Ao Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP e sua equipe, pelas análises efetuadas.

Ao Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Instituto Agronômico de Campinas, pela concessão dos dados meteorológicos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

Às empresas: Valtra, Tatu Marchesan, Embracal, Manah/Bunge Fertilizantes e Barana, pela concessão de materiais e equipamentos, contribuindo para a realização deste experimento.

A todos aqueles que não foram citados, mas não menos importantes.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	4
3.1 Características da pecuária extensiva de corte do Brasil	4
3.2 Uso do solo	4
3.3 Degradação de pastagens	6
3.4 Compactação do solo	9
3.5 Recuperação de solos sob pastagem	16
4. MATERIAL E MÉTODOS	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6. CONCLUSÕES	55
7. ANEXOS	56
7.1 Anexo 1: Análises de variância considerando o fator calagem	56
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Desenho esquemático do delineamento experimental utilizado para a implantação dos tratamentos “escarificação” (E), “calagem” (C), “escarificação + calagem” (EC) e “testemunha” (T).....	20
FIGURA 02 - Protótipo de máquina agrícola composto por um escarificador e um distribuidor de fertilizantes conjugados.....	21
FIGURA 03 - Mecanismos do protótipo de máquina que interagem com o solo: disco de corte (A), haste sulcadora (B) e rolo destorreador (C).	22
FIGURA 04 - Ponteira alada desenvolvida por SANTOS (1994).....	22
FIGURA 05 - Penetrógrafo hidráulico eletrônico desenvolvido por LINS E SILVA et al. (1995).	25
FIGURA 06 - Esquema de amostragem por parcela.	26
FIGURA 07 - Aspecto visual da pastagem antes da instalação do experimento.	29
FIGURA 08 - Aspecto visual dos tratamentos após a instalação do experimento.	30
FIGURA 09 - Aspecto visual dos tratamentos 60 dias após a instalação do experimento.....	31
FIGURA 10 - Precipitação pluviométrica total semanal e médias semanais das temperaturas máximas e mínimas conforme estação meteorológica de Nova Odessa - SP.....	32
FIGURA 11 - Média da resistência do solo à penetração aos 60 dias após instalação do experimento nas parcelas não escarificadas.	50
FIGURA 12 - Média da resistência do solo à penetração aos 60 dias após instalação do experimento nas parcelas escarificadas.	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Análise química de solo de rotina para a área experimental.	33
TABELA 02 - Estatística descritiva da análise granulométrica do solo da área experimental.	35
TABELA 03 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.	36
TABELA 04 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.	36
TABELA 05 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.	36
TABELA 06 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.	37
TABELA 07 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo para as variáveis macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade 0-100 mm.	38
TABELA 08 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.	38
TABELA 09 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.	39
TABELA 10 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.	39
TABELA 11 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.	39

TABELA 12 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo para as variáveis macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade 100-200 mm.	40
TABELA 13 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.	40
TABELA 14 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.	41
TABELA 15 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.	41
TABELA 16 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.	41
TABELA 17 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo para as variáveis macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade 200-300 mm.	42
TABELA 18 - Conteúdo de água do solo (g.g^{-1}) no momento da avaliação inicial da resistência do solo à penetração e da implantação do experimento.	44
TABELA 19 - Análise multivariada para determinação de camadas do solo conforme resistência à penetração.	45
TABELA 20 - Conteúdo de água do solo (g.g^{-1}) no momento da avaliação da resistência do solo à penetração 60 dias após a implantação do experimento.	46
TABELA 22 - Camadas do solo conforme resistência à penetração 60 dias após escarificação.	49
TABELA 23 - Médias dos valores de resistência do solo à penetração para as camadas identificadas a partir da análise multivariada para a avaliação após a instalação do experimento.	51
TABELA 24 - Análise de variância para o efeito da escarificação área sob a curva de resistência do solo à penetração, para a profundidade 0-100 mm.	52
TABELA 25 - Análise de variância para o efeito da escarificação área sob a curva de resistência do solo à penetração, para a profundidade 100-200 mm.	52

TABELA 26 - Análise de variância para o efeito da escarificação área sob a curva de resistência do solo à penetração, para a profundidade 200-300 mm.	52
TABELA 27 - Análise de variância para o efeito da escarificação na área total (0-300 mm) sob a curva de resistência do solo à penetração após 60 dias.	53
TABELA 28 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo na área sob a curva de resistência do solo à penetração (cm kg cm^{-2}).	53

RESUMO

O uso intensivo do solo, associado ao emprego de práticas de manejo inadequadas, implica em sua degradação. Este problema é de comum ocorrência em áreas de pastagens, onde usualmente o produtor prioriza investimentos no rebanho, negligenciando o manejo do solo. Nessas áreas, a compactação do solo pode ser considerada uma das principais causas de limitação da capacidade de produção da forrageira. Várias técnicas podem ser utilizadas para romper camadas compactadas do solo, dentre elas a escarificação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações ocorridas em atributos físicos de um solo sob pastagem mediante sua escarificação, visualizando a recuperação de pastagens degradadas. Para tal, implementou-se um experimento em uma área de *Brachiaria decumbens* no Instituto de Zootecnia em Nova Odessa (SP), utilizando um protótipo de máquina agrícola desenvolvido na Feagri/Unicamp, que permite a escarificação do solo e distribuição de corretivos simultaneamente. O efeito da escarificação do solo foi avaliado pela resistência do solo à penetração, determinada com um penetrógrafo hidráulico eletrônico, e pelos atributos físicos macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, em avaliação aos 60 dias após instalação do experimento. A escarificação do solo propiciou o aumento da macroporosidade e da porosidade total e, redução da densidade do solo nos 100 milímetros superficiais, quando observados na entrelinha da passagem do escarificador, porém, não afetou as propriedades macroporosidade, microporosidade e densidade do solo na profundidade de 100-200 milímetros. Para a condição deste experimento, a escarificação do solo provocou uma leve compactação logo abaixo da profundidade de trabalho, evidenciada pela redução na macroporosidade. A metodologia de análise da área sob a curva possibilitou comparar estatisticamente a resistência do solo à penetração. A escarificação do solo reduziu os valores de resistência do solo à penetração, evidenciada de forma estatisticamente significativa quando comparados pela metodologia de análise da área sob a curva de resistência.

Palavras-chave: Compactação do solo; degradação do solo; manejo do solo; densidade do solo, porosidade do solo; resistência do solo à penetração.

ABSTRACT

The intensive use of the soil combined with inadequate management practices leads to soil degradation. This problem is common with pasturelands, where the farm manager specializes in animal husbandry, and not in soil management. Soil compaction in such areas can be considered as one of the main limitations to forage production capability. Several techniques may be applied to break through compacted soil layers, and scarification is one of them. The objective of this study is to evaluate the changes to soil physical properties in pasture areas after scarification, aiming at the recovery of degraded pasturelands. The experiment was set up at the Zootechny Institute in Nova Odessa (SP) on a *Brachiaria decumbens* field. The machine used in the study was a prototype developed at Feagri/Unicamp for simultaneous soil scarification and fertilizer distribution. The effect of scarification on the soil was evaluated by soil resistance to penetration with an electronic hydraulic penetrometer, and by the physical attributes of macroporosity, microporosity, total porosity and soil density 60 days after setup. Scarification increased soil macro and total porosity, and reduced soil density on the top 100 mm, observed between scarification rows. Macroporosity, microporosity and soil density was not affected in the depth of 100-200 mm. Scarification caused a slight compaction immediately below the work-depth, made evident by the higher macroporosity in this section of the soil. The methodology of analyzing the area below the resistance curve allowed the statistical comparison of soil resistance to penetration. This methodology showed that scarification caused statistically significant reduction of the figures on soil resistance to penetration.

Key words: Soil compaction, soil degradation, soil management, soil bulk density, soil porosity, soil penetration resistance.

1. INTRODUÇÃO

A bovinocultura extensiva de corte tem assumido importante papel no cenário econômico brasileiro. Este fato é comprovado pelos seus números expressivos. Hoje, o país conta com um rebanho bovino de corte superior a 180 milhões de cabeças (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2004), distribuídas em uma área próxima aos 180 milhões de hectares, uma área aproximadamente três vezes superior à empregada para fins de agricultura.

Um dos recursos naturais mais importantes para a produção de alimentos, cuja qualidade é comprometida pela atual forma de exploração agropecuária, o solo, é a base para o desenvolvimento das plantas. DIAS & GRIFFITH (1998) definem a degradação dos solos como a perda da capacidade destes sustentarem a produção de biomassa. Dentre as atividades causadoras de degradação dos solos, o uso na pecuária assume elevada importância, usualmente pela especialização do produtor no manejo do rebanho, sem preocupar-se com a manutenção da capacidade produtiva dos solos.

Para a recuperação dos solos degradados, faz-se necessário o uso de técnicas que propiciem a restauração de sua qualidade. No caso dos solos sob pastagem, a recuperação se baseia na restauração da fertilidade (física, química e biológica), por práticas de mobilização do solo, e pela aplicação de fertilizantes e corretivos. A eliminação de plantas daninhas também deve ser considerada, com maior necessidade em pastagens recentemente formadas ou com manejo inadequado.

A compactação do solo é fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das espécies vegetais. Nas áreas de pastagem, é mais intensa em locais onde ocorre maior tráfego dos animais, usualmente as áreas de lazer. Porém, por não se observar um manejo dos animais visando evitar a compactação do solo, as áreas de pastagem usualmente

apresentam uma compactação superficial, principalmente na camada de 0-10 centímetros, onde se encontram a maioria das raízes da forrageira.

Neste contexto, a escarificação do solo pode contribuir para a redução da compactação dos solos sob pastagem, evidenciada pela porosidade do solo, densidade do solo e resistência do solo à penetração.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi de avaliar as alterações ocorridas em atributos físicos de um solo sob pastagem mediante sua escarificação, visualizando a recuperação de pastagens degradadas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a alteração em atributos físicos de um solo sob pastagem mediante sua escarificação, visualizando a recuperação de pastagens degradadas.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar os efeitos da escarificação do solo na sua estrutura, a partir dos atributos: densidade do solo e porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total), para 3 profundidades.

Avaliar os efeitos da escarificação na resistência do solo à penetração.

3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

3.1 Características da pecuária extensiva de corte do Brasil

A pecuária de corte é praticada no Brasil essencialmente na forma extensiva, fator que rendeu o título de “*Boi Verde*” aos animais brasileiros no mercado externo, e firmou a marca “*Brazilian beef*”, a exemplo do ocorrido com o “Café do Brasil” (IBGE, 2004). Conforme dados do IBGE (2004), o rebanho bovino brasileiro é de aproximadamente 204 milhões de cabeças, destas sendo aproximadamente 180 milhões pertencentes ao rebanho de corte.

O montante de áreas utilizadas com pastagens também é bastante significativo. Conforme dados do Censo Agropecuário (IBGE, 1996), somando-se as pastagens naturais e as plantadas, estas ocupam aproximadamente 176,6 milhões de hectares, enquanto as atividades agrícolas ocupam aproximadamente 50,2 milhões de hectares. Considerando o rebanho bovino de corte e o total das terras utilizadas para pastagens, os valores se assemelham com os apresentados por ZIMMER et al. (1998), o qual comenta que a taxa de lotação encontra-se na média de uma cabeça por hectare de pastagem.

ZIMMER & CORREA (1993) descrevem a pecuária de corte brasileira como uma pecuária baseada na exploração de pastagens. Entretanto, salientam a despreocupação do produtor com o manejo do solo e da pastagem, afetando a persistência desta e comprometendo os níveis de produção da pecuária.

3.2 Uso do solo

A agricultura brasileira utiliza-se de técnicas advindas da chamada Revolução Verde, caracterizada pelo uso intensivo de insumos e da motomecanização. Tal modelo vem sendo

questionado em aspectos sociais, ecológicos e econômicos. Desta forma, destaca-se a não sustentabilidade do sistema produtivo, devido ao alto custo de insumos e seu balanço negativo de energia. Visando atingir esta sustentabilidade, justifica-se a necessidade de otimização do uso dos fatores de produção e dos recursos naturais. Conforme GLIESSMAN (2001), agricultura sustentável é aquela que permite colher biomassa de um sistema que não é afetado por tal, isto é, que apresenta capacidade de renovar-se por si só. Para que isso ocorra, se faz necessária a adoção de práticas agrícolas racionais, que preservem os recursos naturais.

Estima-se que do total das terras mundiais, cujo montante excede 13 bilhões de hectares, menos da metade apresentam-se aptas a serem utilizadas para a exploração agropecuária. O potencial de terras aráveis no mundo é estimado em 3,03 bilhões de hectares, ou seja, aproximadamente 22% da área total. Destas, LAL (1990) comenta que cerca de 40%, o que representa 1,46 bilhões de hectares, são potencialmente aptas para utilização agrícola.

Apesar desta quantidade de solos disponíveis, COSTA & MATOS (1997), comentam que solos considerados inaptos para a prática agrícola passaram a ser explorados de maneira desordenada, acarretando grandes prejuízos ao ambiente. A exploração intensiva, submetendo o solo à constante mobilização e crescente incorporação de fertilizantes, corretivos e defensivos conduziram à degradação física e à poluição química do sistema solo-água-planta. Assim, ao mesmo tempo em que foi crescente a necessidade do aumento da produção mundial, promovendo a expansão da fronteira agrícola ou intensificação de uso dos solos já cultivados, as atividades humanas propiciaram a degradação dos solos.

De acordo com dados de levantamentos apresentados por DIAS & GRIFFITH (1998), cerca de 15% do solo mundial (1,97 bilhões de hectares) encontra-se, de uma maneira ou de outra, degradado. Do total dessa área, 5% encontra-se na América do Sul, 17% na África, 18% na Ásia, 21% na América do Norte e Central e 23% na Europa. Se considerar ainda as áreas inabitadas do planeta, essa estatística torna-se mais agravante, uma vez que cerca de 24% dessas áreas encontram-se degradadas em decorrência das atividades antrópicas. Considerando-se os fatores de degradação, o superpastejo é responsável por 34,5% da área mundial degradada, seguido do desmatamento (29,4%), atividades agrícolas (28,1%), exploração intensa de vegetação para fins domésticos (6,8%) e atividades industriais ou bioindustriais (1,2%).

3.3 Degradação de pastagens

A extensão do problema de degradação de pastagens no Brasil, conforme BONFIM et al. (2003) é evidenciada pela substituição freqüente de forrageiras mais exigentes em relação às condições do solo, por espécies menos exigentes.

Dentre as principais causas da degradação das pastagens, destaca-se a tipologia do produtor brasileiro, que prioriza os investimentos no rebanho, sem se preocupar com a manutenção da capacidade produtiva dos solos. Assim, problemas com a fertilidade (física, química e biológica) do solo atingem níveis determinantes da baixa produção da forrageira. Neste sentido, faz-se necessária uma visão sistêmica, considerando a planta forrageira, o animal, o clima e o solo, para obtenção de um sistema de pastejo ideal, que conforme RODRIGUES & REIS (1999), é aquele que permite maximizar a produção animal sem afetar a persistência das plantas forrageiras.

Segundo MACEDO (1993) e MACEDO & ZIMMER (1993), degradação de pastagem é o processo evolutivo de perda de vigor, de produtividade e de capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e qualidade exigida pelos animais, assim como, para superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, culminando com a degradação avançada dos recursos naturais, em razão de manejos inadequados.

Segundo AGUIAR (1996), as principais causas da degradação são: o plantio de espécies forrageiras não adaptadas às condições edafoclimáticas (tipo de solo e clima) de cada região; o plantio incorreto de pastagens; o manejo incorreto da pastagem durante o seu ciclo; a queima freqüente; a falta de diversificação que provoca o desenvolvimento rápido de pragas das pastagens (exemplo - cigarrinha das pastagens); a infestação por plantas invasoras; a incompatibilidade de espécies consorciadas; e o cultivo de pastagens em solos com baixa fertilidade ou em solos férteis, mas esgotados.

