

MARCO AURÉLIO TEIXEIRA COSTA

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO COM
PASTAGEM (*Panicum maximum* Jacq. IPR – 86 Milênio) ADUBADA COM
DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO

MARINGÁ – PARANÁ - BRASIL

JUNHO 2012

MARCO AURÉLIO TEIXEIRA COSTA

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO COM
PASTAGEM (*Panicum maximum* Jacq. IPR – 86 Milênio) ADUBADA COM
DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor

MARINGÁ – PARANÁ - BRASIL

JUNHO 2012

MARCO AURÉLIO TEIXEIRA COSTA

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO COM
PASTAGEM (*Panicum maximum* Jacq. IPR – 86 Milênio) ADUBADA COM
DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor

Aprovada em 29 de junho de 2012

Antônio Carlos Andrade Gonçalves

José de Deus Viana da Mata

Simony Marta Bernardo Lugão

Karina Maria Vieira Cavalieri

Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena
(Orientador)

Aos meus pais, *Antonio e Janete*, que sempre me apoiaram,

Dedico.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, pela maestria na transferência dos conhecimentos e pelo exemplo de profissionalismo.

À Pesquisadora Dra. Simony Martha Bernardo Lugão, pelas oportunidades oferecidas que foram vitais para meu desenvolvimento profissional e intelectual. Pela amizade, exemplo de profissionalismo e apoio oferecido durante toda minha vida profissional.

Ao Pesquisador Dr. Antonio Costa, pelo apoio e orientação dedicados durante o desenvolvimento deste e outros trabalhos que fizeram parte da minha formação. Pela amizade e carinho que muito me confortaram nos momentos difíceis.

À Universidade Estadual de Maringá, ao Departamento de Agronomia e ao Curso de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao CNPq e a CAPES, pelo auxílio financeiro

Ao Instituto Agrônomo do Paraná, pela estrutura oferecida e auxílio financeiro para execução desse trabalho.

Aos técnicos de laboratório Reinaldo Bernardo (UEM) e Sílvia Eliana Tanno Miranda (UEM), pelas análises laboratoriais e auxílio na obtenção dos resultados.

À Érika Cristina Takamizawa Sato, pela amizade e pela orientação das atividades e relatórios prestados à secretaria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

Ao amigo Carlos Alberto e a família Trecenti, pela oportunidade de trabalho e aplicação de práticas de tecnológicas associadas à pecuária em fazendas comerciais, que foram essenciais para as diretrizes de pesquisa determinadas neste trabalho.

Aos companheiros de Pós-Graduação Camila, Edner, Helio, Marlon, Raquel, Renata e Wagner, pelos momentos de descontração e auxílio na execução das atividades relacionadas ao projeto de tese.

Aos amigos, pela dedicação e incentivo que muito me ajudaram nos momentos difíceis. Pelo convívio agradável e pelos momentos de descontração.

Muitíssimo Obrigado!

BIOGRAFIA

Marco Aurélio Teixeira Costa, filho de Antonio Costa e Janete Teixeira Costa nasceu em São Paulo em 10 de março de 1976. Em 1997, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, e em dezembro de 2001, formou-se Engenheiro Agrônomo. Durante sua vida acadêmica realizou estágio em centros de excelência como o Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA CNPq. No ano de 2002, foi selecionado para o Curso de mestrado na Universidade Estadual de Maringá obtendo o título de Mestre em Agronomia, com ênfase em solos e nutrição de plantas, no ano de 2004. Neste mesmo ano atuou em projeto do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) como consultor técnico. De 2005 a 2008 trabalhou no Instituto Agronômico do Paraná exercendo a Função de pesquisador. Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá para a obtenção do título de Doutor em solos e Nutrição Mineral de plantas após a defesa desta tese.

Sumário

LISTA DE QUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. Introdução Geral.....	1
2. Hipótese.....	3
3. Objetivos.....	3
Objetivos específicos	3
Objetivo geral.....	4
4. Histórico do experimento	4
5. Revisão de literatura	9
5.1.Produção de bovinos sobre pastagens:.....	9
5.2.Compactação dos solos em pastagens.....	13
5.3.Qualidade do solo.....	15
5.4.Indicadores de qualidade física do solo relacionados as áreas sob pastagem.....	17
5.5.Matéria orgânica como indicador de qualidade do solo	19
6. CAPÍTULO 1: RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO, PRODUÇÃO DE RAÍZES E DE FORRAGEM EM DIFERENTES NÍVEIS DE INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO	21
6.1 Introdução	21
6.2 Material e métodos.....	23
6.3 Resultados e discussão	29
6.4 Conclusões	38

7. CAPÍTULO 2: INFLUÊNCIA DA INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO NA QUALIDADE FÍSICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO	40
7.1 Introdução	40
7.2 Material e métodos.....	42
7.3 Resultados e discussão	48
7.4 Conclusões	62
8. CAPÍTULO 3:INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO E ACUMULAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO EM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO	63
8.1 Introdução	63
8.2 Material e métodos.....	65
8.3 Resultados e discussão	69
8.4 Conclusões	76
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
10. Referências bibliográficas.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.	4
Quadro 4.2. Caracterização química da camada de 0-0,20 m do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo durante os anos de condução do experimento.	7
Quadro 4.3. Histórico da aplicação de fertilizantes e corretivos	9
Quadro 5.1. Relação entre o tamanho do rebanho de bovinos e a taxa de desfrute com o incremento da oferta de animais para o abate considerando a intensificação das pastagens plantadas.	11
Quadro 6.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.	24
Quadro 6.2. Descrição dos níveis de intensificação de uso da pastagem, taxa de lotação, ciclos de pastejo e produção de massa seca de forragem no período de 2007-2009, referentes a um valor médio de ocupação de 209 dias no período de verão.	24
Quadro 6.3. Caracterização química do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo em amostras de solo coletadas no ano de 2007.	25
Quadro 7.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.	43
Quadro 7.2. Descrição dos níveis de intensificação de uso da pastagem, taxa de lotação, ciclos de pastejo e produção de massa seca de forragem no período de 2007-2009, referentes a um valor médio de ocupação de 209 dias no período de verão.	43
Quadro 7.3. Caracterização química do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo em amostras de solo coletadas no ano de 2007	44
Quadro 7.4. Classes de percolação em função da condutividade hidráulica saturada, Ksat (Adaptado de Cunha et al., 2008).	47

Quadro 7.5. Correlação entre os valores médios de densidade e condutividade hidráulica saturada com os valores de porosidade total do solo, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30 – 0,40 m.....	52
Quadro 7.6. Correlação entre os valores médios de macroporos, microporos, porosidade no domínio dos macroporos (PDmacro), porosidade no domínio da matriz do solo (PDmatriz), capacidade de aeração da matriz do solo (CAM), capacidade de aeração total (CAT) e capacidade de campo (CC) com os valores de porosidade total do solo.....	53
Quadro 8.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.	65
Quadro 8.2. Descrição dos níveis de intensificação de uso da pastagem, taxa de lotação, ciclos de pastejo e produção de massa seca de forragem no período de 2007-2009, referentes a um valor médio de ocupação de 209 dias no período de verão.	66
Quadro 8.3. Histórico da aplicação de calcário para a correção da acidez do solo	66
Quadro 8.4 . Caracterização química da camada de 0-0,2 m do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo durante os anos de condução do experimento.	67
Quadro 8.5. Valores médios de carbono orgânico do solo (COS), em g dm ⁻³ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo em diferentes anos após a implantação da pastagem de <i>Panicum maximum</i> Jacq. IPR-86 Milênio.....	69
Quadro 8.6. Valores médios de capacidade de troca de cátions a pH 7,0 em cmol _c dm ⁻³ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo em diferentes anos após a implantação da pastagem de <i>Panicum maximum</i> Jacq. IPR-86 Milênio.	73
Quadro 9.1. Indicadores de qualidade física na camada de 0-0,10 m do solo e valores adequados sugeridos por diferentes autores	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Representação esquemática da área experimental com disposição dos níveis de intensificação do pastejo.....	5
Figura 5.1: Evolução do efetivo de bovinos (a) e das áreas ocupadas com pastagens no Brasil (Fonte: IBGE 2006; IBGE, 2010).....	10
Figura 5.2: Processo de degradação das pastagens (Fonte: Macedo 2001)	11
Figura 6.1. Produtividade média da massa seca total (MSF) e da massa seca de folhas verdes (MSFV) do <i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. IPR – 86 Milênio em função da adubação nitrogenada referente à média das safras 2007/08 e 2008/09. Os símbolos ** indicam que os modelos ajustados foram significativos com $F < 0,01$	29
Figura 6.2. Variação da resistência à penetração (RP) em função do conteúdo de água no solo (Ug) nas diferentes camadas do solo estudado em três datas de avaliação. O símbolo ** indica que os modelos ajustados foram significativos ($F < 0,01$).	32
Figura 6.3. Conteúdo de água no solo (Ug), resistência do solo à penetração (RP) e massa seca de raízes (MSR) em função do nível de intensificação do uso da pastagem (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) na posição CT (colunas em preto) e na posição ST (colunas com hachuras). Letras minúsculas comparam as posições (CT e ST) em cada nível de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).	33
Figura 6.4. Relação entre a massa seca de raízes (MSR) e resistência do solo à penetração (RP) utilizando dados obtidos em todos os tratamentos e as camadas de solos estudadas. Os números de 1 a 4 indicam o numero do quadrante. O símbolo ** indica que o modelo ajustado foi significativo ($F < 0,01$).	38
Figura 7.1. Representação dos indicadores da capacidade de armazenamento de ar e água no solo (Conforme Fidalski et al. 2008).	45