A compactação do solo devido ao tráfego dos animais apresenta-se como a maior causa da degradação dos solos sob pastagem (RIBON & TAVAVES FILHO, 2004). Sua ocorrência está associada a elevada pressão exercida sobre o solo pelas patas dos animais, em

função da elevada massa corporal aplicada em uma pequena área de contato (IMHOFF et al., 2000). WATKIN & CLEMENTS (1978) estimaram que um animal poderia pisotear até 0,01 ha dia⁻¹, admitindo que um bovino provocaria entre 8.000 a 10.000 impactos dia⁻¹, tendo cada impacto uma área aproximada de 90 cm². Porém, a área que poderia ser efetivamente pisoteada dependeria do comportamento animal em resposta ao clima e da disponibilidade da forrageira, entre outros.

O diagnóstico da degradação de pastagens é essencial para a tomada de decisão referente às práticas de manejo. Este diagnóstico pode ser dividido em duas categorias, uma qualitativa (identificar a causa da degradação) e outra quantitativa (identificar o quanto está degradado). DORAN & PARKIN (1994) descrevem a facilidade de se trabalhar com índices para o entendimento da degradação do solo, pois permitem que o resultado seja expresso baseado em critérios específicos do desempenho de cada componente para cada ecossistema. Os autores recomendam um índice de qualidade ambiental, que contempla: produção de alimentos e fibras, erosividade, qualidade da água subterrânea, qualidade da água superficial, qualidade do ar e qualidade dos alimentos. Já PARR et al. (1992), apontam que é necessário determinar a interação entre estes indicadores e o peso relativo de cada um no estabelecimento do índice de qualidade ambiental. Propõem também que o índice relacione: propriedades do solo, potencial produtivo, fatores ambientais, saúde humana e animal, erodibilidade, diversidade biológica, qualidade dos alimentos e manejo.

AZEVEDO (2004) estudou a degradação do solo sob pastagens, diagnosticando-a qualitativamente e quantitativamente, para o entendimento dos índices de degradação. Este autor obteve índices de degradação física, química e geral, a partir da quantificação de atributos físicos e químicos do solo e comparando-os com dados da vegetação natural de mesma toposequência. Essa metodologia possibilitou detectar e estabelecer a extensão e o grau em que ocorrem as causas de degradação, permitindo a sugestão de procedimentos para minimizar os efeitos que possam ter causado.

Segundo NASCIMENTO JUNIOR et al. (1994), existem pelo menos três estágios da degradação em pastagem:

- Primeiro estágio - a espécie mais consumida pelos animais, por pastejo pesado ou sob qualquer outro fator, perde o vigor e reduz o seu crescimento.
- Segundo estágio – a forrageira mais consumida começa a desaparecer e outras forrageiras menos apreciadas pelos animais iniciam o domínio da área.
- Terceiro estágio – ocorre a invasão da pastagem por espécie de plantas invasoras.

Nestes estágios, a ocorrência de prejuízos é crescente devido à perda da qualidade da pastagem, perda de quantidade de forragem produzida na pastagem, vulnerabilidade dos solos, perda de peso do animal. Segundo AGUIAR (1996), se a intervenção ocorrer ainda no primeiro estágio, é mais fácil a recuperação do vigor e da produtividade da forragem mais consumida pelos animais, o que contribuirá para a melhoria do desempenho.

Outra forma de se avaliar os estágios da degradação foi estudada por NASCIMENTO JUNIOR et al. (1994), esta especificamente para o gênero *Brachiaria* sp. Os autores denominam quatro níveis de pastagem: excelente, boa, razoável e pobre.

- Excelente - a pastagem deve produzir mais de 2.500 kg ha¹ de matéria seca (MS) disponível, estar formada em mais de 75% da sua área com forragem implantada, estar com plantas acima de 40 cm de altura e relação folha/caule maior do que 1.
- Boa - a pastagem deve produzir de 1500 a 2.500 kg ha¹ de matéria seca (MS) disponível, a forrageira implantada ocupando de 50 a 75% da área, possuir uma altura média de 40 cm e uma relação folha/caule em torno de 1.
- Razoável - a pastagem deve estar produzindo entre 750 e 1.500 kg ha¹ de MS, a forrageira ocupando de 25 a 50% da área, com uma altura de forragem de 40 cm, uma relação folha/caule menor do que 1 e já aparece sinais de erosão laminar incipiente, causada pelas chuvas.
- Pobre - possui produção de forragem abaixo de 750 kg ha¹ de MS, ocupa menos de 25% da área, possui uma altura abaixo de 40 cm e apresenta-se com sinais evidentes de erosão laminar.

DIAS FILHO (2005) comenta que a caracterização de indicadores da degradação de pastagens é uma tarefa difícil, por não existir metodologia uniforme para este fim. Sendo a caracterização de indicadores de degradação de uma pastagem relativa à produtividade considerada ideal para a mesma, um nível de produção pode definir uma pastagem degradada em um local, mas pode determinar uma pastagem ainda produtiva para outro.

3.4 Compactação do solo

O crescimento e desenvolvimento de espécies vegetais dependem de diversos fatores. PRIMAVESI (1999) comenta a importância de um sistema radicular bem desenvolvido e que, para que tal ocorra, é necessário que não haja impedimentos no solo, sejam químicos, físicos ou biológicos. Os impedimentos químicos no solo podem ser relacionados ao pH do solo (elevada acidez), à ausência de algum elemento essencial (nutriente) ou à presença de algum elemento em níveis tóxicos, como o excesso de alumínio. Fungos patogênicos e algumas espécies de insetos são impedimentos biológicos que podem estar presentes no solo e também limitar o crescimento radicular. Como impedimento físico, a presença de camadas compactadas no solo é fator o de maior ocorrência.

O processo de compactação do solo ocorre pela compressão do solo não saturado quando este é submetido a cargas excessivas, causando um rearranjo das partículas e levando a redução do seu volume (VARGAS, 1977; GUPTA & ALLMARAS, 1987; CAMARGO & ALLEONI, 1997).

O dimensionamento da compactação do solo é bastante subjetivo, pois não existe um parâmetro específico que indique com precisão o quanto um solo encontra-se compactado. SILVA et al. (2004) comentam que a avaliação da compactação de um solo é baseada na comparação de sua condição atual a uma condição natural ou sem restrições ao crescimento e produtividade das culturas.

Desta forma, muitos autores como JONES (1983), WARREN et al. (1986), DIAS JUNIOR & PIERCE (1996), HAKANSSON & LIPIEC (2000) empregam a densidade do solo como indicativo de compactação. Entretanto, este parâmetro deve ser analisado em conjunto

com outros atributos físicos do solo, por ser afetado por algumas características intrínsecas ao material de origem do solo (densidade de partículas, granulometria), bem como pelo teor de matéria orgânica.

A porosidade dos solos também é um parâmetro muito empregado como indicativo de compactação dos solos. Diversos autores, como RICHARD et al. (1999), LINS E SILVA (1999), LIPIEC et al. (2003), TARAWALLY et al. (2004) e TORMENA et al. (2004) citam que durante a compressão do solo, no processo de compactação, o rearranjo das partículas faz com que o volume dos macroporos seja reduzido, o que implica na redução da porosidade total pela redução da macroporosidade. Os mesmos autores comentam que os microporos pouco sofrem ou nada são afetados durante o processo de compactação.

Visando determinar o impedimento físico do solo ao crescimento de raízes, o índice de cone estima a resistência do solo à penetração, sendo um parâmetro muito empregado para estimar a compactação do solo (STOLF et al., 1983; PERUMPAL, 1987; IMHOFF et al., 2000; SVERZUT et al., 2001; WEIRICH NETO et al., 2002a; STRECK et al., 2004). A resistência do solo à penetração medida pelo índice de cone é um parâmetro interessante por localizar de modo fácil onde se encontram as camadas compactadas no perfil de um solo. Entretanto, o número de parâmetros que afetam os valores medidos (tipo de penetrômetro, tamanho e ângulo da ponteira, velocidade de penetração no solo, granulometria, teor de matéria orgânica e conteúdo de água do solo, dentre os mais citados) não permitem comparação precisa entre leituras efetuadas em diferentes sítios (LINS E SILVA, 1999).

STRECK et al. (2004) avaliaram as modificações ocorridas nos atributos físicos densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração pela compactação induzida por um trator agrícola em área sob plantio direto. Os mesmos verificaram alterações nos valores determinados para todas as variáveis, exceto a microporosidade, após a aplicação da carga (passagem do trator), entretanto comentam que a resistência do solo à penetração foi a variável que evidenciou de forma mais clara a compactação do solo.

LINS E SILVA (1999) estudou a representatividade da resistência do solo à penetração em relação à densidade do solo, a partir de amostras deformadas e compactadas em

laboratório, para diferentes velocidades de penetração e conteúdos de água do solo, utilizando um penetrógrafo hidráulico eletrônico. O autor verificou que para umidades mais elevadas do solo, pequenas variações no índice de cone representam variações mais elevadas na densidade do solo, e vice-versa, o que comprova ser interessante evitar trabalhar com este tipo de instrumento em condições de umidade do solo elevadas, para obtenção de resultados mais precisos.

A compactação do solo pode ser desejável, como no caso da construção civil, onde se faz necessário compactar o solo para a obtenção de uma base sólida e com capacidade de suporte para cargas impostas. Entretanto, é fator limitante para o desenvolvimento das plantas, sendo indesejável nas atividades agropecuárias. Além do impedimento físico ao crescimento das raízes pelo aumento da resistência do solo à penetração, CAMARGO & ALLEONI (1997), RADFORD et al. (2001), LIPIEC et al. (2003) citam a redução da porosidade total e da dimensão dos poros do solo, tendo como consequência a redução da condutividade hidráulica, da capacidade de retenção de água e ar, do transporte de gases e da absorção de nutrientes pelas plantas.

Em solos compactados, LIPIEC & STEPNIEWSKI (1995) comentam que a absorção de nutrientes pelas plantas é reduzida, em função da redução no crescimento radicular, alteração da condutividade hidráulica e da aeração do solo. Os mesmos autores também citam que o aumento no uso de fertilizantes em solos compactados, visando compensar o efeito da compactação do solo no rendimento das culturas, leva a aumentos significativos nas perdas de nutrientes (fertilizantes) para o meio, por processos de erosão, absorção pelo solo ou volatilização.

O meio ambiente também é afetado por problemas referentes à compactação do solo. SOANE & OUWERKERK (1995) citam alguns destes problemas, como a alteração de propriedades físicas, químicas e biológicas do próprio solo. Os recursos hídricos também são afetados, pois solos compactados têm sua taxa de infiltração de água reduzida, aumentando a ocorrência de erosão, e assim assoreando rios e lagos. A atmosfera também é afetada, pelo aumento da emissão de gases pelo solo, contribuindo significativamente para a ocorrência do efeito estufa.

A presença de camadas compactadas afeta não só a profundidade do sistema radicular, mas também provoca aumento no seu diâmetro (CAMARGO & ALLEONI, 1997). ROSOLEM et al. (2002) simularam em recipientes diferentes densidades do solo para avaliar o desempenho de plantas de cobertura em solo compactado, em casa de vegetação. As espécies avaliadas foram *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Helianthus annuus* (girassol), *Pennisetum americanum* (milheto) e *Sorghum bicolor ssp.* (sorgo), para quatro densidades do solo (1,31; 1,43; 1,58 e 1,70 Mg m⁻³). Os autores não verificaram diferenças para o diâmetro e o total de raízes, atribuindo o fato aos baixos valores de resistência do solo a penetração observados, que foi de 1,34 MPa para a maior densidade, e valores inferiores para as demais.

Conforme MEROTTO & MUNDSTOCK (1999), observa-se aumento no diâmetro de raízes para valores de resistência do solo à penetração acima de 2 MPa. Estudando valores de resistência do solo à penetração limitantes para a produtividade do arroz de sequeiro, em casa de vegetação, BEUTLER & CENTURION (2004) observaram valores de 2,38 MPa para um LATOSSOLO VERMELHO textura média e 2,07 MPa para um LATOSSOLO VERMELHO textura argilosa. Também em ensaio realizado em casa de vegetação, FOLONI et al. (2003) verificaram que a presença de uma camada com resistência do solo à penetração da ordem de 1,4 MPa limitou o crescimento do sistema radicular da cultura do milho, em um LATOSSOLO VERMELHO de textura média.

Um solo pode ser mais ou menos suscetível à compactação, dependendo de alguns fatores. A granulometria do solo, para CAMARGO & ALLEONI (1997), é um dos fatores determinantes desta, por determinar a superfície específica de um solo. Solos com maior superfície específica demandam maior quantidade de água para atingir o ponto de máxima compactação, determinado pelo ensaio de Proctor, descrito por MARTINS JUNIOR (1964). O ensaio permite a obtenção de uma curva de compactação em função do conteúdo de água do solo, da qual se pode extrair alguns parâmetros para comparação. Desta forma, EKWUE & STONE (1995) comprovaram também a influência da matéria orgânica do solo na sua suscetibilidade à compactação. A mesma foi confirmada por WEIRICH NETO et al. (2002b), adicionando matéria orgânica livre a dois tipos de solo e comparando suas curvas de compactação, obtidas pelo ensaio de Proctor.

Empregando técnica de regressão múltipla, a partir do método de redução de variáveis explicativas “passo-a-passo” (*stepwise*), RIBON & TAVARES FILHO (2004) estudaram alguns modelos matemáticos representativos da resistência do solo à penetração de um solo sob pastagem (LATOSSOLO VERMELHO AMARELO textura média) em Rondonópolis (MT), com base em características físicas do mesmo. Os mesmos explicaram o fenômeno com um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,78 a partir das variáveis densidade do solo, teor de argila e matéria orgânica. A inclusão da variável densidade do solo foi associada à sua representatividade para o estado de compactação do solo, enquanto as variáveis matéria orgânica e teor de argila estão associadas à suscetibilidade do solo à compactação.

Em solos agrícolas, o tráfego de máquinas é atribuído como a principal causa da compactação, principalmente em condições de solo com elevado conteúdo de água. Esse fenômeno vem se acentuando com o aumento das dimensões e consequentemente da massa das máquinas agrícolas, incorrendo em aumento da carga por eixo e pressão exercida sobre o solo. Visando reduzir a ocorrência deste tipo de problema, alternativas como o aumento das dimensões e redução da pressão de inflação dos pneus, ou a substituição destes por esteiras vêm sendo empregados (ALAKUKKU et al., 2003; GRECKENKO, 2003).

Avaliando a compactação por máquinas de colheita em um solo em área de reflorestamento na Argentina, BALBUENA et al. (2000) comentam que com o aumento do tráfego das máquinas, independentemente da carga, aumenta a profundidade das camadas compactadas, determinadas pelo índice de cone. JORAJURIA & DRAGHI (2000), estudando a compactação de um solo agrícola na Argentina, encontraram resultados semelhantes aos de BALBUENA et al. (2000) em relação ao aumento no tráfego de máquinas, entretanto, verificaram aumento na compactação com o aumento na carga por eixo das máquinas agrícolas.

Levantando indicadores de degradação de pastagens, AZEVEDO (2004) qualificou como atributos físicos mais importantes a densidade do solo, a condutividade hidráulica, a resistência do solo à penetração, a macroporosidade e a porosidade total. KIEHL (1979), CAMARGO & ALLEONI (1997) e PRIMAVESI (1999) comentam a relação destes

parâmetros com o estado de compactação dos solos e com o desenvolvimento das raízes das plantas.

MÜLLER et al. (2004), estudando a relação entre degradação de pastagens e algumas propriedades do solo em áreas na Amazônia brasileira, comprovaram a influência da compactação da camada superficial do solo estimada pela densidade do solo, com o declínio na produção de pastagens. Dentre um conjunto de atributos físicos e químicos, a densidade do solo (empregada como indicativo da compactação) foi a variável que apresentou maior correlação com o declínio da produção da pastagem.

Em solos sob pastagem, diversos fatores associados ao manejo levam à compactação do solo. WARREN et al. (1986), avaliando a influência do aumento da taxa de lotação da pastagem em alguns atributos físicos de um solo argiloso no Texas (EUA), verificaram incrementos na densidade do solo com o aumento da taxa de lotação, devido ao maior tráfego de animais na área. Os mesmos autores também observaram alteração no tamanho de agregados e comentam que, com o tráfego dos animais em solo úmido, criou-se uma camada com baixa permeabilidade na superfície, além da formação de torrões densos.