Figura 7.2. Vista do corte longitudinal de permeâmetro utilizado para determinação da condutividade hidráulica saturada em amostras indeformadas de solo conforme Figueiredo (2010).	46
Figura 7.3. Valores médios de densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica saturada (Ksat) e porosidade total (Pt) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam as posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).	49
Figura 7.4. Valores médios de macroporosidade, microporosidade e porosidade no domínio dos macroporos (PDmacro) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam nas posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).	55
Figura 7.5. Valores médios de porosidade no domínio da matriz do solo (PDmatriz), capacidade de aeração da matriz do solo (CAM) e capacidade de aeração total (CAT) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam as posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI ₁ , NI ₂ , NI ₃ e NI ₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$	59

Figura 6. Valores médios de capacidade de campo, capacidade de armazenamento de água (CC/Pt) e capacidade de armazenamento de ar no solo (CAT/Pt) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam nas posições (CT e ST) em cada nível de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$). 61

Figura 8.1. Modelos de regressão ajustados para o conteúdo de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico, em cada um dos níveis de intensificação avaliados (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄), em função dos anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-68 Milênio 71

Figura 8.2. Relação entre os conteúdos de carbono orgânico total (COT) e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC pH7,0) e efetiva (CTC efetiva) em Argissolo Vermelho Distrófico. Os pontos são referentes a média de quatro repetições dos quatro níveis de intensificação de pastejo em 7 anos avaliados entre 1998 e 2009. 72

Figura 8.3. Modelos de regressão ajustados para o Capacidade de troca de cátions do solo (CTC) a pH 7,0 em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico, em cada um dos níveis de intensificação avaliados (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄), em função dos anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-68 Milênio 74

Figura 8.4. Comparação do estoque de carbono entre os níveis de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico quatorze anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-68 Milênio pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). 75

RESUMO

O aumento da produtividade nos sistemas pecuários é necessário pela crescente demanda de produtos de origem animal. A intensificação do pastejo permite o aumento da produtividade animal por área explorada. A sustentabilidade desse sistema produtivo depende da utilização de técnicas adequadas de manejo do sistema solo-planta-animal. O aumento da taxa de lotação animal é associado a compactação do solo. O presente trabalho teve por objetivo avaliar, em experimento de longa duração, o efeito da intensificação do pastejo sobre atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho Distrófico e a sustentabilidade técnica do sistema de produção de bovinos com lotação rotacionada compressão de pastejo constante. A intensificação do pastejo foi baseada no aumento da produtividade da pastagem pelo uso de doses crescentes de nitrogênio e ajuste da carga animal em função da produção de pastagem em cada nível de intensificação avaliado. A intensificação do pastejo aumentou a resistência do solo à penetração, principalmente, na área de pisoteio dos animais e contribuiu para redução do crescimento das raízes. Não houve restrição ao crescimento das raízes quando a resistência do solo à penetração foi inferior a 1 MPa. O pisoteio dos animais reduziu a porosidade total do solo na camada de 0-0,10 m. A redução da porosidade do solo ocorreu em razão da perda de poros com diâmetro entre 0,003 e 0,03 mm. O uso da pastagem por longo período com compressão de pastejo adequada permitiu o acúmulo de carbono no solo. Quanto maior a intensificação do pastejo maior foi a taxa de acúmulo de carbono no solo. Os tratamentos mais intensificados tiveram as maiores quantidades de carbono estocado após quatorze anos da implantação da pastagem. Os resultados demonstraram que a intensificação do pastejo comprometeu a estrutura do solo na área de pisoteio dos animais, porém não comprometeu a produtividade da pastagem. A intensificação do pastejo aumentou a capacidade de retenção de água, o estoque de carbono no solo e a capacidade de troca de cátions, aumentando a capacidade produtiva do solo avaliado.

Palavras-chave: Pastagem, intensificação do pastejo, resistência do solo à penetração, porosidade do solo, fluxo hidráulico saturado, estoque de carbono.

ABSTRACT

Increasing productivity in livestock systems have been increasingly necessary in view of the growing demand for animal products. The intensification of grazing allows increasing animal productivity by explored area. The sustainability of this production system depends on use of appropriate techniques for management of the soil-plant-animal system. The increase in stocking rates is associated with soil compaction. This study aimed to evaluate, in long-term experiment, the effect of intensification of grazing on physical and chemical of soil and the technical sustainability of the cattle production system of rotational grazing with constant grazing pressure. The intensification of grazing was based on increasing the productivity of the pasture by the use of increasing nitrogen rates and adjust stocking rate as a function of pasture production increased at each level evaluated. There wasn't restriction to root growth when soil resistance to penetration was less than 1 MPa. The trampling of the animals reduced the total soil porosity in the layer of 0 to 0.10 m. A reduction in soil porosity was due to loss of pore diameter between 0.003 and 0.03 mm. The use of pasture for a long period with proper grazing pressure has allowed soil carbon accumulation. The higher intensification of grazing was the largest rate of soil carbon accumulation. Treatments most intensified had the highest amount of carbon stored after fourteen years of pasture implementation. The results showed that the intensification of grazing compacted soil in the area of animal trampling, but the level of compaction did not affect the pasture productivity. The grazing intensification increased the water retention capacity, soil carbon storage and cation exchange capacity, increasing the productive capacity of the soil evaluated.

Key words: Pasture, intensification of grazing, soil resistance to penetration, soil porosity, saturated hydraulic flow, carbon storage

1. Introdução Geral

A intensificação do pastejo permite o aumento da produtividade animal por área explorada e sua sustentabilidade depende da utilização de técnicas adequadas de manejo do sistema solo-planta-animal. O aumento da produtividade nos sistemas pecuários é cada vez mais necessário tendo em vista a crescente demanda de produtos de origem animal para o abastecimento do mercado interno e externo.

O Brasil possui 330 milhões de hectares destinados a exploração agrícola, pecuária e florestal. Desse total, aproximadamente, 204 milhões são ocupados por estabelecimentos que têm a pecuária como atividade principal. A área ocupada com pastagem e forrageiras destinadas a produção de animais é de 159 milhões de hectares sendo que aproximadamente 40% destas áreas são ocupadas por pastagens naturais ou degradadas (IBGE, 2006).

A degradação das pastagens está relacionada ao manejo inadequado do solo, dos animais e das espécies forrageiras exploradas (Nascimento et al., 1994; Müller et al., 2004). Com isso há a ocorrência de pastagens com baixa capacidade produtiva, com alta ocorrência de invasoras e com solos compactados suscetíveis a processos erosivos (Müller et al., 2001). Com a degradação, as pastagens passam a suportar taxas de lotação cada vez menores comprometendo a produtividade animal (Souza Neto e Pedreira, 2004), obrigando os produtores a suplementar os animais ou reformar a pastagem. O custo com a suplementação dos animais ou com a reforma das pastagens pode comprometer a viabilidade da atividade pecuária tornando-a pouco competitiva frente a outras atividades agropecuárias.

A recuperação ou aumento da capacidade produtiva das pastagens através da correção da acidez e fertilização dos solos e da utilização de técnicas de manejo do solo, das plantas e dos animais, adequadas às condições regionais, tem sido considerada a forma mais econômica de fornecer alimentação abundante e de qualidade aos animais (Souza Neto e Pedreira, 2004).

O aumento da produtividade das pastagens permite o incremento da produção animal por área sem comprometer o rendimento individual dos animais explorados. Por outro lado, o aumento da taxa de lotação animal pode trazer prejuízos a estrutura dos solos por causa do impacto do pisoteio dos animais (Greenwood e McKenzie, 2001) comprometendo sua qualidade física.

Qualidade do solo consiste na capacidade de prover produtividade animal ou vegetal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e proporcionar condições para a habitação e a saúde humana (SSSA, 1995). A perda da qualidade física do solo em áreas intensamente cultivadas está associada a danos ambientais originados pela degradação da estrutura do solo como a suscetibilidade à compactação, à erosão e à desertificação (Dexter, 2002). Nas áreas com pastagem, os principais danos ambientais observados são a redução da infiltração de água no solo e a ocorrência de erosão com consequente redução na produtividade das pastagens (Greenwood e McKenzie, 2001).

O impacto do pisoteio animal sobre as pastagens está relacionado, principalmente, a ação do casco dos animais sobre a pastagem e sobre a estrutura do solo (Greenwood e McKenzie, 2001). A pressão dos cascos dos animais sobre os solos é frequentemente associada ao comprometimento da qualidade física do solo (Twerdoff et al., 1999; Silva et al., 2003; Moreira et al., 2005) proporcionando redução da porosidade (Muller et al., 2001), aumento da densidade (Bertol et al., 1998) e aumento da resistência do solo a penetração de raízes (Silva et al., 2003).

O comprometimento da qualidade física do solo ao longo dos anos pode proporcionar redução da ciclagem da matéria orgânica nos solos, redução do desenvolvimento radicular das espécies forrageiras e aumento da perda de fertilizantes nitrogenados interferindo negativamente na fertilidade química destes solos reduzindo o tempo de exploração das pastagens (Hamza e Anderson, 2005).

Por outro lado, o controle da oferta de forragem associado a rápida recuperação das pastagens proporcionada pela fertilização dos solos pode reduzir o impacto do pisoteio animal sobre os solos mitigando os efeitos da produção

intensiva sobre a qualidade do solo. Além disso, o incremento da produtividade das forrageiras pode contribuir para o incremento de matéria orgânica aos solos (Sarmiento et al., 2005), proporcionando maior agregação entre partículas, retenção de água no solo, maior capacidade de troca de cátions e maior ciclagem de nutrientes.

A avaliação do impacto da intensificação do pastejo, decorrente da fertilização do solo e aumento da produtividade da pastagem sobre as características físicas e químicas, contribuí para identificar sistemas de manejo sustentáveis para tornar a atividade pecuária viável e competitiva frente às demais alternativas de exploração dos solos.

2. Hipótese

A hipótese do presente trabalho é que a intensificação do pastejo, baseada no controle da taxa de lotação animal em função da produtividade das pastagens, pode reduzir o impacto do pisoteio animal sobre o solo.

3. Objetivos

Os objetivos específicos 1, 2 e 3 descritos abaixo foram tratados em capítulos independentes presentes nos itens 6, 7 e 8 respectivamente. Nas considerações finais (item 9), integraram-se os resultados obtidos nos itens anteriores a fim de atingir o objetivo geral da tese. Na sequência, são descritos os objetivos específicos e o objetivo geral da tese.

Objetivos específicos

1. Avaliar o efeito da intensificação do pastejo sobre a resistência do solo a penetração, conteúdo de água no solo e na produção de raízes. Avaliou-se, ainda, a dependência entre os indicadores de qualidade física do solo utilizado e a produção de raízes para quantificar o impacto da intensificação do sistema sobre o solo.

2. Avaliar o efeito da intensificação do pastejo sobre porosidade, densidade, condutividade hidráulica saturada, armazenamento de água e ar e distribuição de tamanho de poros no solo, para qualificar o efeito da intensificação do pastejo sobre a estrutura do solo.
3. Avaliar o efeito da intensificação do pastejo sobre o conteúdo e o estoque de carbono no solo relacionando-os com indicadores de qualidade física e química do solo.

Objetivo geral

O presente trabalho teve por objetivo avaliar, em experimento de longa duração, o efeito da intensificação do pastejo sobre atributos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho Distrófico e a sustentabilidade técnica do sistema de produção de bovinos com lotação rotacionada com pressão de pastejo constante.

4. Histórico do experimento

O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR situada no município de Paranavaí – PR (Altitude: 480 m, Latitude: 23°00'04"S e Longitude: 42°02'06"W). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico de textura arenosa (Quadro 4.1) e relevo plano.

Quadro 4.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Horizonte	Profundidade	Argila	Silte	Areia	Classe textural
	m	-----	g kg ⁻¹ -----		
A	0 – 0,2	110	20	870	Areia franca
Bt ₁	0,2 – 0,5	193	13	793	Franco arenoso
Bt ₂	0,5 – 2,0	207	7	787	Franco argilo arenoso

A pastagem utilizada, *Panicum maximum* Jacq. IPR - 86 Milênio, foi semeada em 1995, em duas glebas (Figura 4.1). Após o pleno estabelecimento da

pastagem (1997), realizou-se o sorteio dos tratamentos e divisão das glebas (blocos) em piquetes. Os tratamentos consistiram de doses crescentes de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) que neste trabalho foram considerados como níveis de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄, respectivamente).

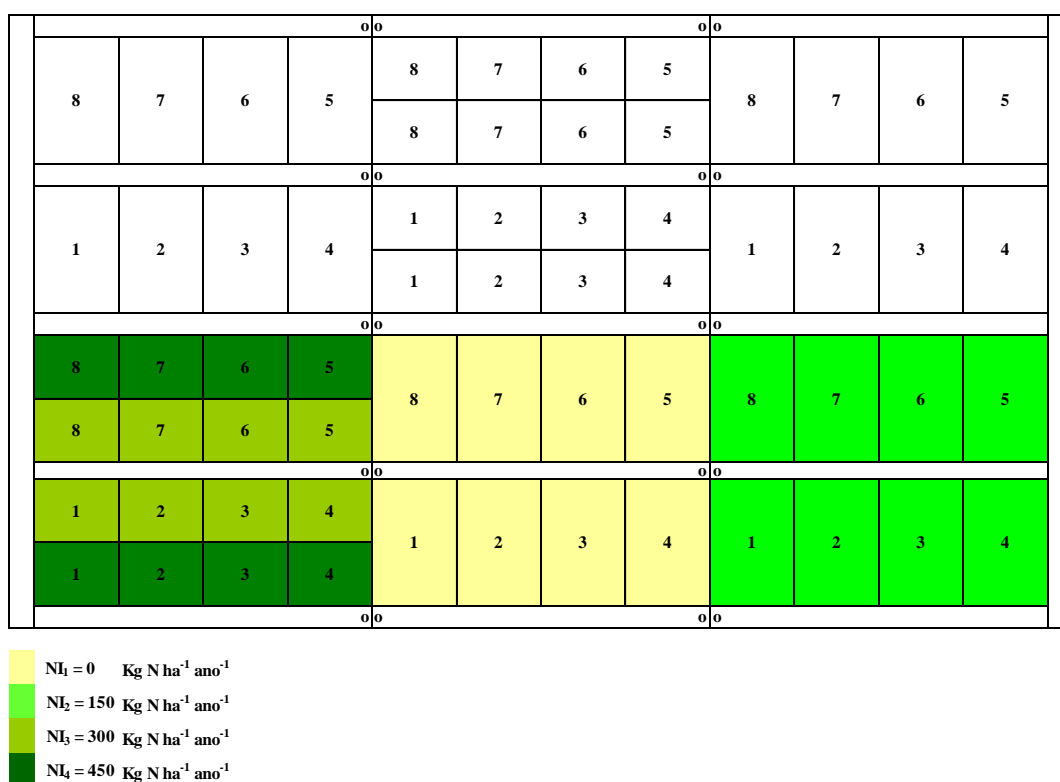


Figura 4.1. Representação esquemática da área experimental com disposição dos níveis de intensificação do pastejo.