PROFFITT et al. (1995) avaliaram o efeito da redução da taxa de lotação de animais (carneiros) nos atributos físicos de um solo na Austrália, onde se empregava cultivos anuais alternados de trigo para grãos e leguminosas para pastejo, em duas condições de preparo de solo (convencional e reduzido). Para ambas as condições de preparo, a estrutura da camada superficial do solo sofreu maior interferência da maior taxa de lotação (8 UA ha^{-1}) em relação à menor (4 UA ha^{-1}), porém os maiores problemas foram verificados na área com preparo convencional do solo.

O período de uso das pastagens tem apresentado correlação com o seu estado de compactação. CORREA & REICHARDT (1995), comparando solos de floresta nativa e pastagens de *Brachiaria humidicola* com 4, 6 e 10 anos de uso, verificaram maiores valores para densidade do solo e de resistência do solo à penetração nas áreas sob pastagem do que na floresta para as profundidades 0-100 mm e 100-200 mm. Os mesmos autores também observaram incremento nos valores de resistência do solo à penetração e densidade do solo na profundidade de 0-100 mm com o aumento do tempo de uso das pastagens. Estudando

algumas características físicas de um ARGISSOLO na Amazônia, ARAÚJO et al. (2004) comprovam a presença de uma camada compactada superficial, na profundidade de 0-100 mm, onde observaram elevada densidade do solo ($1,73 \text{ Mg m}^{-3}$) e baixa porosidade total ($0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Resultados semelhantes foram observados por MARTÍNEZ & ZINCK (2004), que estudaram a variação temporal da compactação do solo em áreas de pastagens de *Brachiaria decumbens* na região colombiana da Amazônia. Após dez anos de pastejo contínuo, os autores verificaram aumentos entre 28 e 30 % nos valores de densidade do solo para solos de textura média e de 40 a 42 % para solos argilosos, na camada superficial. Os maiores valores de resistência do solo à penetração observados concentram-se entre 30 e 120 mm de profundidade, atingindo picos de 4,5 MPa. Com o aumento do tempo de uso das pastagens, ocorreu também redução da produção de biomassa. Os mesmos autores também comentam a existência de áreas de maior compactação dentro dos talhões, associadas aos locais de maior permanência dos animais (áreas de lazer).

Analisando um conjunto de 119 pontos amostrais, visando geração de superfícies de tendência para atributos físicos e químicos do solo em uma área sob pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, no estado do Mato Grosso, AZEVEDO (2004) observou valores de resistência do solo à penetração compreendidos entre 1,60 e 2,88 MPa, na profundidade de 50-100 mm. Para a variável densidade do solo, os valores obtidos variaram entre 1,33 e $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$. Comparando o solo sob pastagem com um solo sob a vegetação natural, na mesma toposequência, o autor demonstrou a ocorrência de maiores alterações nos atributos físicos em relação aos atributos químicos do solo, em função da alteração da utilização das terras.

Estudando a compactação do solo por animais em área de pastejo rotacionado sobre sorgo, em um LATOSSOLO VERMELHO de textura média no município de Pereira Barreto – SP, MELLO et al. (2001) observaram que a densidade do solo foi afetada na profundidade de 0-100 mm, caracterizando a presença de uma camada compactada superficial.

3.5 Recuperação de solos sob pastagem

DIAS FILHO (1998) comenta que para a recuperação de pastagens degradadas é necessário conhecer antes de tudo quais as causas da degradação. O mesmo comenta que para obtenção de sucesso, essas técnicas devem estar associadas ao manejo dos animais sobre as pastagens, já que grande parte dos nutrientes perdidos são exportados pelos animais, ou mesmo redistribuídos na área, pelas fezes e urina, o que pode levar à concentração de nutrientes próximos às áreas de lazer (bebedouros, cochos e locais de descanso) dos animais. Em função do maior tráfego e permanência de animais, estas também são as áreas que apresentam os maiores problemas de compactação do solo.

Diferentes técnicas podem ser empregadas para recuperar pastagens degradadas (PEREIRA & ANDRADE, 1993). A escolha da técnica a utilizar deve ser feita com base no diagnóstico das causas de degradação, podendo então se escolher por uma ou pela combinação de diferentes técnicas.

Estudando a viabilidade econômica da recuperação de pastagens degradadas para a produção pecuária bovina de corte, YOKOYAMA et al. (1999) justificam a mobilização do solo para rompimento de camadas compactadas, bem como a aplicação de corretivos, pelo maior ganho de peso dos animais e aumento da capacidade de suporte de animais por unidade de área. Os mesmos também demonstram que, remunerando todos os fatores de produção, a prática da pecuária bovina de corte é economicamente inviável em pastagens degradadas.

Avaliando o efeito da aplicação de fertilizantes e corretivos do solo em pastagens degradadas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú para as condições de Porto Velho (RO), TOWNSEND et al. (2002) comentam sobre os efeitos positivos da calagem, elevando a saturação por bases a 40%. Também ressaltam o efeito dos nutrientes nitrogênio e potássio no aumento do vigor da cultura e produção de biomassa, bem como a supressão de plantas daninhas que competiam com a forrageira. Os mesmos comentam que o efeito do fósforo foi pouco significativo, em função da reciclagem deste nutriente, devido a decomposição da matéria orgânica presente em superfície, oriunda de resíduos da pastagem e fezes dos animais.

Comparando diferentes métodos de aplicação de calcário (incorporado no solo por grade niveladora ou não incorporado) em *Brachiaria decumbens*, em São Pedro (SP), para calcários com diferente PRNT (55, 70 e 90) e visando atingir três níveis de saturação por bases após a calagem (40, 60 e 80%), OLIVEIRA et al. (2003) obtiveram resultados semelhantes em termos de produção de matéria seca quanto ao modo de aplicação. Porém, o calcário de menor PRNT propiciou teores maiores de cálcio e magnésio no solo. Para a saturação por bases, os melhores resultados em termos de produção de matéria seca ocorreram quando a mesma foi elevada a 60%.

WEIRICH NETO et al. (2000), comparando a utilização de diferentes processos para incorporação de calcário, contemplando mecanismos de ação sob diferentes profundidades e de diferente ação sobre os agregados do solo, verificaram que nos tratamentos com máquinas que mobilizaram o solo em maior profundidade obteve-se neutralização da acidez mais profunda, estando a ação do calcário ligada ao seu contato com o solo.

CARVALHO et al. (1992), avaliando o efeito de calagem em cobertura para *Brachiaria decumbens*, comentam que esta modalidade de aplicação de calcário apresenta resultados lentos, mas crescentes com o passar do tempo, porém seus efeitos não atingem grandes profundidades no solo. Estudando diferentes sistemas de recuperação de pastagens de *Brachiaria humidicola* em LATOSSOLO argiloso no estado do Pará, CARDOSO JÚNIOR et al. (2002) comentam sobre a importância da mobilização do solo, visando melhorar suas condições físicas, bem como da adubação e correção da acidez do solo das pastagens, repondo nutrientes extraídos pelas plantas.

Avaliando o efeito do rompimento de camadas compactadas no rendimento das culturas, AL-ADAWI & REEDER (1996) observaram maior produção das culturas do milho e soja após a descompactação com escarificador. Os mesmos verificaram a redução nos valores de resistência do solo à penetração, densidade do solo e aumento na porosidade total, após escarificação do solo.

GADANHA JUNIOR et al. (1991) referem-se ao escarificador como um implemento que promove a desagregação do solo, recomendando sua utilização para o rompimento de camadas compactadas. Avaliando diferentes sistemas de manejo do solo em área de

agricultura, TORMENA et al. (2002) demonstram que a escarificação do solo propiciou aumento na sua macroporosidade e porosidade total, bem como redução na resistência do solo à penetração.

Uma das preocupações em relação ao manejo conservacionista dos solos é a manutenção de cobertura vegetal na superfície. MAZUCHOWSKI & DERPSH (1984) comentam que os escarificadores provocam uma pequena mobilização do solo, mantendo a maior parte dos resíduos vegetais em superfície, ao contrário do que acontece quando da utilização de máquinas como os arados e grades.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho é parte integrante de um projeto de recuperação de pastagens e otimização de produção de alimento para bovinos de corte em sistema extensivo, que vem sendo desenvolvido pela Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), com apoio do Laboratório de Mecanização Agrícola (Lama) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), do Instituto de Zootecnia (IZ) e do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

Para a realização do presente trabalho, foi escolhida uma área sob pastagem de *Brachiaria decumbens* no Centro Experimental Central do Instituto de Zootecnia de Nova Odessa - SP, onde visualmente podiam ser detectados sintomas de degradação. ZIMMER et al. (1988) comentam a importância das gramíneas do gênero *Brachiaria* como plantas forrageiras no Brasil, destacando entre as espécies mais difundidas a *Brachiaria decumbens*. BOMFIM et al. (2003) justificam a difusão da *Brachiaria decumbens* pela sua rusticidade, sendo tolerante à baixa fertilidade dos solos.

A pastagem foi implantada na área há 10 anos, onde anteriormente era cultivado milho (*Zea mays* L.) para produção de silagem. O solo local foi classificado pelo INSTITUTO AGRÔNOMO DE CAMPINAS – IAC (1975), enquadrando-se na nova classificação proposta por EMBRAPA (1999) como um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico textura média. O sistema de manejo dos animais na área é de pastejo contínuo. Anteriormente a instalação do experimento, o pastejo foi intensificado, utilizando 23 novilhas da raça nelore, para reduzir o porte da pastagem, de modo que esta não prejudicasse o trabalho da máquina. Os animais foram retirados da área 15 dias antes da instalação do experimento, a qual foi mantida vedada durante o período de avaliações.

A classificação climática de Koeppen para o município de Nova Odessa, segundo MIRANDA et al. (2006) é do tipo Aw, que corresponde a um clima tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18 °C.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (Figura 01) descrito por BANZATO & KRONKA (1989) e por MONTGOMERY (2001), em um esquema fatorial 2x2 (Escarificação x Calagem), com seis repetições. As unidades experimentais (parcelas) apresentavam dimensões de 7,5 x 25 m, o equivalente a uma área de 187,5 m² cada. Os tratamentos utilizados foram “Escarificação+Calagem”, “Calagem superficial sem escarificação”, “Escarificação” e “Testemunha (sem nenhuma ação)”. Nos tratamentos onde foi feita a escarificação do solo, a profundidade de trabalho foi determinada após as avaliações físicas iniciais do solo da área experimental, sendo então estabelecida uma profundidade de trabalho de 25 centímetros. A quantidade de corretivo aplicada nos tratamentos onde praticou-se a calagem foi determinada a partir de um valor médio de necessidade de calagem determinado para a área, obedecendo as recomendações propostas por RAIJ et al. (1996) para o estado de São Paulo, com base na análise química do solo efetuada para a caracterização da área.

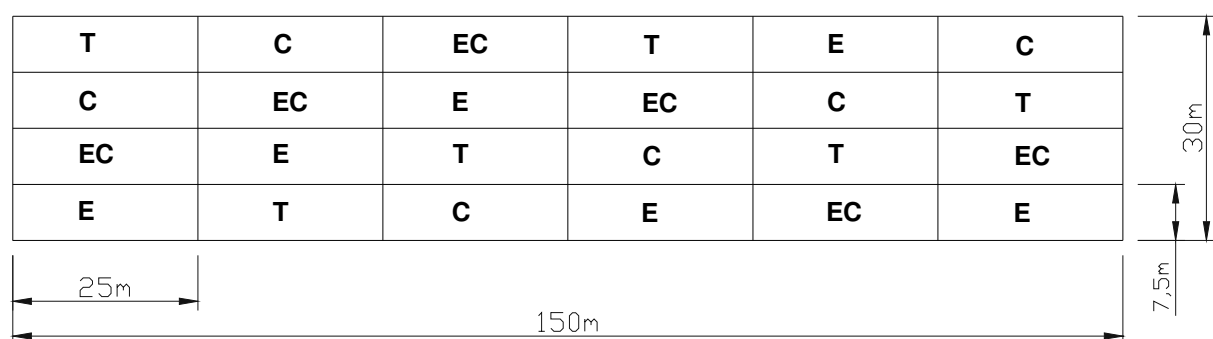


FIGURA 01 - Desenho esquemático do delineamento experimental utilizado para a implantação dos tratamentos “escarificação” (E), “calagem” (C), “escarificação + calagem” (EC) e “testemunha” (T).

Para a instalação do experimento, foi utilizado um protótipo de máquina agrícola desenvolvido na FEAGRI/Unicamp, composto por um escarificador e um distribuidor de

fertilizantes em área total conjugados (Figura 02), cedidos pela empresa Tatu Marchesan¹. Este equipamento permite a realização da escarificação e calagem simultaneamente, aplicando o corretivo da acidez em sulcos e em superfície.

O escarificador que compõe o protótipo, modelo AST/MATIC 450, apresenta três mecanismos que interagem com o solo, conforme Figura 03. Um disco de corte, posicionado anteriormente a cada haste sulcadora; hastes sulcadoras do tipo reta com ponteira inclinada, com desarme automático; e um rolo destorreador. A profundidade de trabalho máxima apresentada pelo fabricante é de até 450 mm.



FIGURA 02 - Protótipo de máquina agrícola composto por um escarificador e um distribuidor de fertilizantes conjugados.

¹ A citação de marcas comerciais não indica recomendação do autor.

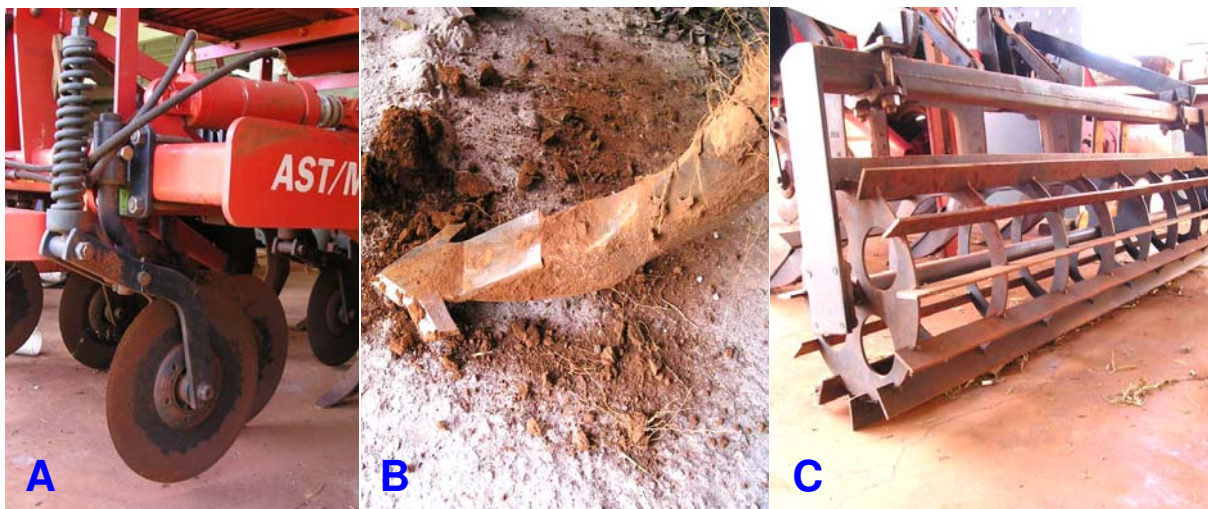


FIGURA 03 - Mecanismos do protótipo de máquina que interagem com o solo: disco de corte (A), haste sulcadora (B) e rolo destorroador (C).

As ponteiros do escarificador, originalmente do tipo retas, foram substituídas por ponteiros aladas, desenvolvidas por SANTOS (1994), Figura 04, apresentando largura da ponta de 76,2mm, envergadura da asa de 152,4 mm, ângulo de ataque da ponta igual a 23° , ângulo de ataque da asa igual a 25° , ângulo de envergadura da asa igual a 15° e ângulo de abertura (varredura) igual a 120° . Esta ponteira foi escolhida pois conforme o autor, apresenta todos seus ângulos otimizados e uma eficiência energética (unidade de energia por volume de solo mobilizado) maior que a ponteira estreita (tipo cinzel) distribuída pelo fabricante da máquina.



FIGURA 04 - Ponteira alada desenvolvida por SANTOS (1994).