No bloco superior da Figura, em preto e branco, a aplicação da adubação nitrogenada foi realizada por cinco anos (1997-2001) e no bloco inferior, destacado em cores, a aplicação da adubação nitrogenada foi realizada durante 13 anos (1997-2009). Os resultados apresentados neste trabalho se referem a amostras e dados coletados na gleba inferior da Figura 4.1.

Cada nível de intensificação foi dividido em 8 piquetes com áreas de 1687 m² para os níveis de intensificação NI₁ e NI₂ e 839 m² para os níveis de intensificação NI₃ e NI₄. A divisão dos níveis de intensificação em piquetes teve o objetivo de permitir a implantação do sistema de manejo com lotação rotacionada.

Na divisão entre os diferentes níveis de intensificação foi utilizado cerca com oito fios de arame liso para que não houvesse mistura dos animais entre os níveis de intensificação. Nas divisões internas e no acesso ao corredor foram utilizadas cercas elétricas com dois fios de arame liso. Em todas as parcelas os animais tiveram livre acesso à água e ao sal mineral.

Durante os seis primeiros anos (1997-2002) o manejo rotacionado da lotação considerou o período de ocupação do piquete de cinco dias de pastejo e 35 dias de descanso para todos os níveis de intensificação. Nos últimos seis anos, o sistema de condução foi alterado, levando em conta a altura do pasto em pré-pastejo (0,85 m) para definir a entrada dos animais e uma altura limite (0,40 m) para definir a saída dos animais do piquete. O manejo de lotação intermitente foi utilizado durante todo o período experimental a fim de garantir ofertas de foragem semelhantes entre os diferentes níveis de intensificação.

O monitoramento da fertilidade química do solo foi realizado durante todo o período experimental. Os resultados das análises químicas realizadas antes da aplicação dos níveis de intensificação do pastejo (1997) e o histórico da fertilidade do solo na área podem ser observados no Quadro 4.2.

A calagem (calcário com PRNT = 96%) realizada no ano agrícola de 1998/99 foi realizada para atingir saturação por bases de 70% na camada de solo de 0-0,20 m. No ano de 2000/01, foi aplicado uma dose complementar de 1 t ha^{-1} em todos os níveis de intensificação do pastejo. Em 2007, o cálculo da quantidade de calcário aplicado (PRNT = 85%) considerou a correção da saturação por bases da camada superficial de 0-0,10 m.

Quadro 4.2. Caracterização química da camada de 0-0,20 m do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo durante os anos de condução do experimento.

Ano	NI	Prof	P ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽¹⁾	CTC	V
		m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³								%
1997		0-0,20	4,0	6,43	5,3	0,00	2,48	1,56	0,66	0,29	4,98	50,23
	NI ₁	0-0,20	4,9	6,41	5,5	0,00	2,40	1,58	0,57	0,25	4,79	49,86
1998	NI ₂	0-0,20	3,8	5,97	5,3	0,00	2,45	1,35	0,55	0,23	4,57	46,41
	NI ₃	0-0,20	3,1	6,48	4,9	0,03	2,90	1,36	0,49	0,28	5,03	42,20
	NI ₄	0-0,20	4,6	7,21	4,7	0,05	3,18	1,23	0,40	0,42	5,23	38,79
2000	NI ₁	0-0,20	4,7	6,25	5,6	0,00	2,11	1,55	0,63	0,26	4,55	53,55
	NI ₂	0-0,20	4,2	5,93	5,3	0,00	2,29	1,33	0,58	0,25	4,45	48,74
	NI ₃	0-0,20	3,3	6,75	4,9	0,03	2,69	1,21	0,57	0,39	4,85	44,35
	NI ₄	0-0,20	4,4	6,56	4,4	0,16	3,06	0,89	0,45	0,45	4,84	36,47
2001	NI ₁	0-0,20	7,8	7,39	6,4	0,00	1,62	2,39	1,14	0,30	5,45	70,06
	NI ₂	0-0,20	5,6	7,06	6,3	0,00	1,65	2,07	1,02	0,21	4,95	66,60
	NI ₃	0-0,20	5,9	7,66	6,4	0,00	1,69	2,01	1,06	0,49	5,24	67,81
	NI ₄	0-0,20	8,1	6,91	6,3	0,00	1,69	1,78	0,92	0,41	4,79	64,76
2004	NI ₁	0-0,10	13,6	8,42	6,23	0,00	2,03	2,05	1,23	0,17	5,48	62,89
	NI ₂	0-0,10	9,8	8,20	6,00	0,00	2,11	1,68	1,13	0,28	5,19	59,33
	NI ₃	0-0,10	7,4	6,68	5,58	0,00	2,45	1,59	1,20	0,42	5,65	56,50
	NI ₄	0-0,10	5,7	8,76	5,63	0,00	2,45	1,36	1,08	0,38	5,26	52,95
	NI ₁	0,10-0,20	4,4	6,22	6,00	0,00	2,14	1,59	1,02	0,14	4,89	56,04
	NI ₂	0,10-0,20	3,0	5,92	5,53	0,00	2,36	1,31	0,86	0,19	4,71	49,90
	NI ₃	0,10-0,20	2,5	6,32	5,13	0,03	2,69	1,14	3,32	0,27	4,91	44,97
	NI ₄	0,10-0,20	2,4	6,58	4,85	0,06	2,84	0,99	0,77	0,23	4,83	41,14
	NI ₁	0,20-0,40	1,6	4,29	5,48	0,00	2,35	1,29	0,92	0,15	4,70	49,98
	NI ₂	0,20-0,40	1,3	4,50	5,08	0,04	2,54	1,16	0,80	0,13	4,62	44,91
	NI ₃	0,20-0,40	1,5	4,44	5,00	0,03	2,64	1,15	0,82	0,14	4,74	44,34
	NI ₄	0,20-0,40	1,5	4,45	4,68	0,12	2,85	0,96	0,81	0,15	4,76	40,11
2005	NI ₁	0-0,10	9,2	8,15	5,88	0,00	2,19	1,77	1,13	0,17	5,25	58,11
	NI ₂	0-0,10	10,9	9,35	5,98	0,00	2,15	1,62	1,13	0,16	5,05	57,52
	NI ₃	0-0,10	8,2	10,30	5,75	0,00	2,38	1,78	1,28	0,26	5,69	58,16
	NI ₄	0-0,10	6,4	9,81	5,43	0,00	2,68	1,62	1,19	0,21	5,69	53,11
	NI ₁	0,10-0,20	3,0	5,78	5,65	0,00	2,34	1,42	0,85	0,15	4,77	50,82
	NI ₂	0,10-0,20	2,7	5,79	5,63	0,00	2,31	1,35	0,93	0,16	4,74	51,27
	NI ₃	0,10-0,20	2,3	6,41	5,45	0,00	2,51	1,39	1,00	0,20	5,09	50,77
	NI ₄	0,10-0,20	1,9	5,70	4,85	0,05	2,81	1,09	0,79	0,21	4,90	42,81
	NI ₁	0,20-0,40	1,3	4,16	5,20	0,01	2,49	1,16	0,81	0,13	4,59	45,69
	NI ₂	0,20-0,40	1,4	4,97	5,30	0,00	2,45	1,18	0,95	0,17	4,74	48,45
	NI ₃	0,20-0,40	1,1	4,47	5,23	0,02	2,55	1,16	0,98	0,18	4,87	47,68
	NI ₄	0,20-0,40	3,2	6,21	5,03	0,01	2,69	1,20	0,94	0,20	5,02	46,41
2006	NI ₁	0-0,10	8,6	8,31	6,10	0,00	2,11	1,93	1,44	0,23	5,70	63,00
	NI ₂	0-0,10	9,9	9,37	5,78	0,00	2,27	1,97	1,28	0,24	5,76	60,50
	NI ₃	0-0,10	15,6	12,64	5,45	0,00	2,64	2,23	1,57	0,22	6,65	60,17
	NI ₄	0-0,10	10,6	13,44	5,23	0,01	3,01	2,10	1,48	0,22	6,80	55,74
	NI ₁	0,10-0,20	2,6	5,89	5,75	0,00	2,22	1,60	1,07	0,13	5,02	55,70
	NI ₂	0,10-0,20	3,8	5,87	5,53	0,00	2,31	1,51	1,06	0,14	5,02	53,97
	NI ₃	0,10-0,20	7,0	9,01	5,23	0,01	2,74	1,56	1,20	0,16	5,65	51,45
	NI ₄	0,10-0,20	4,7	8,60	4,88	0,05	3,25	1,39	1,08	0,13	5,84	44,37
	NI ₁	0,20-0,40	1,0	4,52	5,48	0,00	2,40	1,33	0,99	0,15	4,87	50,65
	NI ₂	0,20-0,40	1,5	4,78	5,15	0,03	2,59	1,31	1,12	0,11	5,12	49,45
	NI ₃	0,20-0,40	3,1	6,36	4,93	0,04	2,89	1,24	1,12	0,13	5,38	46,29
	NI ₄	0,20-0,40	2,4	6,19	4,60	0,17	3,24	1,16	1,05	0,11	5,55	41,69
2007	NI ₁	0-0,10	9,5	8,51	6,18	0,00	1,99	1,83	1,17	0,23	5,22	61,80
	NI ₂	0-0,10	13,3	9,42	5,73	0,00	2,23	1,80	0,98	0,23	5,24	57,45
	NI ₃	0-0,10	12,0	9,73	4,98	0,04	3,01	1,53	0,94	0,40	5,88	48,76
	NI ₄	0-0,10	16,0	10,32	4,50	0,14	3,91	1,44	0,77	0,37	6,49	39,83
	NI ₁	0,10-0,20	2,1	6,06	5,80	0,00	2,11	1,50	0,84	0,17	4,61	54,21
	NI ₂	0,10-0,20	3,0	5,40	5,65	0,00	2,20	1,49	0,83	0,11	4,63	52,65
	NI ₃	0,10-0,20	2,4	6,79	5,05	0,07	2,80	1,55	0,86	0,18	5,39	48,01
	NI ₄	0,10-0,20	3,5	6,65	4,53	0,19	3,36	1,35	0,62	0,19	5,52	39,11
	NI ₁	0,20-0,40	1,0	4,43	5,48	0,00	2,27	1,37	0,83	0,14	4,61	50,70
	NI ₂	0,20-0,40	1,6	4,94	5,55	0,00	2,28	1,43	0,92	0,10	4,72	51,82
	NI ₃	0,20-0,40	1,3	4,53	5,08	0,01	2,64	1,36	0,87	0,09	4,95	46,77
	NI ₄	0,20-0,40	1,4	4,78	4,63	0,16	2,89	1,44	0,82	0,10	5,24	44,92

Continua na próxima página

Ano	NI	Prof	P ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽¹⁾	CTC	V
		m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³					cmol _c dm ⁻³			%
2009	NI ₁	0-0,10	10.9	8.39	5.68	0.00	2.31	1.60	1.00	0.27	5.18	55.44
	NI ₂	0-0,10	11.0	9.41	5.38	0.00	2.59	1.63	0.99	0.25	5.46	52.61
	NI ₃	0-0,10	11.6	9.92	4.73	0.07	3.50	1.33	0.87	0.27	5.96	41.07
	NI ₄	0-0,10	15.9	10.71	4.30	0.23	4.62	0.87	0.69	0.22	6.39	27.80
	NI ₁	0,10-0,20	2.4	5.98	5.40	0.00	2.45	1.29	0.68	0.21	4.62	47.06
	NI ₂	0,10-0,20	2.7	5.42	5.33	0.00	2.40	1.40	0.80	0.11	4.71	49.05
	NI ₃	0,10-0,20	2.8	6.44	4.73	0.08	3.12	1.22	0.78	0.13	5.25	40.53
	NI ₄	0,10-0,20	3.6	6.37	4.25	0.41	3.95	0.69	0.54	0.12	5.29	25.94
	NI ₁	0,20-0,40	1.2	4.68	5.15	0.01	2.64	1.22	0.77	0.17	4.80	45.08
	NI ₂	0,20-0,40	1.2	4.86	5.28	0.00	2.49	1.36	0.84	0.11	4.79	47.98
	NI ₃	0,20-0,40	1.3	4.99	5.03	0.02	2.73	1.39	0.88	0.07	5.06	46.01
	NI ₄	0,20-0,40	2.4	5.18	4.28	0.37	3.62	0.73	0.61	0.10	5.06	28.49
	NI ₁	0-0,10	15.3	7.17	5.70	0.00	2.07	1.47	0.65	0.17	4.36	52.38
	NI ₂	0-0,10	17.7	9.47	5.18	0.03	2.48	1.66	0.72	0.20	5.06	51.11
	NI ₃	0-0,10	14.9	8.86	4.48	0.23	2.79	0.93	0.71	0.31	4.74	40.50
2011	NI ₄	0-0,10	13.9	8.83	4.28	0.40	3.03	0.72	0.57	0.37	4.69	34.10
	NI ₁	0,10-0,20	11.4	5.11	5.63	0.00	2.07	1.31	0.64	0.16	4.18	50.35
	NI ₂	0,10-0,20	6.1	4.31	5.48	0.00	2.09	1.29	0.46	0.20	4.04	48.20
	NI ₃	0,10-0,20	3.9	5.69	4.45	0.20	2.60	0.75	0.49	0.19	4.03	35.34
	NI ₄	0,10-0,20	8.8	5.92	4.13	0.55	3.03	0.53	0.30	0.28	4.14	26.84
	NI ₁	0,20-0,40	1.8	4.12	5.58	0.00	2.21	1.49	0.83	0.11	4.65	52.08
	NI ₂	0,20-0,40	1.9	3.64	5.59	0.00	2.09	1.53	0.67	0.10	4.40	52.55
	NI ₃	0,20-0,40	2.0	4.57	5.40	0.00	1.98	1.49	0.58	0.07	4.11	51.81
	NI ₄	0,20-0,40	4.6	5.34	4.49	0.56	2.84	0.81	0.40	0.17	4.22	32.97

Mehlich 1; ⁽²⁾ Walkley-Black; ⁽³⁾ CaCl₂; ⁽⁴⁾ KCl 1,0 M.

As doses de fertilizantes e corretivos aplicados durante o experimento são apresentadas no quadro 4.3.

A adubação fosfatada foi realizada utilizando superfosfato simples. Nos anos agrícolas de 1998/99 e 2000/01, foram aplicadas as doses fixas para todos os tratamentos de 65 kg P₂O₅ ha⁻¹ e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, respectivamente. A partir da safra 2006/07, as doses aplicadas consideraram a elevação do conteúdo de fósforo no solo na camada de 0-0,10 m a 10mg dm⁻³.

A adubação potássica foi realizada utilizando cloreto de potássio e até o ano agrícola de 2005/2006 foi realizada considerando a aplicação de 70% de K₂O em relação à quantidade de nitrogênio aplicado em cada nível de intensificação do pastejo. No menor nível de intensificação NI₁ foram aplicados 60 kg K₂O ha⁻¹. A partir de 2006, a adubação potássica foi realizada com objetivo de elevar a saturação deste elemento a 5% da capacidade de troca de cátions no solo.