O experimento foi implantado no dia 05 de novembro de 2005. Para tracionar o protótipo, utilizou-se um trator da marca Massey Fergusson modelo MF 292, com tração dianteira auxiliar. Para a instalação do experimento, o deslocamento do conjunto “Trator+Escarificador” foi feito no sentido do maior comprimento das parcelas, na velocidade de 1 m s^{-1} ($3,6 \text{ km h}^{-1}$), acompanhando o nível do terreno e reduzindo a quantidade de manobras. As manobras foram feitas apenas na área externa ao experimento. A profundidade de trabalho foi de 25 centímetros e a distância entre hastes do escarificador foi de 35 centímetros, obedecendo o intervalo de 1,25 a 1,5 vezes a profundidade, proposto por JUSTINO et al. (1995). Em função desta distância entre hastes, a largura efetiva de trabalho do escarificador foi de 1,75 m, assim sendo necessárias 4 passadas da máquina por parcela.

Na data da instalação do experimento, efetuou-se uma amostragem do solo para determinação do conteúdo de água, com trado tipo holandês, para as profundidades de 0-100 mm, 100-200 mm e 200-300 mm. As amostras foram pesadas e levadas à estufa a 105°C por 24 horas e posteriormente, pesadas novamente, determinando a umidade pelo método gravimétrico, conforme descrito por EMBRAPA (1997).

Como variáveis de controle, foram obtidos os dados referentes à precipitação pluviométrica e temperatura junto ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), referentes à estação meteorológica de Nova Odessa. Também efetuou-se uma amostragem do solo na profundidade de 0-200 mm, conforme metodologia descrita por RAIJ (1991), para análise química, efetuada pelo Laboratório de Fertilidade do Solo do IAC.

Efetuiu-se também amostragem para determinação da granulometria do solo, com trado tipo calador, estratificando as amostras para as camadas de 0-100 mm, 100-200mm e 200-300 mm. As análises físicas para determinação da granulometria foram realizadas pelo Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP, pelo método da pipeta, descrito por EMBRAPA (1997), porém efetuando a dispersão pelo método descrito por CAMARGO et al. (1986).

Para avaliação dos resultados do experimento, foram utilizados os atributos físicos do solo sugeridos por AZEVEDO (2004), como determinantes do índice de degradação física de solos sob pastagens. Os atributos avaliados foram a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo e resistência do solo à penetração. A resistência do solo à penetração foi determinada na data da instalação do experimento, anteriormente à escarificação, e uma nova avaliação 60 dias após a instalação do experimento. A porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) e a densidade do solo foram avaliadas apenas aos 60 dias após a instalação do experimento.

Para a determinação da densidade do solo e da porosidade, foram coletadas amostras indeformadas empregando a metodologia do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). Os anéis foram cravados no solo com auxílio de amostrador do tipo castelo, coletando amostras para as camadas de 0-100 mm, 100-200 mm e 200-300 mm. Coletou-se uma amostra por parcela para cada profundidade, anteriormente à instalação do experimento e, uma amostra por parcela para cada profundidade 60 dias após a instalação do experimento.

A determinação da porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) foi feita no Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP, pelo método do extrator de Richards, conforme descrito por EMBRAPA (1997). Os valores de massa obtidos após retirar as amostras da estufa a 105 °C também foram utilizados para calcular a densidade do solo.

A determinação da resistência do solo à penetração foi feita empregando um penetrógrafo hidráulico eletrônico (PHE) desenvolvido por LINS E SILVA et al. (1995), conforme Figura 05. Utilizou-se haste e cone tipo “B”, conforme norma da ASAE (1978), com diâmetro da haste de 9,5mm e diâmetro da base do cone de 12,83 mm (0,2 pol² de área) para determinação da resistência do solo à penetração.



FIGURA 05 - Penetrógrafo hidráulico eletrônico desenvolvido por LINS E SILVA et al. (1995).

O PHE possui aquisição eletrônica de dados, que são a profundidade, fornecida pela leitura de um sensor resistivo de deslocamento e a força (posteriormente transformada em pressão), medida por uma célula de carga do tipo S, modelo Z-500, que foi calibrada no Centro de Tecnologia (CT) da UNICAMP para a realização deste trabalho. O sistema de aquisição de dados utilizado é da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), modelo Spider 8. A aquisição de dados foi gerenciada com um microcomputador portátil, utilizando o software Catman² versão 1.2, que permite determinar o início e o fim da aquisição de dados, velocidade de penetração, taxa de aquisição de dados, além de já transformar os valores lidos pela célula de carga e pelo sensor resistivo de deslocamento em força e profundidade, respectivamente, com base nos dados de calibração inseridos.

² Software e autorização para utilização fornecidos pela Brüer & Kjer Instrumentos Eletrônicos do Brasil Ltda.

Utilizou-se taxa de aquisição de dados de 400 Hz e velocidade de penetração utilizada foi de 100 mm s^{-1} , esta recomendada por LINS E SILVA (1999) para este equipamento, por ser a velocidade que fornece dados com maior correlação com a densidade do solo. Considerando a velocidade de penetração e a taxa de aquisição empregadas, foram obtidos 40 valores de resistência do solo à penetração por centímetro de profundidade do solo. Os valores de força obtidos em kgf foram transformados para pressão, em MPa, dividindo-os pela área da base da ponteira e multiplicando-os pela constante 0,098.

As avaliações da resistência à penetração foram feitas em 4 estações por parcela e, em cada estação, foram efetuadas 3 medidas da resistência à penetração, totalizando 12 medidas por parcela, 72 por tratamento e 288 para o experimento todo. O transporte e acionamento do PHE foi feito com um trator da marca VALTRA modelo BM 120, com tração dianteira auxiliar.

Considerando as diferentes densidades de amostragem para as variáveis descritas, a Figura 6 demonstra a localização dos pontos amostrais para as mesmas, para cada parcela experimental.

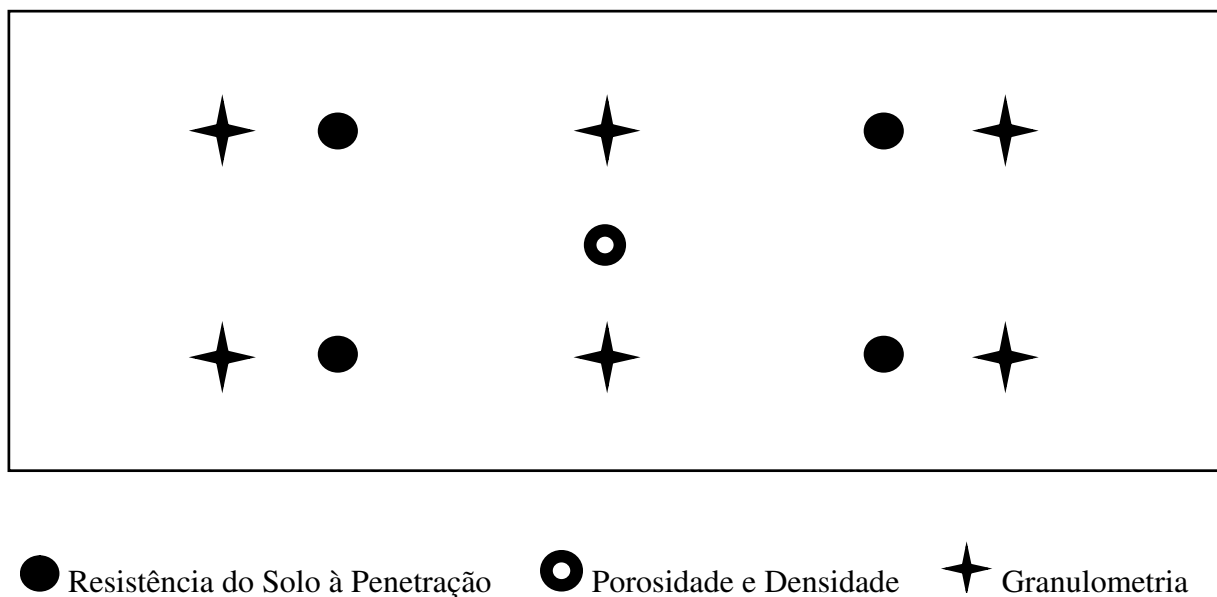


FIGURA 06 - Esquema de amostragem por parcela.

Durante as avaliações de resistência do solo à penetração, foram coletadas amostras do solo para determinação do conteúdo de água, conforme recomendado por LINS E SILVA (1999), para as profundidades de 0-100 mm, 100-200 mm e 200-300 mm, com auxílio de um trado holandês. As amostras foram levadas ao laboratório para determinação do conteúdo de água do solo pelo método gravimétrico, descrito por EMBRAPA (1997).

A análise dos dados do experimento foi feita por estatística clássica empregando análise de variância e posterior teste de médias (BANZATO & KRONKA, 1989; MONTGOMERY, 2001) para a avaliação do efeito da escarificação, a partir das variáveis dependentes macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. As variáveis dependentes foram comparadas entre si para cada uma das profundidades (de 0-100 mm, 100-200 mm e 200-300 mm) individualmente. As análises foram efetuadas utilizando o programa computacional STATGRAPHICS Plus for Windows 4.1[®] (Direitos reservados Statistical Graphics Corporation).

A análise dos dados de resistência do solo à penetração amostrados foi feita de duas maneiras. A primeira, empregando análise multivariada do tipo fatorial com extração de fatores por componentes principais e rotação por método Varimax, conforme proposto por WEIRICH NETO et al. (2002a). Esta metodologia permite identificar com precisão a localização vertical de camadas de solo com valores de resistência do solo à penetração semelhantes. Para tal, foi necessário criar inicialmente camadas equidistantes de 5 mm, calculando a média da resistência do solo à penetração a partir dos 20 valores correspondentes amostrados, para que análise pudesse agrupar essas pequenas camadas em camadas maiores, conforme suas semelhanças. Após identificação das camadas nos tratamentos “Escarificado” e “Não-Escarificado”, efetuou-se uma análise estatística descritiva para cada camada identificada. As análises foram efetuadas utilizando o programa computacional MINITAB Release 12.2[®] (Direitos reservados Minitab Inc.).

A segunda forma de análise dos dados de resistência do solo à penetração foi feita calculando-se a área sob a curva de resistência para cada tratamento. Para tal, calculou-se a média da resistência à penetração para cada parcela, a partir das 12 medidas efetuadas, para cada 5 mm de profundidade. A área sob a curva foi obtida pela soma dos produtos entre os valores de resistência do solo à penetração obtidos em kgf cm^{-2} e a variação de profundidade

correspondente (0,5 cm) em centímetros. Obteve-se então uma área sob a curva para cada parcela em cm kg cm^{-2} , que permitiu a comparação da resistência a penetração para avaliação do efeito da escarificação, a partir de análise de variância e do teste de médias (Tukey). As análises de variância e comparação de médias foram efetuadas utilizando o programa computacional STATGRAPHICS Plus for Windows 4.1[®] (Direitos reservados Statistical Graphics Corporation.).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os três estágios de degradação de pastagem propostos por NASCIMENTO JUNIOR et al. (1994), a pastagem implantada na área (Figura 7) pode ser enquadrada ainda no primeiro estágio, onde segundo os autores, a espécie mais consumida pelos animais perde o vigor e reduz o crescimento, por superpastejo ou fatores associados ao meio. Conforme AGUIAR (1996), este é o estágio onde é mais fácil recuperar a pastagem, pois problemas como a invasão por plantas daninhas ainda não comprometem os resultados e a recuperação do vigor e da produção é mais rápida.



FIGURA 07 - Aspecto visual da pastagem antes da instalação do experimento.

Imediatamente após a instalação do experimento, os tratamentos apresentavam aspectos visuais característicos, permitindo a identificação visual no campo, conforme demonstrado na Figura 08. É interessante destacar formação de uma pequena área superficial exposta nos tratamentos onde se efetuou a escarificação do solo, mantendo uma boa cobertura vegetal, que conforme LOMBARDI NETO (1993), apresenta aspectos interessantes no controle da erosão. Também, pode-se observar visualmente na Figura 07 que no tratamento escarificação mais calagem, o calcário que foi distribuído na linha de escarificação foi quase que totalmente incorporado.



Testemunha



Calagem



Escarificação



Escarificação+Calagem

FIGURA 08 - Aspecto visual dos tratamentos após a instalação do experimento.

Após 60 dias da implantação do experimento, visualmente verificou-se uma recuperação da pastagem, que ocorre naturalmente nesta época do ano, em função da estacionalidade da produção, entretanto, não detectou-se diferenças visuais na disponibilidade de forragem em função dos tratamentos aplicados no período avaliado. Tal fato pode ter sido influenciado pelas condições climáticas observadas no período. O aspecto visual da pastagem para os diferentes tratamentos, aos 60 dias após a escarificação, pode ser visualizado na Figura 9.



Testemunha



Calagem



Escarificação



Escarificação+Calagem

FIGURA 09 - Aspecto visual dos tratamentos 60 dias após a instalação do experimento.

Os valores de precipitação pluviométrica e temperaturas máxima e mínima, obtidos junto à estação meteorológica de Nova Odessa, pertencente à rede do Instituto Agrônomo de Campinas estão apresentados na Figura 06, sendo a precipitação pluviométrica total semanal e as médias das temperaturas máxima e mínima. Comparando-se os dados observados, com os dados históricos apresentados por MIRANDA et al. (2006), pode-se observar que o mês de novembro apresentou uma baixa precipitação pluviométrica, com uma lâmina equivalente a 46,5 mm, enquanto historicamente a precipitação média para o mês é de 147,1 mm. Para o mês de dezembro, o observado também foi inferior a média histórica, sendo 146,9 mm contra os 206,3 mm historicamente registrados. É interessante ressaltar que, na primeira semana de janeiro ocorreu o inverso, quando a precipitação total foi de 163,2 mm em apenas uma semana.

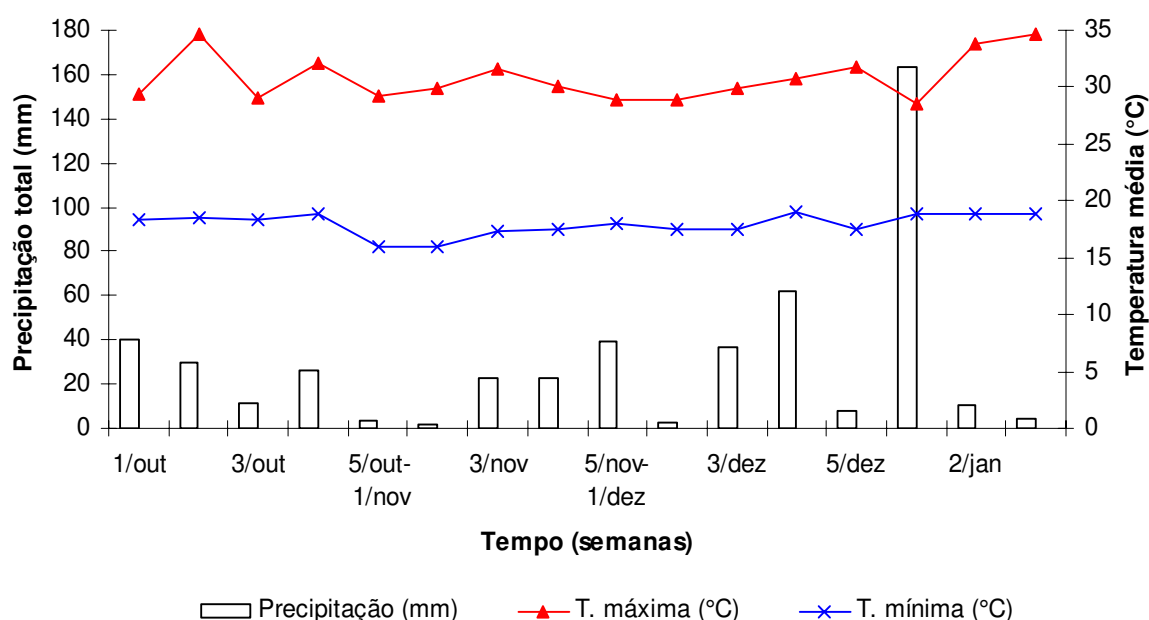


FIGURA 10 - Precipitação pluviométrica total semanal e médias semanais das temperaturas máximas e mínimas conforme estação meteorológica de Nova Odessa - SP.

Em relação aos dados de temperatura apresentados na Figura 06, pode-se dizer que os mesmos são muito semelhantes aos históricos apresentados por MIRANDA et al. (2006), com exceção das duas primeiras semanas de janeiro, onde a temperatura média máxima ficou próxima dos 35°C, quando o histórico para o período é de 30°C. Deste modo, pode-se dizer

que o período decorrido desde a implantação do experimento (5/11/2006), até a data das avaliações (60 dias após) apresentou temperaturas normais para a região, porém a precipitação pluviométrica foi relativamente baixa. Cabe ressaltar que o maior déficit hídrico foi logo após a instalação do experimento, durante o mês de novembro.