Quadro 4.3. Histórico da aplicação de fertilizantes e corretivos

Ano	Nível de intensificação do pastejo	N	P ₂ O ₅ ----- Kg ha ⁻¹ -----	K ₂ O	Calcário t ha ⁻¹
1997/98	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
1998/99	NI ₁	0	65	60	1,00
	NI ₂	150	65	105	1,12
	NI ₃	300	65	210	1,46
	NI ₄	450	65	315	1,70
1999/00	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
2000/01	NI ₁	0	60	60	1,00
	NI ₂	150	60	105	1,00
	NI ₃	300	60	210	1,00
	NI ₄	450	60	315	1,00
2001/02	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
2002/03	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
2003/04	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
2004/05	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
2005/06	NI ₁	0	-	60	-
	NI ₂	150	-	105	-
	NI ₃	300	-	210	-
	NI ₄	450	-	315	-
2006/07	NI ₁	0	30	87	-
	NI ₂	150	25	73	-
	NI ₃	300	0	112	-
	NI ₄	450	20	137	-
2007/08	NI ₁	0	25	40	0,35
	NI ₂	150	8	60	0,44
	NI ₃	300	14	35	0,72
	NI ₄	450	0	35	1,08
2008/09	NI ₁	0	10	45	-
	NI ₂	150	5	75	-
	NI ₃	300	18	20	-
	NI ₄	450	4	10	-

5. Revisão de literatura

5.1. Produção de bovinos sobre pastagens:

O fornecimento de forragens através do pastejo é a forma mais utilizada para a alimentação do rebanho de bovinos no Brasil. A área ocupada com pastagens e forrageiras para corte é de 159 milhões de hectares e desses,

aproximadamente 106 milhões de hectares são explorados com bovinos (IBGE, 2006). O rebanho brasileiro efetivo de bovinos é de 209,5 milhões de cabeças (IBGE, 2010). Este rebanho distribuído em suas categorias animais representa em torno de 120 milhões de unidades animais (1 UA = 450 kg peso vivo).

A avaliação histórica do efetivo de bovinos no Brasil permite observar que o número de animais em 2010 aumentou em 2,65 vezes em relação ao ano de 1970 (Figura 5.1a), por outro lado a área total ocupada com pastagens não demonstraram grandes variações no decorrer dos anos (Figura 5.1b).

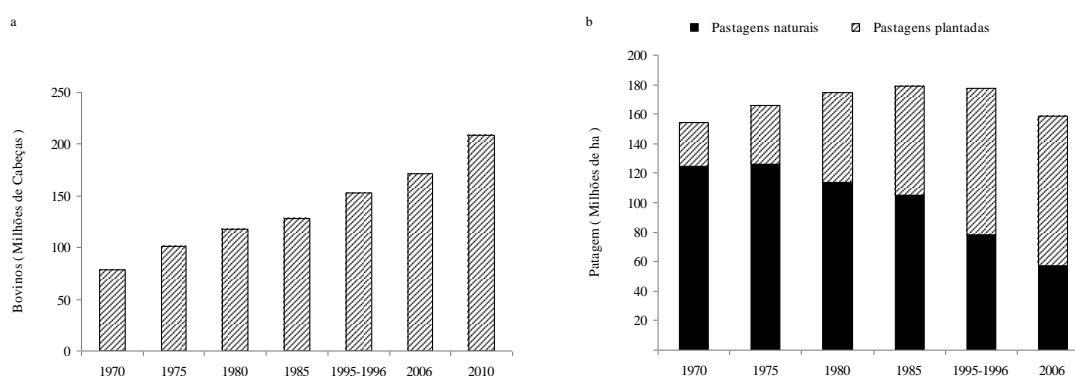


Figura 5.1: Evolução do efetivo de bovinos (a) e das áreas ocupadas com pastagens no Brasil (Fonte: IBGE 2006; IBGE, 2010).

A evolução do rebanho efetivo de bovinos e da área ocupada pelas pastagens demonstra a intensificação da atividade pecuária com forte aumento da pressão sobre as pastagens. O modelo de intensificação utilizado na expansão da produção pecuária teve como foco principal a substituição das pastagens nativas por pastagens mais produtivas e de melhor qualidade nutricional (Figura 1b) o que permitiu dobrar a taxa de lotação animal sobre as pastagens.

A substituição das pastagens naturais por pastagens mais produtivas, exploradas de forma extrativista proporcionou sérias consequências ao sistema produtivo em virtude da deflagração do processo de exaustão e degradação dos solos, condicionando a redução da capacidade produtiva das pastagens.

A degradação das pastagens ocorre inicialmente pela perda de vigor e produtividade, por causa da falta de reposição dos nutrientes exportados durante o processo de pastejo, ou perdidos pela lixiviação e escoamento superficial (Zimmer e Euclides, 2000). A próxima fase é a invasão das pastagens por plantas

daninhas doenças e pragas que reduzem a quantidade e qualidade nutricional do alimento ofertado aos animais e o sistema entra em colapso, porque as pastagens passam a não suportar as taxas de lotação animal e, com isso, inicia-se o processo de degradação dos solos (Figura 5.2).

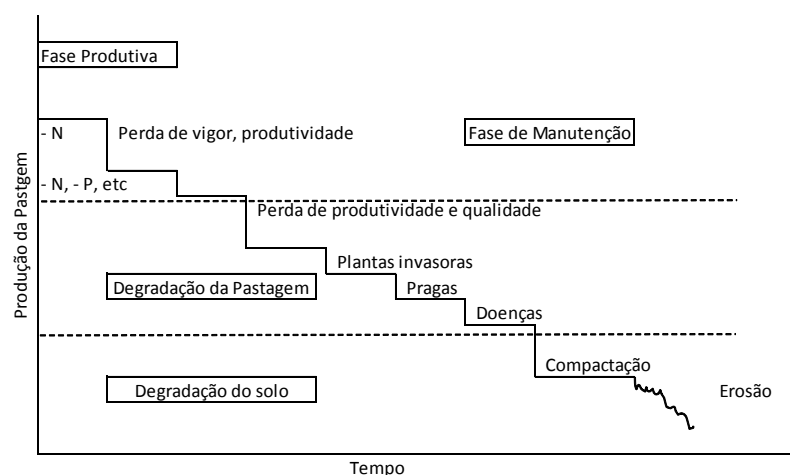


Figura 5.2: Processo de degradação das pastagens (Fonte: Macedo 2001)

A degradação dos solos e a redução da capacidade produtiva das pastagens plantadas contribuem para que as produções por animal individual e por hectare se situem em níveis cada vez mais próximos aos obtidos anteriormente em pastagens naturais (Barcellos, 1996).

As projeções de aumento do poder aquisitivo e o crescimento vegetativo da população indicam um aumento da demanda de produtos de origem animal (Balsalobre et al., 2002). Para que o sistema de produção pecuário suporte esta demanda há necessidade do aumento do rebanho animal ou das atuais taxas de desfrute (Quadro 5.1).

Quadro 5.1. Relação entre o tamanho do rebanho de bovinos e a taxa de desfrute com o incremento da oferta de animais para o abate considerando a intensificação das pastagens plantadas.

Rebanho total (mil cabeças)	Desfrute (% do rebanho)	Aumento do Rebanho (mil cabeças)	Lotação UA ha ⁻¹	Taxa de lotação Pastagens plantadas	
				UA ha ⁻¹	% de aumento
160.000	20,7	0	0,54	1,12	0
166.000	20,0	6.000	0,56	1,05	4,50
174.000	19,0	14.000	0,58	0,98	10,5
184.000	18,0	24.000	0,62	0,92	17,7
195.000	17,0	35.000	0,65	0,87	26,2
207.000	16,0	47.000	0,70	0,82	34,5

Fonte: Adaptado de Balsalobre et al., 2002

O aumento da produção de carne por meio da taxa de desfrute está associado ao melhoramento dos índices de fertilidade e de desmama e ao aumento do ganho de peso dos animais. Nos últimos anos, tem-se observado uma significativa melhoria dos índices zootécnicos do rebanho nacional, sendo que a tecnologia disponível para se produzir animais terminados com menos de 18 meses de idade é comum entre os pecuaristas. No entanto, o valor de venda da arroba engordada é um fator limitante, sendo que, em patamares inferiores a US\$ 20,00 inviabiliza boa parte das tecnologias disponíveis para acelerar o processo de engorda de bovinos. Por outro lado, o aumento da produção de carne por meio da ampliação do rebanho e, conseqüentemente, de uma maior taxa de lotação animal, pode ser obtido com a adoção de práticas de fertilização dos solos sob pastagens (Balsalobre et al., 2002). A fertilização dos solos permite o aumento da produtividade de forragem permitindo o aumento da taxa de lotação animal sem alteração da oferta individual de forragem. Com isso, o aumento do rebanho não implica em incremento da área ocupada por pastagens.

A atividade pecuária se encontra, portanto, diante de um desafio para alcançar a sustentabilidade que depende de premissas de coerência ecológica, equilíbrio energético e viabilidade socioeconômica.

Do ponto de vista técnico, a sustentabilidade passa pela adequação das técnicas de manejo às condições edafoclimáticas da região de exploração dos sistemas pecuários. Nos trópicos, em que há condições climáticas favoráveis, o aumento da produção de plantas forrageiras associada a práticas adequadas de manejo dos animais e das pastagens permite ganho de peso animal de 1200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Corsi, 1994).

A estratégia utilizada para recuperação da capacidade produtiva das pastagens depende do grau de degradação em que esta se encontra. Quando a pastagem se encontra na fase inicial de degradação com perda da produtividade, mas a espécie forrageira de interesse ainda ocupa a quase totalidade área e não há alta incidência de espécies invasoras é possível fazer a recuperação da pastagem. Por outro lado, se o nível de degradação não permite a recuperação, a pastagem deve ser reformada podendo ou não substituir a espécie forrageira explorada.

Para obtenção do sucesso na reforma ou recuperação das pastagens a adequação da fertilidade dos solos é fundamental. A fertilização dos solos proporciona o incremento da produtividade e melhoria da qualidade nutricional das pastagens que consiste na forma mais barata de alimentação do rebanho. O nitrogênio, dentre os nutrientes, é o principal responsável pela produção das plantas forrageiras. O efeito da adubação nitrogenada na produção de massa seca está relacionado com a taxa de expansão foliar que pode ser duplicada pela aplicação do nitrogênio sem a necessidade do aumento do número de folhas por perfilho (Lemaire e Chapman, 1996). Porém, os níveis críticos de aplicação de insumos, relacionados à máxima produção de forragens, nem sempre são condizentes com a viabilidade econômica da produção animal (Salles e Gonçalves, 1981; Lugão, 2001). A dose ótima econômica de adubação depende do preço do fertilizante, do preço do produto animal e da eficiência de transformação do nutriente da forragem em produção animal, o que pode ser expresso pela relação kg de carne ou leite/kg de nutrientes adicionados ao solo (Gomide, 1994).

Outro fator importante é o manejo das pastagens e dos animais. A adequação da taxa de lotação animal a disponibilidade de alimentos (controle da oferta) permite garantir a nutrição adequada dos animais garantindo o ganho de peso individual. A associação do aumento da produtividade da pastagem e da adequação da oferta de forragem garante a maior produtividade animal por área de pastagem explorada. No entanto, esse aumento da produtividade animal está ancorado no aumento das taxas de lotação animal, que em muitos casos está associada à compactação dos solos reduzindo a capacidade de desenvolvimento do sistema radicular (Pagotto, 2001) com consequente redução do potencial produtivo das espécies forrageiras.

5.2. Compactação dos solos em pastagens

O processo de compactação nos solos resulta da ação de forças externas e internas. Nos solos tropicais as forças internas são resultantes da expansão e

contração de massa no qual o solo é submetido pelos ciclos de secamento e umedecimento que ocorrem no decorrer do desenvolvimento das plantas. A exposição do solo e a consequente perda de água por evaporação dependem do hábito de crescimento da espécie forrageira e da intensidade de pastejo a que é submetida (Cantarutti et al., 2001). O tipo, a intensidade e a frequência da carga aplicada caracterizam os fatores externos que afetam o nível de deformação que o solo sofrerá (Dias Junior e Estanislau, 1999).

Em áreas sob pastagem, a compactação do solo está associada à pressão do casco dos animais sobre a superfície dos solos (Greenwood e McKenzie, 2001; Sarmiento et al., 2008). A pressão exercida pelo casco dos animais é função da massa corporal, área do casco e da energia cinética exercida sobre os solos (Greenwood e McKenzie, 2001). As pressões proporcionadas pelo pisoteio de animais explorados zootecnicamente são superiores àquela exercida por máquinas agrícolas. A pressão de 190 kPa decorrente do pisoteio de um bovino adulto é, por exemplo, 106% maior que aquela proporcionada por um trator agrícola (Greenwood e McKenzie, 2001). Assim, a intensificação do pastejo pelo aumento da taxa de lotação animal (relação entre o número de unidades animais e a área ocupada por eles, UA ha⁻¹ dia⁻¹) e da pressão de pastejo (relação entre o peso animal em kg e a quantidade de forragem disponível, kg peso vivo animal kg⁻¹ massa seca forragem dia⁻¹) são as principais causas relacionadas à compactação dos solos nos sistemas de produção animal a pasto (Silva et al., 2002; Hamza e Anderson, 2005; Bertol et al., 2006; Leão et al., 2006).

A susceptibilidade dos solos à compactação depende de sua compressibilidade, que é influenciada pela textura, estrutura, densidade inicial, teor de matéria orgânica e conteúdo de água no solo. De maneira geral, solos de textura mais fina e com agregados menos estáveis são mais suscetíveis à compactação do que solos mais arenosos (Cantarutti et al., 2001).

Na literatura, são escassos os trabalhos que avaliam indicadores de qualidade do solo em condições em que a intensificação do pastejo venha acompanhada do aumento da produtividade das pastagens, fruto esse da fertilização dos solos. Estudos desta natureza podem definir a capacidade suporte

dos solos, à pressão exercida pelo pisoteio dos animais nos diferentes níveis de intensificação da produção aliando a viabilidade econômica da atividade à conservação dos solos e a manutenção dos níveis de produtividade das espécies forrageiras.

As alterações de indicadores da qualidade do solo têm ação direta no desenvolvimento do sistema radicular das plantas. O solo constitui um meio formado por material sólido e espaços porosos ocorrendo o crescimento radicular. Nesse espaço, entre raiz e solo, duas forças se opõem: a pressão radicular gerada por mecanismos biofísicos da planta e a impedância mecânica ou resistência do solo à penetração das raízes causada pelas forças de coesão e fricção entre os sólidos do solo. Quando a pressão radicular é maior que estas forças, a raiz cresce. Por outro lado, quando a planta não consegue produzir suficiente pressão radicular, a raiz não se desenvolve e compromete o crescimento da parte aérea das plantas (Libardi e Lier, 1999).

A pressão radicular depende, além de fatores genéticos, do ambiente radicular. A raiz não terá capacidade em desenvolver todo o seu potencial quando não encontra um ambiente adequado quanto à aeração, umidade e temperatura. A umidade do solo ocupa posição crucial na composição do ambiente radicular, pois outros dois fatores, de grande importância, a temperatura e a aeração, são altamente dependentes da umidade (Libardi e Lier, 1999). Assim, a caracterização dos efeitos do sistema de uso e manejo do solo sobre sua qualidade física deve ser quantificada por medidas integradoras destas modificações (Araújo et al., 2004).

5.3. Qualidade do solo

A qualidade consiste na capacidade do solo, dentro dos limites de um sistema natural ou manejado, manter a produtividade e biodiversidade animal e vegetal, melhorar a qualidade do ar e da água e contribuir para a habitação e saúde humana (SSSA, 2011).

A avaliação quantitativa da qualidade do solo é fundamental na determinação da sustentabilidade dos sistemas de manejo agropecuários (Shukla et al., 2006). Desta forma, a determinação de indicadores de qualidade de solo é necessária para a identificação de áreas problemáticas, identificar técnicas de manejo inadequadas, fazer estimativas da produtividade das culturas, monitorar mudanças na qualidade ambiental e auxiliar agências governamentais a formular e avaliar políticas agrícolas de uso da terra.

Indicadores apropriados para avaliar a qualidade do solo devem ter a habilidade de considerar componentes múltiplos relacionados à capacidade do solo em desempenhar suas funções. Esses podem ser classificados, de um modo geral, em quatro grupos; visuais, físicos, químicos e biológicos. Embora esta divisão em grupos seja usual, é importante salientar que estes atributos e processos, em sua maioria, são inter-relacionados (Gomes et al., 2006).

Os melhores indicadores da qualidade do solo são aqueles que integram os efeitos combinados de diversos atributos ou processo do solo, os quais devem ser precisos, simples para o uso e terem sentido, ou seja, devem estar associados à função para a qual se pretende usar. Necessitam, para que possam ser usados com eficiência, de padrões ou valores críticos. Portanto, um bom indicador deve ser de fácil medida, respondendo as mudanças propostas, estar relacionado com os requerimentos de qualidade do solo, e ter um limite claro entre o que é sustentável e não sustentável.