Avaliando-se os resultados da análise química do solo estudado, demonstrados na Tabela 01, observa-se elevada acidez, pelo valor de pH e principalmente pela baixa saturação por bases (V%) apresentada. TOWNSEND et al. (2002) comentam os efeitos positivos da calagem para *Brachiarias*, elevando a saturação por bases para até 40%. Em experimento avaliando a produção de matéria seca de *Brachiaria decumbens* em São Pedro – SP, para diferentes níveis de saturação por bases, OLIVEIRA et al. (2003) observaram as maiores produções para o nível de V%=60%. Para forrageiras do gênero das *Brachiarias*, RAIJ et al. (1996) citam que valores de pH até 4,3 e V% até 25%, classificam a acidez do solo como muito alta e a saturação por bases como muito baixa. Os mesmos recomendam a calagem para elevação da saturação por bases para 40%. Desta forma, considerando um calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) igual a 100, observa-se uma recomendação de aplicação de 1,2 toneladas do corretivo por hectare.

TABELA 01 - Análise química de solo de rotina para a área experimental.

pH (CaCl ₂)	H + Al	Al	Ca	Mg	K	CTC	P (Resina)	M.O.	V
			mmol _c m ⁻³				mg m ⁻³	g m ⁻³	%
4,2	42,0	0,0	6,0	2,0	0,8	50,8	2,0	27	17

Cabe ressaltar o baixo valor observado para o fósforo, demonstrado na Tabela 01. RAIJ et al. (1996) classificam teores de fósforo extraído por resina entre 0 e 5 mg dm⁻³ como muito baixos. ANDRADE et al. (1985) comentam que o fósforo é o nutriente que mais limita a produção de gramíneas forrageiras para a região sudeste do Brasil. PRIMAVESI (1999) comenta que a acidificação dos solos reduz a disponibilidade do fósforo, entretanto, para o autor a calagem por si só não libera o mesmo para as plantas, mas aumenta a eficiência de uma adubação fosfatada.

O teor de potássio no solo é classificado por RAIJ et al. (1996) como baixo, quando se encontra entre 0,8 e 1,5 mmol_c dm⁻³. ANDRADE et al. (1985), discutindo os principais problemas nutricionais para pastagens na região Sudeste do Brasil, citam vários autores que relacionaram a deficiência dos principais macronutrientes com a produção das pastagens, entretanto, as deficiências de K não são citadas como as principais causas de redução na produção.

Em relação aos teores de cálcio e magnésio, RAIJ et al. (1996) classificam os teores entre 4 e 7 mmol_c.dm⁻³ para o cálcio e 0 e 4 mmol_c dm⁻³ para o magnésio com médio e baixo, respectivamente. RAIJ (1991) comenta que os teores dos mesmos nutrientes podem ser elevados ao efetuar-se uma calagem e que, no caso de maior deficiência de magnésio, deve-se empregar calcário dolomítico.

O teor de matéria orgânica do solo, para RAIJ et al. (1996), não é um índice adequado para estimativa de adubações nitrogenadas para os solos do estado de São Paulo. Entretanto, KIEHL (1979) e JORGE (1985) comentam que a matéria orgânica é um dos principais agentes cimentantes para solos tropicais. A partir da classificação dos teores proposta pela COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (1999), o teor de matéria orgânica apresentado na Tabela 01 pode ser considerado como baixo. Assim, o aumento na produção de biomassa pela recuperação da pastagem poderá influenciar positivamente o estado de agregação do solo da respectiva área.

A partir dos resultados da análise granulométrica, demonstrados na Tabela 02, visualiza-se uma considerável homogeneidade para a área, tanto para uma mesma profundidade, como entre as 3 camadas analisadas. Comparando-se os dados de granulometria, apresentados na Tabela 02, com o triângulo de classificação textural adotado pela EMBRAPA (1999), as três camadas de solo analisadas (0-100 mm, 100-200 mm e 200-300 mm) são definidas como de textura média.

Pode-se observar que tanto os dados da análise química (Tabela 01), como também os dados da análise granulométrica (Tabela 02), corroboram com EMBRAPA (1999), que descreve os LATOSSOLOS como solos bastante intemperizados e homogêneos no seu perfil,

de baixa fertilidade natural, representada pelos baixos valores de saturação por bases e baixos teores de fósforo.

TABELA 02 - Estatística descritiva da análise granulométrica do solo da área experimental.

Prof. [mm]	Fração granulométrica	Média [g kg⁻¹]	Mediana (g kg⁻¹)	Máx. [g kg⁻¹]	Mín. [g kg⁻¹]	Amplitude [g kg⁻¹]	Desvio Padrão [g kg⁻¹]	CV [%]
0-100	Areia Fina	181	181	204	165	39	9,81	5,42
	Areia Grossa	442	438	476	422	54	16,37	3,7
	Areia Total	623	623	655	591	64	17,6	2,82
	Argila	238	243	290	190	100	29,87	12,58
	Silte	139	137	173	114	59	17,56	12,62
100-200	Areia Fina	180	181	202	152	50	11,6	6,46
	Areia Grossa	439	434	469	398	71	18,1	4,13
	Areia Total	618	619	642	576	66	15,7	2,54
	Argila	243	246	299	195	103	30,06	12,35
	Silte	138	136	175	109	66	18,24	13,19
200-300	Areia Fina	167	167	205	137	68	14,99	8,98
	Areia Grossa	432	430	478	382	96	21,27	4,92
	Areia Total	599	602	635	558	77	18,3	3,06
	Argila	258	254	318	217	101	29,74	11,51
	Silte	143	138	179	110	68	20,05	14,04

Apesar de se tratar de um experimento fatorial, onde estão sendo avaliados os efeitos da escarificação e da calagem, os efeitos da calagem foram desconsiderados para este trabalho, por não apresentarem resultados estatisticamente significativos no período avaliado. As análises considerando o fator calagem estão apresentadas em anexo. Esta decisão foi tomada com base nas recomendações de MONTGOMERY (2001), sugerindo que um fator controlado, ao não apresentar efeito significativo, pode ser desconsiderado na análise, reduzindo a probabilidade de ocorrência de um erro do tipo I (rejeitar uma hipótese verdadeira) ao testar o efeito da escarificação. Desta forma, obteve-se 12 repetições para cada tratamento (“Escarificado” e “Não-Escarificado”). As análises de variância considerando o fator calagem estão apresentadas no Anexo 1.

Os dados referentes à porosidade do solo (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) e à densidade do solo foram submetidos à análise de variância, para cada profundidade amostrada. As análises de variância para a profundidade de 0-100 mm estão demonstradas nas Tabelas 03, 04, 05 e 06.

TABELA 03 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,0108588	1	0,0108588	19,66	0,0002
Resíduo	0,0121494	22	0,005522		
Total	0,0230081	23			

CV = 16,67%

Como era esperado, a escarificação, provocou aumento da macroporosidade ($P < 0,01$) como pode se observar na Tabela 03. Este efeito é benéfico para a pastagem, pois, uma das vantagens principais é proporcionar melhores condições de infiltração de água.

TABELA 04 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,0005097	1	0,0005097	1,98	0,1735
Resíduo	0,005667	22	0,0002575		
Total	0,006176	23			

CV = 5,45%

Também, a escarificação não provocou pulverização do solo, mantendo a microporosidade sem alterações ($P > 0,05$), como demonstra a análise mostrada na Tabela 04.

TABELA 05 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,006663	1	0,006663	26,33	0,0000
Resíduo	0,005568	22	0,0002531		
Total	0,01223	23			

CV = 4,43%

Avaliando-se a porosidade total se pode observar que ocorreu um aumento na porosidade total ($P<0,01$), onde a análise estatística está demonstrada na Tabela 05.

TABELA 06 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	100721,0	1	100721,0	62,17	0,0000
Resíduo	35642,2	22	1620,1		
Total	136363,0	23			

CV = 2,68%

Após a análise de variância, as médias dos valores observados para o efeito da escarificação foram comparadas pelo teste de Tukey, conforme recomendado por BANZATO & KRONKA (1989). Os resultados da comparação de médias para a profundidade de 0-100 mm estão demonstrados na Tabela 07.

Para a variável macroporosidade, a Tabela 03 demonstra que a diferença apresentada entre os tratamentos é altamente significativa ($P<0,01$), o que foi confirmado pelo teste de médias (Tabela 07). Analisando as médias, visualiza-se o efeito positivo da escarificação do solo, com aumento da macroporosidade.

Para a microporosidade, não se observou diferença estatística entre os tratamentos ($P>0,05$), conforme demonstrado nas Tabelas 04 e 07. Este resultado já era esperado e corrobora com os obtidos por diversos autores, como RICHARD et al. (1999), LIPIEC et al. (2003), TARAWALLY et al. (2004) e TORMENA et al. (2004), que comentam que a compactação do solo, bem como as práticas de manejo pouco ou nada afetam a microporosidade dos solos.

Para a porosidade total, também se observou diferença estatística altamente significativa ($P<0,01$) entre os tratamentos (Tabelas 05 e 07). Sendo esta o somatório entre a macroporosidade e a microporosidade, pode-se afirmar que a alteração sofrida foi consequência da alteração na macroporosidade do solo, visto que a microporosidade não foi afetada pela escarificação.

A densidade do solo também apresentou diferença estatística altamente significativa ($P < 0,01$) (Tabelas 06 e 07), sendo menor para o tratamento onde efetuou-se a escarificação. Este resultado também comprova o efeito benéfico da escarificação do solo para melhoria de suas condições físicas. Tal resultado comprova o comentado por CARDOSO JÚNIOR et al. (2002), em relação à importância da mobilização do solo, visando melhorar suas condições físicas. Resultado semelhante foi verificado por TORMENA et al. (2002), após escarificação em área de agricultura.

A redução nos valores de densidade do solo, bem como o aumento na porosidade total corroboram com o observado por AL-ADAWI & REEDER (1996), avaliando o efeito da escarificação do solo em suas propriedades físicas em uma área de agricultura.

TABELA 07 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo para as variáveis macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade 0-100 mm.

Variável	Tratamento	
	Escarificado	Não Escarificado
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,084 A	0,043 B
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,289 A	0,299 A
Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,375 A	0,342 B
Densidade do solo (kg m^{-3})	1439,84 B	1569,40 A

Letras iguais indicam não haver diferença estatística significativa entre os tratamentos.

Para a profundidade de 100-200 mm, não se observou diferença estatística para nenhuma das variáveis ($P > 0,05$) (macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo), como demonstram as análises de variância, apresentadas nas Tabelas 08, 09, 10 e 11.

TABELA 08 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,0004242	1	0,0004242	2,03	0,1685
Resíduo	0,004603	22	0,0002092		
Total	0,005027	23			

CV = 10,95%

TABELA 09 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,0001302	1	0,0001302	0,26	0,6146
Resíduo	0,01098	22	0,0004991		
Total	0,01111	23			

CV = 7,65%

TABELA 10 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,001024	1	0,001024	2,82	0,1072
Resíduo	0,007992	22	0,0003632		
Total	0,009016	23			

CV = 5,83%

TABELA 11 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	2173,99	1	2173,99	0,88	0,3575
Resíduo	54144,7	22	2461,12		
Total	56318,7	23			

CV = 3,17%

As médias observadas para as variáveis amostradas na profundidade de 100-200 mm estão demonstradas na Tabela 12. Pode-se visualizar que os valores observados entre os tratamentos são muito semelhantes para todas as variáveis, comprovando que no período decorrido entre a instalação do experimento e a avaliação (60 dias), a escarificação do solo não teve efeito na sua composição volumétrica.

TABELA 12 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo para as variáveis macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade 100-200 mm.

Variável	Tratamento	
	Escarificado	Não Escarificado
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,031 A	0,039 A
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,289 A	0,294 A
Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,320 A	0,333 A
Densidade do solo (kg m^{-3})	1629,10 A	1610,06 A

Letras iguais indicam não haver diferença estatística significativa entre os tratamentos.

Para a profundidade de 200-300 mm, observou-se diferença estatística significativa na macroporosidade do solo ($P < 0,05$), conforme demonstrado na Tabela 13. Para as demais variáveis, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, as análises de variância demonstradas nas Tabelas 14, 15 e 16 comprovam que as diferenças observadas não foram estatisticamente significativas ($P > 0,05$).

Para a profundidade de 200-300 mm, observou-se diferença estatística significativa na macroporosidade do solo ($P < 0,05$), conforme demonstrado na Tabela 13. Para as demais variáveis, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, as análises de variância demonstradas nas Tabelas 14, 15 e 16 comprovam que as diferenças observadas não foram estatisticamente significativas ($P > 0,05$).

TABELA 13 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,001926	1	0,001926	7,83	0,0105
Resíduo	0,005413	22	0,0002461		
Total	0,007339	23			

CV = 14,27%

TABELA 14 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,00003901	1	0,00003901	0,19	0,6666
Resíduo	0,004499	22	0,0002045		
Total	0,004540	23			

CV = 4,93%

TABELA 15 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	0,001417	1	0,0014171	3,49	0,0751
Resíduo	0,008933	22	0,0004061		
Total	0,0103,501	23			

CV = 6,31%

TABELA 16 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	7417,35	1	7417,35	4,12	0,0546
Resíduo	39574,4	22	1798,83		
Total	46991,7	23			

CV = 2,60%

Comparando as médias apresentadas na Tabela 17, verifica-se valores muito próximos entre os tratamentos, para as variáveis estudadas, onde apenas as médias da macroporosidade apresentam diferença estatística significativa ($P < 0,05$). Neste caso, ao contrário da profundidade de 0-100 mm, a macroporosidade diminuiu para o tratamento escarificado.

TABELA 17 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo para as variáveis macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, na profundidade 200-300 mm.

Variável	Tratamento	
	Escarificado	Não Escarificado
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,0200 B	0,038 A
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,290 A	0,288 A
Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,310 A	0,326 B
Densidade do solo (kg m^{-3})	1439,84 A	1569,40 A

Letras iguais indicam não haver diferença estatística significativa entre os tratamentos.

Nestas análises é importante salientar que a retirada de amostras foram efetuadas nas entrelinhas, pois o tempo entre a escarificação e a retirada de amostras foi muito pequeno (60 dias). Por outro lado, também era necessário avaliar o comportamento das propriedades físicas do solo nestas regiões. Também, se pode manter a hipótese de que as hastes impuseram uma pequena compactação sub-superficial do solo, pelo uso de ponteiros aladas, ainda que elas produzam uma maior área de distúrbio do solo (SANTOS, 1994).

O solo ideal para o desenvolvimento das espécies vegetais, conforme KIEHL (1979), é aquele que apresenta 1/3 de macroporos e 2/3 de microporos. Considerando os dados de porosidade apresentados, visualiza-se que a proporção de macroporos está abaixo desta relação para todas as profundidades amostradas, ficando um pouco mais próxima apenas para o tratamento escarificado, na profundidade de 0-100 mm.

O aumento da macroporosidade e redução da densidade do solo em função da escarificação, apenas na profundidade de 0-100 mm pode estar relacionado com sua maior interação com as condições atmosféricas, certamente ocorrendo uma intensidade maior de ciclos de molhamento e secamento do solo. Utilizando tomografia computadorizada de raios gama para avaliar as mudanças na estrutura do solo pelo molhamento e secamento, após 0, 3 e 9 ciclos, PIRES et al. (2005) verificaram incrementos significativos para a porosidade do solo com o aumento do número de ciclos de molhamento e secamento, para 3 tipos de solo avaliados. Desta forma, considerando-se a menor interação com a atmosfera na profundidade

de 100-200 mm, é possível inferir que o efeito da escarificação do solo possa ser observado em avaliação após um período decorrido da escarificação, permitindo que o movimento de água do solo desempenhe seu papel, auxiliando na reestruturação do mesmo.

Outra hipótese para os melhores resultados em relação à porosidade e densidade do solo na profundidade de 0-100 mm em relação a profundidade de 100-200 mm que além do efeito mecânico pode estar associado o efeito da matéria orgânica do solo. MULLER et al. (2001) verificaram que, principalmente em pastagens que apresentam problemas de degradação física, o sistema radicular concentra-se próximo à superfície do solo. HOLTZ & SÁ (1995) descrevem a ecofisiologia da rizosfera e suas interações com o meio, liberando compostos orgânicos para o solo, que podem estar agindo na sua estrutura, além de proporcionar nichos para microorganismos.

Neste contexto, vários autores, como KIEHL (1979), JORGE (1985), EKWUE & STONE (1996) e BALESDENT et al. (2000) afirmam que os compostos orgânicos atuam na estrutura do solo, como agentes cimentantes. Assim, considerando que apesar de se tratar de um solo de textura média, o teor de areia do solo da área experimental é bastante elevado, comparada com o de argila, podendo-se considerar então que a presença de matéria orgânica é fundamental para que o solo assuma uma estrutura, fator essencial para a definição de uma porosidade.

Além da avaliação da porosidade e densidade foram feitas avaliações da resistência do solo à penetração. Durante estas, também se amostrou o solo para caracterização do seu conteúdo de água, como variável de controle. A Tabela 18 apresenta a análise descritiva do conteúdo de água do solo no momento da avaliação inicial da resistência do solo à penetração. Como a avaliação inicial e a instalação do experimento foram feitos no mesmo dia, os dados apresentados na Tabela 18 também referem-se ao conteúdo de água no momento da escarificação do solo.

TABELA 18 - Conteúdo de água do solo (g g^{-1}) no momento da avaliação inicial da resistência do solo à penetração e da implantação do experimento.

Prof. (mm)	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Máximo	Mínimo	Amplitude
0-100	0,124	0,013	10,62	0,145	0,101	0,044
100-200	0,126	0,011	8,51	0,145	0,111	0,033
200-300	0,135	0,009	6,70	0,152	0,123	0,029

Conforme análise multivariada da avaliação da resistência do solo à penetração anterior à implantação do experimento, Tabela 19, identificaram-se cinco camadas. Destas, as quatro primeiras, representadas pelos fatores 1, 2, 3 e 4, possuem variâncias relativas semelhantes, indicando um mesmo grau de importância estatística e neste caso importância quanto ao fenômeno resistência do solo à penetração. A quinta camada, conforme fator 5, tem variância relativa baixa, este fato pode ser explicado pois a camada superficial (0 – 2 cm) representada por este fator é a que mais sofre transformações. Neste caso pode-se considerar também as limitações do penetrômetro, pois existe uma correlação entre a profundidade de leitura do penetrômetro e a altura do cone.

TABELA 19 - Análise multivariada para determinação de camadas do solo conforme resistência à penetração.

Prof.(mm)	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Comunalidade
0-5	0,003	0,215	0,040	0,020	0,888	0,837
5-10	0,003	0,300	0,043	0,019	0,898	0,899
10-15	0,008	0,429	0,039	0,019	0,874	0,949
15-20	0,032	0,592	0,022	0,012	0,781	0,963
20-25	0,064	0,721	0,001	-0,011	0,630	0,921
25-30	0,092	0,795	-0,017	-0,040	0,496	0,888
30-35	0,122	0,835	-0,033	-0,068	0,411	0,886
35-40	0,149	0,863	-0,057	-0,095	0,345	0,899
40-45	0,171	0,882	-0,090	-0,111	0,296	0,914
45-50	0,196	0,894	-0,114	-0,123	0,252	0,929
50-55	0,222	0,903	-0,138	-0,133	0,197	0,940
55-60	0,255	0,905	-0,156	-0,137	0,144	0,947
60-65	0,291	0,894	-0,171	-0,132	0,092	0,939
65-70	0,336	0,876	-0,178	-0,121	0,039	0,928
70-75	0,398	0,847	-0,170	-0,117	-0,004	0,919
75-80	0,456	0,816	-0,173	-0,122	-0,026	0,919
80-85	0,525	0,773	-0,167	-0,130	-0,029	0,919
85-90	0,591	0,723	-0,159	-0,140	-0,029	0,918
90-95	0,657	0,660	-0,146	-0,150	-0,029	0,912
95-100	0,719	0,591	-0,145	-0,149	-0,027	0,910
100-105	0,764	0,533	-0,148	-0,146	-0,028	0,912
105-110	0,798	0,483	-0,154	-0,146	-0,020	0,915
110-115	0,829	0,430	-0,167	-0,149	-0,012	0,922
115-120	0,855	0,385	-0,185	-0,150	-0,004	0,937
120-125	0,876	0,337	-0,215	-0,153	0,004	0,951
125-130	0,882	0,294	-0,257	-0,157	0,008	0,954
130-135	0,880	0,257	-0,294	-0,164	0,023	0,954
135-140	0,869	0,220	-0,334	-0,179	0,036	0,949
140-145	0,848	0,192	-0,384	-0,193	0,049	0,943
145-150	0,822	0,162	-0,432	-0,202	0,059	0,933
150-155	0,787	0,143	-0,485	-0,209	0,069	0,923
155-160	0,746	0,131	-0,540	-0,213	0,079	0,918
160-165	0,702	0,114	-0,603	-0,214	0,080	0,921
165-170	0,646	0,097	-0,669	-0,195	0,067	0,918
170-175	0,583	0,091	-0,729	-0,193	0,047	0,920
175-180	0,516	0,096	-0,778	-0,195	0,028	0,920
180-185	0,461	0,103	-0,811	-0,207	0,012	0,924
185-190	0,412	0,110	-0,837	-0,232	-0,006	0,936
190-195	0,368	0,127	-0,852	-0,265	-0,017	0,947
195-200	0,327	0,139	-0,861	-0,300	-0,027	0,958
200-205	0,291	0,150	-0,859	-0,340	-0,036	0,961
205-210	0,258	0,156	-0,847	-0,385	-0,042	0,959
210-215	0,220	0,153	-0,826	-0,439	-0,040	0,948
215-220	0,193	0,152	-0,804	-0,484	-0,037	0,942
220-225	0,170	0,142	-0,777	-0,527	-0,043	0,932
225-230	0,150	0,134	-0,736	-0,580	-0,047	0,921
230-235	0,139	0,131	-0,689	-0,635	-0,045	0,916
235-240	0,130	0,127	-0,639	-0,686	-0,051	0,915
240-245	0,129	0,129	-0,583	-0,735	-0,050	0,917
245-250	0,118	0,127	-0,528	-0,780	-0,045	0,919
250-255	0,119	0,126	-0,468	-0,820	-0,038	0,923
255-260	0,126	0,128	-0,410	-0,855	-0,034	0,933
260-265	0,143	0,115	-0,364	-0,884	-0,024	0,948
265-270	0,162	0,113	-0,315	-0,907	-0,005	0,960
270-275	0,170	0,102	-0,275	-0,925	0,007	0,971
275-280	0,171	0,093	-0,226	-0,936	0,017	0,966
280-285	0,168	0,096	-0,179	-0,936	0,025	0,946
285-290	0,168	0,087	-0,139	-0,928	0,031	0,917
290-295	0,172	0,084	-0,108	-0,914	0,041	0,885
295-300	0,171	0,071	-0,092	-0,904	0,047	0,862
Variância	13,403	12,997	12,588	12,455	4,187	55,631
% Var.	0,223	0,217	0,21	0,208	0,07	0,927

Para a avaliação da resistência do solo à penetração aos 60 dias após a instalação do experimento, também se efetuou amostragem para determinação do conteúdo de água do solo, conforme apresentado na Tabela 20. Os dados apresentados na Tabela 20 também foram submetidos à análise de variância e teste de médias (Tukey, $P < 0,05$), comparando profundidades correspondentes para os dois tratamentos. Como demonstrado, não observou-se diferenças estatisticamente significativas, permitindo assim a comparação dos valores de resistência do solo à penetração entre os tratamentos.

TABELA 20 - Conteúdo de água do solo (g g^{-1}) no momento da avaliação da resistência do solo à penetração 60 dias após a implantação do experimento.

Tratamento	Prof. (mm)	Média	D. Padrão	CV (%)	Máximo	Mínimo	Amplitude
Não Escarificado	0-100	0,122 a	0,024	19,56	0,148	0,096	0,052
	100-200	0,137 a	0,015	11,23	0,157	0,118	0,039
	200-300	0,143 a	0,014	9,77	0,161	0,125	0,036
Escarificado	0-100	0,125 a	0,021	16,60	0,156	0,100	0,056
	100-200	0,147 a	0,019	12,69	0,177	0,126	0,052
	200-300	0,146 a	0,018	12,51	0,177	0,124	0,053

Letras iguais indicam não haver diferença estatística significativa entre as médias para os tratamentos, comparando mesmas profundidades.

No caso da análise com os valores da resistência do solo à penetração nas áreas não escarificadas após a implantação do experimento, conforme Tabela 21, embora possa parecer uma inversão de importância das camadas, quando da observação das variâncias relativas dos fatores 1, 2, 3 e 4, mostram-se, também, muito semelhantes. Esta análise permite concluir que as Tabelas 20 e 21 relatam fenômenos semelhantes ou o mesmo fenômeno, pois talvez erros antrópicos ou diferenças nas condições edafoclimáticas temporais e espaciais sejam superiores as diferenças encontradas entre as variâncias relativas apresentadas nas duas Tabelas.

Nas áreas onde se utilizou o escarificador a análise multivariada, conforme Tabela 22, indica um novo arranjo, onde existem três camadas, fatores 1, 2 e 3, com um mesmo nível de importância, caracterizada pelas variância relativas.

A transformação se deu no intervalo de profundidade aproximada de 18 a 26 cm camada denominada limite de trabalho da haste do escarificador e local da presença de ondulações onde não houve modificações pelo ângulo lateral de ação das hastes. Talvez fosse esperado que as camadas superficiais à profundidade de trabalho (aproximadamente 25 cm) também sofressem mudanças, porém isso não foi observado. Isso pode caracterizar um trabalho eficiente do escarificador, onde houve desestruturação do solo, explicado pelas Figuras 11 e 12 (figuras das médias da resistência do solo à penetração, nas áreas com e sem a passada do escarificador), porém sem inversão das mesmas, corroborando com o comentado por MAZUCHOWSKI & DERPSH (1984). Este tipo de trabalho é interessante, pois, mantém uma estrutura biológica e química do solo. No aspecto biológico este fato é muito importante, não há perda de carbono para atmosfera, carbono este catalisador do efeito estufa e melhorador das características químicas e físicas quando no solo.

TABELA 21 - Camadas do solo conforme resistência à penetração - janeiro não escarificado.

Prof.(mm)	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Comunalidade
0-5	-0.182	-0.050	-0.198	0.137	-0.877	0.863
5-10	-0.135	-0.061	-0.308	0.121	-0.881	0.908
10-15	-0.076	-0.060	-0.442	0.097	-0.856	0.947
15-20	-0.013	-0.071	-0.593	0.059	-0.778	0.966
20-25	0.030	-0.073	-0.732	0.034	-0.641	0.955
25-30	0.052	-0.057	-0.823	0.011	-0.501	0.935
30-35	0.053	-0.036	-0.882	-0.023	-0.379	0.926
35-40	0.048	-0.014	-0.917	-0.052	-0.288	0.929
40-45	0.043	0.011	-0.934	-0.098	-0.230	0.937
45-50	0.038	0.042	-0.941	-0.158	-0.183	0.948
50-55	0.031	0.066	-0.937	-0.225	-0.143	0.955
55-60	0.044	0.088	-0.923	-0.291	-0.103	0.958
60-65	0.062	0.093	-0.904	-0.355	-0.053	0.959
65-70	0.086	0.095	-0.875	-0.419	-0.013	0.959
70-75	0.111	0.105	-0.835	-0.479	0.032	0.951
75-80	0.130	0.119	-0.788	-0.541	0.064	0.948
80-85	0.136	0.135	-0.737	-0.598	0.085	0.945
85-90	0.147	0.147	-0.672	-0.659	0.100	0.939
90-95	0.158	0.154	-0.615	-0.707	0.104	0.937
95-100	0.173	0.158	-0.549	-0.756	0.108	0.940
100-105	0.196	0.164	-0.478	-0.801	0.102	0.945
105-110	0.211	0.172	-0.417	-0.831	0.105	0.950
110-115	0.239	0.185	-0.360	-0.847	0.110	0.952
115-120	0.272	0.203	-0.314	-0.853	0.105	0.953
120-125	0.317	0.226	-0.266	-0.853	0.090	0.958
125-130	0.377	0.236	-0.213	-0.843	0.068	0.958
130-135	0.426	0.249	-0.179	-0.823	0.042	0.954
135-140	0.481	0.253	-0.142	-0.799	0.017	0.953
140-145	0.535	0.260	-0.106	-0.765	-0.005	0.950
145-150	0.577	0.260	-0.085	-0.731	-0.020	0.942
150-155	0.619	0.256	-0.061	-0.692	-0.043	0.932
155-160	0.666	0.257	-0.058	-0.643	-0.045	0.928
160-165	0.712	0.250	-0.061	-0.599	-0.031	0.932
165-170	0.759	0.245	-0.054	-0.544	-0.029	0.937
170-175	0.792	0.250	-0.056	-0.494	-0.025	0.938
175-180	0.832	0.257	-0.050	-0.424	-0.013	0.941
180-185	0.857	0.283	-0.060	-0.361	0.008	0.949
185-190	0.873	0.300	-0.063	-0.311	0.037	0.955
190-195	0.876	0.327	-0.058	-0.276	0.051	0.956
195-200	0.870	0.355	-0.071	-0.253	0.060	0.955
200-205	0.856	0.385	-0.073	-0.238	0.079	0.948
205-210	0.833	0.430	-0.084	-0.208	0.106	0.940
210-215	0.809	0.477	-0.089	-0.187	0.122	0.940
215-220	0.779	0.534	-0.091	-0.150	0.131	0.940
220-225	0.742	0.580	-0.100	-0.131	0.136	0.932
225-230	0.704	0.620	-0.102	-0.121	0.138	0.925
230-235	0.659	0.642	-0.101	-0.116	0.140	0.912
235-240	0.610	0.697	-0.094	-0.124	0.135	0.900
240-245	0.548	0.739	-0.079	-0.121	0.137	0.885
245-250	0.487	0.778	-0.069	-0.122	0.134	0.880
250-255	0.400	0.847	-0.084	-0.143	0.120	0.920
255-260	0.353	0.876	-0.078	-0.148	0.113	0.932
260-265	0.331	0.896	-0.063	-0.168	0.085	0.952
265-270	0.300	0.914	-0.052	-0.176	0.042	0.961
270-275	0.269	0.922	-0.055	-0.196	0.003	0.964
275-280	0.253	0.918	-0.045	-0.202	-0.019	0.951
280-285	0.226	0.915	-0.032	-0.201	-0.040	0.932
285-290	0.203	0.904	-0.011	-0.211	-0.059	0.907
290-295	0.187	0.893	0.010	-0.204	-0.063	0.878
295-300	0.187	0.877	0.017	-0.198	-0.051	0.846
Variância	13.805	13.131	12.536	12.49	4.223	56.186
% Var.	0.23	0.219	0.209	0.208	0.07	0.936

TABELA 22 - Camadas do solo conforme resistência à penetração 60 dias após escarificação.

Prof.(mm)	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Comunalidade
0-5	0,124	-0,153	0,036	-0,014	-0,761	0,719
5-10	0,067	-0,060	0,029	-0,013	-0,886	0,824
10-15	-0,014	0,066	0,020	-0,002	-0,953	0,913
15-20	-0,094	0,207	0,006	0,014	-0,951	0,955
20-25	-0,175	0,334	0,000	0,027	-0,892	0,938
25-30	-0,226	0,435	0,002	0,034	-0,821	0,916
30-35	-0,239	0,525	0,006	0,039	-0,762	0,915
35-40	-0,212	0,617	0,012	0,037	-0,699	0,915
40-45	-0,168	0,701	0,017	0,028	-0,628	0,915
45-50	-0,112	0,773	0,013	0,022	-0,551	0,914
50-55	-0,040	0,826	-0,002	0,016	-0,481	0,916
55-60	0,032	0,870	-0,013	0,020	-0,400	0,919
60-65	0,116	0,901	-0,015	0,027	-0,309	0,922
65-70	0,201	0,917	-0,019	0,020	-0,220	0,930
70-75	0,281	0,917	-0,016	0,008	-0,128	0,937
75-80	0,349	0,899	-0,028	0,002	-0,040	0,931
80-85	0,395	0,878	-0,047	0,011	0,013	0,929
85-90	0,437	0,855	-0,057	0,028	0,052	0,928
90-95	0,487	0,823	-0,068	0,028	0,075	0,925
95-100	0,532	0,789	-0,070	0,037	0,079	0,917
100-105	0,583	0,743	-0,073	0,032	0,075	0,904
105-110	0,638	0,695	-0,071	0,021	0,079	0,902
110-115	0,711	0,630	-0,062	0,009	0,077	0,913
115-120	0,773	0,561	-0,049	-0,003	0,083	0,921
120-125	0,822	0,493	-0,034	0,001	0,092	0,929
125-130	0,865	0,408	-0,012	0,000	0,092	0,924
130-135	0,894	0,330	0,011	0,016	0,090	0,917
135-140	0,918	0,253	0,030	0,035	0,083	0,915
140-145	0,929	0,196	0,047	0,079	0,090	0,918
145-150	0,933	0,147	0,054	0,141	0,090	0,923
150-155	0,927	0,106	0,057	0,201	0,072	0,920
155-160	0,911	0,074	0,064	0,272	0,045	0,916
160-165	0,887	0,045	0,078	0,331	0,007	0,905
165-170	0,847	0,040	0,089	0,407	-0,022	0,893
170-175	0,800	0,041	0,108	0,485	-0,053	0,891
175-180	0,743	0,034	0,142	0,564	-0,059	0,894
180-185	0,665	0,018	0,170	0,651	-0,054	0,898
185-190	0,582	0,007	0,206	0,721	-0,049	0,904
190-195	0,499	0,013	0,238	0,772	-0,046	0,904
195-200	0,406	0,017	0,277	0,823	-0,040	0,920
200-205	0,314	0,020	0,324	0,854	-0,027	0,935
205-210	0,229	0,024	0,371	0,862	-0,007	0,933
210-215	0,160	0,038	0,437	0,840	0,009	0,924
215-220	0,111	0,036	0,491	0,814	0,024	0,918
220-225	0,061	0,036	0,557	0,772	0,013	0,911
225-230	0,027	0,041	0,593	0,733	0,017	0,891
230-235	0,008	0,037	0,639	0,681	0,015	0,874
235-240	0,017	0,021	0,688	0,620	0,018	0,859
240-245	0,029	0,006	0,730	0,568	0,021	0,857
245-250	0,041	-0,011	0,785	0,501	0,012	0,869
250-255	0,048	-0,023	0,824	0,434	0,004	0,871
255-260	0,054	-0,030	0,868	0,361	-0,025	0,889
260-265	0,060	-0,046	0,902	0,305	-0,045	0,914
265-270	0,067	-0,049	0,919	0,270	-0,054	0,928
270-275	0,058	-0,034	0,943	0,220	-0,052	0,945
275-280	0,040	-0,032	0,952	0,171	-0,045	0,940
280-285	0,019	-0,050	0,951	0,108	-0,030	0,919
285-290	0,013	-0,048	0,941	0,089	-0,009	0,896
290-295	0,013	-0,039	0,926	0,073	0,016	0,864
295-300	0,016	-0,038	0,892	0,068	0,035	0,802
Variância	13,826	12,101	11,998	9,188	7,092	54,205
% Var.	0,23	0,202	0,2	0,153	0,118	0,903

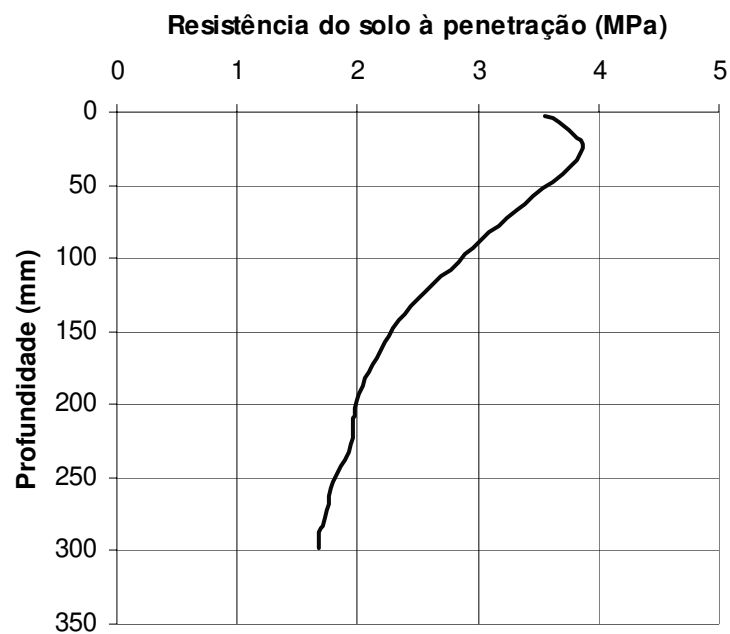


FIGURA 11 - Média da resistência do solo à penetração aos 60 dias após instalação do experimento nas parcelas não escarificadas.

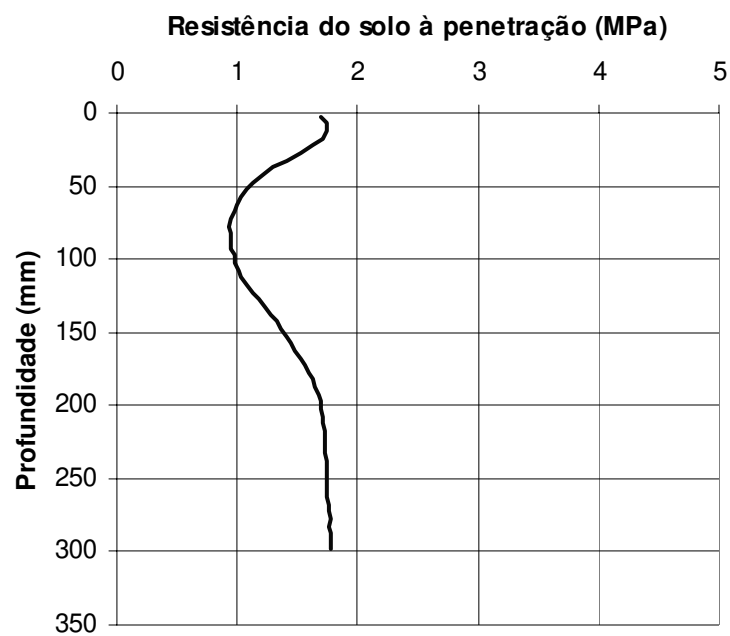


FIGURA 12 - Média da resistência do solo à penetração aos 60 dias após instalação do experimento nas parcelas escarificadas.

A partir das análises multivariadas apresentadas para a avaliação após a implantação do experimento, Tabelas 21 e 22, calculou-se então a média da resistência do solo à penetração, para obtenção de um valor representativo de cada camada. Os valores médios observados para o tratamento escarificado e o tratamento não escarificado estão apresentados na Tabela 23. Considerando que a avaliação da resistência do solo à penetração foi feita nas entrelinhas de onde passaram as hastes do escarificador, configura-se uma situação muito semelhante onde a escarificação foi feita com os locais onde não foi, caracterizada por uma camada identificada pela análise multivariada de mesma profundidade, entre os 235 e 300 mm, bem como valores médios muito semelhantes de resistência do solo à penetração.

TABELA 23 - Médias dos valores de resistência do solo à penetração para as camadas identificadas a partir da análise multivariada para a avaliação após a instalação do experimento.

Escarificado		Não Escarificado	
Camadas (mm)	Resistência do solo à penetração (MPa)	Camadas (mm)	Resistência do solo à penetração (MPa)
0-40	1,595	0-20	3,698
40-110	1,007	20-90	3,493
110-185	1,351	90-155	2,582
185-235	1,707	155-235	2,037
235-300	1,758	235-300	1,761

Comparando os valores médios de resistência do solo à penetração, apresentados na Tabela 23, com o valor de 2,0 MPa, apresentado por MEROTTO & MUNDSTOCK (1999) e o valor de 2,38 MPa para solos de textura média apresentados por BEUTLER & CENTURION (2004), evidencia-se o efeito benéfico da escarificação para solos sob pastagens, onde pode-se observar que além da redução considerável dos valores em relação à área não escarificada, estes ficam abaixo dos valores apresentados na literatura como restritivos ao crescimento do sistema radicular.

Para comparar estatisticamente as curvas de resistência do solo à penetração entre os tratamentos, propôs-se a análise da área sob a curva, obtida pela média da resistência à penetração para cada parcela, a partir das 12 medidas efetuadas, para cada 5 mm de

profundidade. A área sob a curva foi obtida pela soma dos produtos entre os valores de resistência do solo à penetração obtidos em kgf cm^{-2} e a variação de profundidade correspondente a 0,5 cm. Obteve-se então uma área sob a curva para cada parcela em cm kgf cm^{-2} , que permitiu a comparação da resistência a penetração para avaliação do efeito da escarificação, a partir de análise de variância e teste de médias. A soma foi calculada de forma a obter as áreas nos intervalos de profundidade de 0-100 mm, 100-200 mm, 200-300 mm e a área total, de 0-300 mm.

As Tabelas 24, 25, 26 e 27 apresentam a análise de variância para a área sob a curva de resistência do solo à penetração, para o efeito da escarificação do solo, para as profundidades de 0-100 mm, 100-200 mm, 200-300 mm e a área total, de 0-300 mm, respectivamente.

TABELA 24 - Análise de variância para o efeito da escarificação área sob a curva de resistência do solo à penetração, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	271597,0	1	271597,0	110,34	0,0000
Resíduo	54152,3	22	2461,47		
Total	325749,0	23			

CV = 11,26%

TABELA 25 - Análise de variância para o efeito da escarificação área sob a curva de resistência do solo à penetração, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	47027,1	1	47027,1	42,92	0,0000
Resíduo	24106,8	22	1095,77		
Total	71134,0	23			

CV = 8,01%

TABELA 26 - Análise de variância para o efeito da escarificação área sob a curva de resistência do solo à penetração, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	337,125	1	337,125	0,86	0,3648
Resíduo	8861,62	22	393,71		
Total	8998,74	23			

CV = 5,09%

TABELA 27 - Análise de variância para o efeito da escarificação na área total (0-300 mm) sob a curva de resistência do solo à penetração após 60 dias.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Tratamento	644287,0	1	644287,0	204,57	0,0000
Resíduo	66138,3	22	3149,44		
Total	710425,0	23			

CV = 9,17%

Sendo a diferença para a área sob a curva de resistência do solo à penetração entre os tratamentos altamente significativa ($P < 0,01$) para as profundidades de 0-100 mm, 100-200 mm e área total (0-300 mm), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 1% de probabilidade, conforme apresentado na Tabela 28.

TABELA 28 - Comparação das médias para o efeito da escarificação do solo na área sob a curva de resistência do solo à penetração (cm kg cm^{-2}).

Profundidade	Tratamento	
	Escarificado	Não Escarificado
0-100 mm	126,95 B	339,71 A
100-200 mm	139,52 B	228,05 A
200-300 mm	178,13 A	185,63 A
Total (0-300 mm)	444,60 B	779,66 A

Letras iguais indicam não haver diferença estatística significativa entre os tratamentos.

A partir dos valores de área sob a curva de resistência do solo à penetração apresentados na Tabela 28, os valores para a profundidade de 0-100 mm mostram-se diferentes estatisticamente, confirmando o efeito benéfico da escarificação nesta profundidade, anteriormente citados com base nos valores de macroporosidade, porosidade total e densidade do solo.

É interessante destacar a diferença altamente significativa apresentada na profundidade de 100-200 mm, para a qual os valores de densidade do solo, macroporosidade e porosidade total foram estatisticamente iguais. Este fato reafirma a hipótese levantada de que faz-se necessário um intervalo de tempo maior, conseqüentemente um maior número de ciclos

de molhamento e secagem para que o solo assuma uma melhor estrutura e os efeitos da escarificação apresentem resultados em sua composição volumétrica.

Outro fenômeno interessante apresentado nas Tabelas 26 e 28 é que a área sob a curva para a profundidade de 200-300 mm não apresentou diferenças estatisticamente significativas, ao contrário da macroporosidade para a mesma camada. Tal fato sugere que a diferença apresentada para a macroporosidade possa ser consequência de problemas metodológicos na determinação desta.

Considerando a diferença altamente significativa entre a área total sob a curva de resistência do solo à penetração, é possível inferir que a energia a ser utilizada pela planta para o crescimento do sistema radicular será muito menor no tratamento escarificado, em relação ao não escarificado, possibilitando que esse tenha então um desenvolvimento maior, a partir de uma mesma energia utilizada pela planta. LIPIEC & STEPNIEWSKI (1995) comentam a importância de um sistema radicular bem desenvolvido para que a planta tenha uma boa absorção de nutrientes. Diversos autores, como ARAÚJO (1978), RODRIGUES et al (1993) ZIMMER et al. (1998), comentam a diferença na produção de forragem durante o ano, em função da disponibilidade hídrica, sendo a adaptação à seca característica fundamental para as forrageiras utilizadas como pastagens em regiões tropicais, que apresentam normalmente um período chuvoso e um período de seca durante o ano.

Dentre as características que definem uma forrageira melhor adaptada às condições de stress hídrico, RODRIGUES et al. (1993) citam a importância de um sistema radicular bem desenvolvido. Desta forma, visualiza-se que, no tratamento onde efetuou-se a escarificação do solo, pela menor energia demandada para o crescimento radicular, este terá um melhor desenvolvimento e possivelmente propiciará maiores níveis de produção de forragem durante a estação das secas.

6. CONCLUSÕES

A escarificação do solo propiciou o aumento na macroporosidade e na porosidade total e, redução na densidade do solo nos 100 milímetros superficiais, quando observados na entrelinha da passagem do escarificador.

A escarificação do solo não afetou as propriedades macroporosidade, microporsidade e densidade do solo na profundidade de 100-200 milímetros, quando analisado nas entrelinhas da passagem das hastes do escarificador.

Para a condição deste experimento, a escarificação do solo provocou uma redução na macroporosidade na profundidade de 200-300 mm, porém a análise das áreas sob a curva de resistência do solo à penetração não confirmou a formação de uma camada compactada em função da escarificação.

A metodologia de análise da área sob a curva possibilitou comparar estatisticamente a resistência do solo à penetração.

A escarificação do solo reduziu os valores de resistência do solo a penetração, evidenciada de forma estatisticamente significativa ($P < 0,01$) quando comparados pela metodologia de análise da área sob a curva de resistência.

7. ANEXOS

7.1 Anexo 1: Análises de variância considerando o fator calagem

TABELA 29 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,0001820	1	0,0001820	0,32	0,5779
Escarificação	0,0108588	1	0,0108588	19,05	0,0003
Resíduo	0,0121494	21	0,0005698		
Total	0,0230081	23			

TABELA 30 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,0003067	1	0,0003067	1,20	0,2854
Escarificação	0,0005097	1	0,0005097	2,00	0,1723
Resíduo	0,005667	21	0,0002552		
Total	0,006176	23			

TABELA 31 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,00001584	1	0,00001584	0,06	0,8090
Escarificação	0,006663	1	0,006663	25,20	0,0001
Resíduo	0,005568	21	0,0002643		
Total	0,01223	23			

TABELA 32 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 0-100 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	364,3	1	364,3	0,22	0,6462
Escarificação	100721,0	1	100721,0	59,96	0,0000
Resíduo	35642,2	21	1679,9		
Total	136363,0	23			

TABELA 33 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,00005985	1	0,00005985	0,28	0,6044
Escarificação	0,0004242	1	0,0004242	1,96	0,1760
Resíduo	0,004603	21	0,0002164		
Total	0,005027	23			

TABELA 34 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,00000260	1	0,00000260	0,00	0,9444
Escarificação	0,0001302	1	0,0001302	0,25	0,6229
Resíduo	0,01098	21	0,0005227		
Total	0,01111	23			

TABELA 35 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,00003800	1	0,00003800	0,10	0,7546
Escarificação	0,001024	1	0,001024	2,70	0,1149
Resíduo	0,007992	21	0,0003787		
Total	0,009016	23			

TABELA 36 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 100-200 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	1466,41	1	1466,41	0,58	0,4530
Escarificação	2173,99	1	2173,99	0,87	0,3625
Resíduo	54144,7	21	2508,49		
Total	56318,7	23			

TABELA 37 - Análise de variância para o efeito da escarificação na macroporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,00000096	1	0,00000096	0,00	0,9519
Escarificação	0,001926	1	0,001926	7,47	0,0124
Resíduo	0,005413	21	0,0002577		
Total	0,007339	23			

TABELA 38 - Análise de variância para o efeito da escarificação na microporosidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	0,00002563	1	0,00002563	0,12	0,7322
Escarificação	0,00003901	1	0,00003901	0,18	0,6731
Resíduo	0,004499	21	0,0002045		
Total	0,004540	23			

TABELA 39 - Análise de variância para o efeito da escarificação na porosidade total do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem		1		0,04	0,8449
Escarificação	0,001417	1	0,0014171	3,34	0,0820
Resíduo	0,008933	21	0,0004061		
Total	0,0103,501	23			

TABELA 40 - Análise de variância para o efeito da escarificação na densidade do solo após 60 dias, para a profundidade 200-300 mm.

Fonte de Variância	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste F	Probabilidade
Calagem	847,044	1	847,044	0,46	0,5053
Escarificação	7417,35	1	7417,35	4,02	0,0580
Resíduo	39574,4	21	1844,16		
Total	46991,7	23			

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A P. A. A situação atual das pastagens no Brasil. In Curso de Manejo de Pastagem. Uberaba, 28-30 nov. 1996. Anais... Uberaba: PIAR. 1996.

AL-ADAWI, S. S.; REEDER, R. C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. Transactions of the ASAE. v.39, n.5, p.1641-1649, 1996.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P; CHAMEN, W. C. T.; TIJINK, F. G. J.; LINDEN, J. P. van der; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. Soil & Tillage Research. v.73, p.145-160, 2003.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, ASAE R313.1. St. Joseph, Michigan, EUA: Agricultural Engineers Yearbook of Standards, 2p., 1978.

ANDRADE, , I. F.; ARRUDA, M. L. R., BARUQUI, F. M. Recomendação e prática de adubação e calagem em pastagens para a região sudeste do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE CALAGEM E ADUBAÇÃO DE PASTAGENS, 1., 1985, Nova Odessa. Anais... Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p. 335-364.

ARAÚJO, A. A. de. Melhoramento das pastagens. Porto Alegre: Sulina, 1978. 208p.

ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo amarelo distrófico na Amazônia ocidental. R. bras. Ci. Solo, n. 28, p. 307-315, 2004.

AZEVEDO, E. C. de. Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso. Campinas: UNICAMP, 2004, 141p. Tese (Doutorado).

BALBUENA, R. H., TERMINELLO, A. M., CLAVERIE, J. A., CASADO, J. P., MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal: Evolución de las propiedades físicas. Rev. bras. de Eng. Agrícola e Ambiental. v. 4, n. 3, p. 453-459, 2000.

BANZATO, D. A.; KRONKA, S. N. Experimentação agrícola. Jaboticabal: Funep, 1989. 247 p.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil & Tillage Research. v.53, p.215-230, 2000.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. Ciência Rural, v. 34 n. 6, p. 1973-1800, 2004.

BONFIM, E. R. P.; PINTO, J. C.; SALVADOR, N.; MORAIS, A. R. de; ANDRADE, I. F. de; ALMEIDA, O. C. de. Efeito do tratamento físico associado à adubação em pastagem degradada de braquiária, nos teores de proteína bruta, fibra em detergente neutro e fibra em detergente ácido. Ciência Agrotécnica, v. 27, n. 4, p. 912-920, 2003.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: O.A. Camargo, L.R.F. Alleoni, 1997. 132p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)

CARDOSO JÚNIOR, E. Q.; RODRIGUES, T. R.; SILVA, J. M. L. da; GAMA, J. R. N. F. Propriedades físicas de latossolo e argissolo no nordeste paraense sob sistemas de recuperação de pastagens (*Brachiaria humidicola*, Rendle). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. Anais... Cuiabá: UFMT, 2002. CD-Rom.

CARVALHO, M. M.; MARTINS, C. E.; SIQUEIRA, C.; SARAIVA, O. F. Crescimento de uma espécie de braquiária, na presença de calagem em cobertura e doses de nitrogênio. R. bras. Ci. Solo, v. 16, n. 1, p. 69-74, 1992.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5a aproximação. Lavras, 1999. 359p.

CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um latossolo amarelo da Amazônia Central. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 30, n. 1, p. 107-114, 1995.

COSTA, L. M.; MATOS, A. T. Impactos da erosão do solo em recursos hídricos. In: Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura. Brasília: MMA, SRH, ABEAS, UFV, 1997. p. 173-189.

DIAS, L. E. & GRIFFITH, J. J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.1-7.

DIAS-FILHO, M. B. Pastagens cultivadas na Amazônia oriental brasileira: processos e causas de degradação e estratégias de recuperação. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.135-147.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. bras. Ci. Solo, n. 20, p. 357-365, 1996.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. B.; CLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. *et al.* (Ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Society of America, Special Publication, n. 5, p. 3-21, 1994.

EKWUE, E. I.; STONE, R. J. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. Transactions of the ASAE. v.38, n.2, p.357-365, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília: SPI/EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1999. 412p

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

GADANHA JUNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; UAHAN, C. H.; TOMIMORI, S. M. A. W. Máquinas e implementos agrícolas do Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1991. 468 p.

GLIESSMAN, S. R.. Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

GRECENKO, A. Tire loading to reduce soil compaction. Journal of Terramechanics. v. 40, p. 97-115, 2003.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. Advances in Soil Sciences, v. 6, p. 65-100, 1987.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil & Tillage Research. v.53, p.71-85, 2000.

HOLTZ, G. P.; SÁ, J. C. M. Resíduos culturais: reciclagem de nutrientes e impacto na fertilidade do solo. IN: FUNDAÇÃO ABC PARA ASSISTÊNCIA TÉCNICA AGROPECUÁRIA. Curso sobre manejo do solo no sistema plantio direto. Castro: Fundação ABC, 1995. p. 21-35.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS – IAC. Levantamento de Solos do Centro Experimental Central do Instituto de Zootecnia. Campinas, IAC: 1975.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo Agropecuário. 1996. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pecua/default.asp>. Acesso em: 10/01/2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção da pecuária municipal. V. 32, 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/ppm/2004/ppm2004.pdf>. Acesso em: 18/01/2006.

JORGE, J. A. Física e manejo dos solos tropicais. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 328 p.

JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Sci. Soc. Am. J. v. 47, p. 1208-1211, 1983.

JORAJURIA, D. & DRAGHI, L. Sobrecompactación del suelo agrícola parte 1: influencia diferencial del peso y del número de pasadas. Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental. v. 4, n. 3, p. 445-452, 2000.

JUSTINO, A. et al. Avaliação da mobilização de quatro tipos de solo pela ação do arado escarificador em diferentes profundidades de trabalho e espaçamentos ente hastes. Publicatio UEPG – Ciências Exatas e da Terra, Ponta Grossa, v.3, n.1, p.19-55, 1995.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia. São Paulo: Ceres. 1979, 264 p.

LAL, R. Soil erosion and land degradation: the global risks. Advances in Soil Science, v.11, p.129-172, 1990.

LINS E SILVA, M. L.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C. Desenvolvimento e utilização de um penetrógrafo hidráulico com aquisição eletrônica de dados. Viçosa: SBEA, 1995. 27 p., paper n. 95-4-305.

LINS E SILVA, M. L. Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, pelo índice de cone. Campinas: UNICAMP, 1999, 161p. Tese (Doutorado).

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. Soil & Tillage Research. v.73, p.15-29, 2003.

LIPIEC, J.; STEPNIEWSKI, W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. Soil & Tillage Research. v.35, p.37-52, 1995.

LOMBARDI NETO, F. Degradação das pastagens. In: ENCONTRO SOBRE RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS, 1., Nova Odessa, 1993. Anais... Nova Odessa, Instituto de Zootecnia, 1993. p.49-60.

MACEDO, M.C.M. Recuperação de áreas degradadas: pastagens e cultivos intensivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 7, Goiânia, 1993. Anais... Goiânia: SBSC, 1993. p.71-72.

MACEDO, M.C.M.; ZIMMER, A.H. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In Favoretto, V.; Rodrigues, L.R.A.; Reis, R.A. (eds.). SIMPÓSIO SOBRE ECOSISTEMAS DE PASTAGENS, 2, 1993, Jaboticabal. Anais... Jaboticabal: FUNEP, UNESP, 1993. p.216-245.

MARTÍNEZ, L. J. & ZINCK, J. A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazônia. Soil & Tillage Research. v.75, p.3-17, 2004.

MARTINS JUNIOR, J. X. Métodos de Ensaio. Divisão de Pesquisas Tecnológicas, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Ministério da Viação e de Obras Públicas. 206p. 1964.

MAZUCHOWSKI, J. D.; DERPSH, R. Guia de preparo do solo para culturas anuais mecanizadas. Curitiba: ACARPA, 156 P. 1984.

MELLO, L. M. M.; CUISSI SOBRINHO, N.; YANO, E. H.; TAKAHASHI C. M.; NARIMATSU K. C. P.; BORGHI, E. Atributos físicos do solo em pastejo rotacionado de sorgo na integração agricultura - pecuária no sistema de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. Anais... Cascavel: UNIOESTE, 2001. CD-Rom.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. R. bras. Ci. Solo, v.23, p.197-202, 1999.

MIRANDA, M. J. de; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J.; FAGUNDES, R. M.; FONSECHI, D. B.; CALVE, L.; PELLEGRINO, G. Q. A classificação climática de Koeppen para o estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/portal/modules.php?name=climasp&file=descricao>. Acesso em: 28/01/2006.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, 5ed. John Wiley & Sons Inc, 2001. 339p.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F., DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, n. 11, p. 1409-1418, 2001.

MÜLLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F., DESJARDINS, T.; MITJA, D. The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian amazon: a case study. Agriculture Ecosystems & Environment, v.103, n.2, p. 279-288, 2004.

NASCIMENTO JR., D. do; QUEIROZ, D. S.; SANTOS, M.V.F. dos. Degradação das pastagens e critérios para avaliação. In. SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 11. Piracicaba, 1994. Anais... Piracicaba. FEALQ, 1994. 325 P. P. 107-152.

OLIVEIRA, P. P. A.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de O.; CORSI, M. Liming and fertilization to restore degraded *Brachiaria decumbens* pastures grown on an Entisol. Scientia agricola, v. 60, n. 1, p. 125-131, 2003.

PARR, J. F.; PAPENDICK, S. B.; HORNICK, S. B. *et al.* Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. American Journal of Alternative Agricultural, v. 7, n. 1-2, p. 5-11, 1992.

PEREIRA, C. A.; ANDRADE, N. de O. Transferência de tecnologias disponíveis para a recuperação de pastagens. In: ENCONTRO SOBRE RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS, 1., Nova Odessa, 1993. Anais... Nova Odessa, Instituto de Zootecnia, 1993. p.1-25.

PERUMPAL, J. V. Cone Penetrometer Applications – A Review. Transactions of the ASAE. v.30, n.4, p.939-944, 1987.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.v. 229, p. 443-456, 2005.

PRIMAVESI, A. Manejo Ecológico do Solo: Agricultura em regiões tropicais. 9a. ed. São Paulo: Nobel, 1999. 549p.

PROFFITT, A. P. B.; JARVIS, R. J.; BENDOTTI, S. The impact of sheep trampling and stocking rate on the physical properties of a Red Duplex soil with two initially different structures. Australian Journal of Agricultural Research. v. 46, p. 733-747, 1995.

RADFORD, B. J.; YULE, D. F.; McGARRY, D.; PLAYFORD, C. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. Soil & Tillage Research. v.61, p.157-166, 2001.

RAIJ, B. van. Fertilidade do Solo e Adubação. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. BOLETIM TÉCNICO 100, Campinas –SP, IAC, 1996.

- RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Models for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 47, n. 1, p. 25-31, 2004.
- RICHARD, G.; BOIZARD, H.; ROGER-ESTRADE, J.; BOIFFIN, J.; GUÉRIF, J. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. Soil & Tillage Research. v.51, p.151-160, 1999.
- RODRIGUES, T. de J D.; RODRIGUES, L. R. de A.; REIS, R. A. Adaptação de plantas forrageiras às condições adversas. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 2., 1993, Jaboticabal. Anais... Jaboticabal: FUNEP, 1993. p. 17-61.
- RODRIGUES, L. R. de A.; REIS, R. A. Conceituação e modalidades de sistemas intensivos de pastejo rotacionado. In: PEIXOTO, A. M.; MOURA, J. C. de; FARIA, V. P. de. Fundamentos do Pastejo Rotacionado. Piracicaba: FEALQ, 1999. 327p.
- ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAM, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. Soil & Tillage Research. v.65, p. 109-115, 2002.
- SANTOS, J. C. dos. Avaliação do desempenho de um escarificador. Campinas: UNICAMP, 1994, 53p. Dissertação (Mestrado).
- SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. Ciência Rural, v. 34 n. 2, p. 399-406, 2004.
- SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. Soil & Tillage Research. v.35, p.5-22, 1995.
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. Penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCAR-STOLF: recomendação para seu uso. Stab, v. 1, n. 3, p. 18-23, 1983.
- STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. Ciência Rural, v. 34 n. 3, p. 755-760, 2004.
- SVERZUT, C. B.; PECHE FILHO, A.; DANIEL, L. A. Resistência a penetração de um Latossolo Vermelho Distrófico em função de diferentes formas de preparo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. Anais... Cascavel: UNIOESTE, 2001. CD-Rom.
- TARAWALLY, M. A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M. E.; ITZA, C. A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. Soil & Tillage Research. v.76, p.95-103, 2004.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S. da; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em um latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. Scientia agrícola. v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; ARAÚJO, M. A.; PINTRO, J. C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. R. bras. de Eng. Agrícola e Ambiental. v. 8, n. 1, p. 65-71, 2004.

TOWNSEND, C. R.; COSTA, N. de L.; MENDES, A. M.; MAGALHÃES, J. A. Fertilização do solo sob pastagens degradadas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu na amazônia ocidental – produção de forragem. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. Anais... Cuiabá: UFMT, 2002. CD-Rom.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 510 p.

WARREN, S. D.; NEVILL, M. B.; BLACKBURN, W. H.; GARZA, N. E. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. Soil Sci. Soc. Am. J. v. 50, p. 1336-1341, 1986.

WATKIN, B. R.; CLEMENTS, R. J. The effects of grazing animals on pasture. In: WILSON, P. Plant Relations in Pastures. P.273-289. 1978.

WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L de C. Variabilidade da resistência do solo à penetração por análise multivariada. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. Anais... Cuiabá: UFMT, 2002a. CD-Rom.

WEIRICH NETO, P. H.; CAIRES, E. F.; JUSTINO, A.; DIAS, J. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. Ciência Rural, v. 30 n. 1, p. 23-29, 2000.

WEIRICH NETO, P. H.; ROSA, A. L. T. da; GOMES, J. A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. R. bras. de Eng. Agrícola e Ambiental. v. 6, n. 2, p. 349-353, 2002b.

YOKOYAMA, L. P.; VIANA FILHO, A.; BALBINO, L. C.; OLIVEIRA, I. P. de; BARCELLOS, A. de O. Avaliação econômica de técnicas de recuperação de pastagens. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 34, n. 8, p. 1335-1345, 1999.

ZIMMER, A. H., CORREA, E. S. A pecuária nacional, uma pecuária de pasto? In: ENCONTRO SOBRE RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS, 1., Nova Odessa, 1993. Anais... Nova Odessa, Instituto de Zootecnia, 1993. p.1-25.

ZIMMER, A. H., EUCLIDES, V. P. B., EUCLIDES FILHO, K., MACEDO, M. C. M. Considerações sobre índices de produtividade da pecuária de corte em Mato Grosso do Sul. Campo Grande, EMBRAPA-CNPGC, (EMBRAPA-CNPGC. Documentos, 70). CNPGC, 1998, 53 p.

ZIMMER, A. H., EUCLIDES, V. P. B., EUCLIDES FILHO, K., MACEDO, M. C. M.
Manejo de plantas do gênero *Brachiaria*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA
PASTAGEM, 9., Piracicaba, 1988. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1988. p.141-184.