Os indicadores visuais podem ser obtidos a partir da interpretação de fotografias aéreas. Ou através de observações diretas, como a exposição do subsolo, mudança de cor do solo, escoamento superficial, resposta da planta, espécies de plantas daninhas predominantes, entre outras. Evidências visuais podem indicar que a qualidade do solo está ameaçada ou passando por alterações (Gomes et al., 2006).

Os indicadores físicos estão relacionados ao arranjo das partículas e do espaço poroso do solo, incluindo densidade, porosidade, estabilidade de agregados, textura, encrostamento superficial, compactação, condutividade hidráulica e capacidade de armazenagem de água disponível. Refletem,

primariamente, limitações ao crescimento radicular, a emergência das plântulas, a infiltração e ou movimento da água no interior do perfil do solo e a disponibilidade de água, ar e nutrientes para as plantas (Gomes et al., 2006).

O pH, salinidade, capacidade de troca de cátions, capacidade de suprimento de nutrientes às plantas, concentrações de elementos que podem ser potencialmente contaminantes (metais pesados, compostos radioativos, etc.) ou necessários para o crescimento e desenvolvimento das plantas são considerados indicadores químicos. As condições químicas do solo afetam as relações solo-planta, a qualidade da água, o poder tampão, a disponibilidade de nutrientes e de água para as plantas e outros organismos, mobilidade de contaminantes e algumas condições físicas, como a tendência de formação de crostas superficiais.

Entre os indicadores biológicos estão incluídos: a matéria orgânica, a diversidade de espécies, a massa microbiológica, o nível de respiração do solo, que possibilitam avaliar a atividade microbiológica (Gomes et al., 2006).

5.4. Indicadores de qualidade física do solo relacionados as áreas sob pastagem

Sob o ponto de vista dos indicadores físicos da qualidade do solo a porosidade, densidade e resistência do solo à penetração são os indicadores mais amplamente discutidos na literatura (Moreira et al., 2012; Cavallini et al., 2010; Sarmiento et al. 2008).

A porosidade do solo é uma propriedade facilmente alterada pela compressão do casco dos animais sobre os solos. A compressão do casco dos animais sobre os solos pode reduzir o espaço poroso do solo pela aproximação entre as partículas de solo. Por outro lado, diversos trabalhos mostram que o impacto do pisoteio dos animais apenas alterou a distribuição entre macroporos e microporos do solo não interferindo no volume total de poros no solo (Sarmiento et al., 2008).

A macroporosidade, representada pelo espaço entre os agregados, influencia diretamente a capacidade de infiltração de água no solo, drenagem e aeração do solo (Hillel, 1998) e apresenta estreita relação com o

desenvolvimento do sistema radicular (Hatano et al., 1988). Valores de macroporosidade menores que $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são considerados críticos para o desenvolvimento das plantas (Vomocil e Flocker, 1966). A microporosidade, por sua vez pode favorecer o processo de retenção de água no solo (Oliveira et al., 2004).

Reynolds et al. (2002) propuseram o desdobramento do volume total de poros em porosidade no domínio dos macroporos e a porosidade no domínio da matriz do solo que distinguem os poros grandes (maiores que 0,30 mm) formados pela ação biológica das raízes ou pela macro e mesofauna do solo (bioporos) dos poros provenientes da formação de macro e microagregados (matriz do solo) que possuem diâmetro inferiores a 0,30 mm.

Outro desdobramento proposto por Reynolds et al. (2002) foi a separação dos poros maiores que 0,03 mm responsáveis pela aeração do solo (Capacidade de aeração total). Dentro desta classe, ainda há a ocorrência da capacidade de aeração da matriz do solo que corresponde aos poros que apresentam entre 0,03 e 0,3 mm e representam a classe de diâmetro de poros drenados rapidamente. Os poros responsáveis pela capacidade de retenção de água no solo, menores que 0,03 mm, são representados pela capacidade de campo.

Solos com boa qualidade para o desenvolvimento das plantas requerem um balanço entre a aeração e a retenção de água no solo (Letey, 1985). Olness et al. (1998) propõem que o equilíbrio ideal entre a aeração e a retenção de água no solo ocorre quando a capacidade de aeração total representa 34 % da porosidade total e a capacidade de campo representa 66 % da porosidade total.

A densidade do solo é um atributo do solo de fácil mensuração e expressa a massa de sólidos em um volume determinado (Blake e Hartge, 1986) desta forma, pode refletir as alterações da estrutura do solo decorrentes da pressão sobre o solo causada pelo pisoteio dos animais. Solos com valores elevados de densidade apresentam baixa estrutura podendo comprometer a aeração e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Poulsen et al., 1998). Solos com mineralogia e composição granulométrica diversas, ou ainda, com composição similar, mas originados de diferentes processos pedogenéticos

apresentam densidades críticas distintas (Hakansson e Voorheess, 1998). Jones (1983) determinou que para solos com predominância da fração areia valores de densidade até $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ não teria restrição ao desenvolvimento das raízes e valores de densidade acima de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ afetariam severamente o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Em solos com predominância da fração argila o intervalo de densidade do solo favorável ao desenvolvimento do sistema radicular foi de $1,2$ a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$.

A resistência do solo a penetração fornece indicações rápidas do grau de compactação do solo e tem importância na avaliação dos efeitos do sistema de manejo sobre o ambiente radicular das plantas (Benghough e Mullins, 1990). A redução da qualidade estrutural dos solos pode criar ambientes desfavoráveis ao crescimento radicular. As plantas podem identificar essa condição de estresse, e, em casos críticos, há o envio de sinais de inibição a parte aérea para controle da expansão foliar (Davies e Zhang, 1991; Tardieu, 1994). Em solos compactados e sob secamento, os sinais de inibição ocorrem associados ao aumento da resistência do solo à penetração (Passioura e Gardiner, 1990). Valores de resistência à penetração entre 2 e 3 MPa são considerados limitantes ao crescimento de várias culturas anuais (Taylor e Burnett, 1964; Gupta e Allmaras, 1987; Vepraskas, 1984). Para pastagens o valor de resistência do solo à penetração associado a limitação do crescimento das raízes é de 2,5 MPa (Imhoff et al., 2000a). Embora a resistência à penetração dependa do teor de água e da densidade do solo (Busscher, 1990), seus valores críticos fornecem indicação da qualidade do solo, tendo em vista sua interferência sobre o crescimento das plantas.

5.5. Matéria orgânica como indicador de qualidade do solo

A matéria orgânica exerce importância como indicador da qualidade do solo por condicionar algumas características químicas, físicas e biológicas essenciais ao desenvolvimento adequado das plantas. Além disso, a matéria orgânica pode fornecer um indicativo da sustentabilidade do manejo

agropecuário adotado. Sob vegetação natural, o conteúdo de matéria orgânica do solo se encontra estável. A utilização agrícola com intenso revolvimento dos solos tem provocado uma redução acentuada no conteúdo de matéria orgânica dos solos (Bayer e Mielnickzuk, 2008).

A manutenção e recuperação dos conteúdos de matéria orgânica e da qualidade do solo podem ser alcançadas pela utilização de pastagens, ou, no caso de sistemas agrícolas intensivos, pela utilização do método de preparo com mínima mobilização do solo e com adição de resíduos vegetais. O aumento da produtividade das pastagens pela fertilização dos solos pode contribuir para o aumento da quantidade de matéria orgânica do solo e com isso melhorar a capacidade de troca de cátions aumentando o potencial produtivo do solo. A melhoria da agregação do solo pode reduzir o impacto do pisoteio animal sobre os solos pelo aumento da porosidade do solo (Bayer e Mielnickzuk, 2008).

6. CAPÍTULO 1: RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO, PRODUÇÃO DE RAÍZES E DE FORRAGEM EM DIFERENTES NÍVEIS DE INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO

6.1 Introdução

A correção e adubação dos solos podem consistir numa forma de intensificação do pastejo, pois proporcionam o aumento da capacidade produtiva das pastagens e da taxa de lotação animal sem alteração da pressão de pastejo sobre o sistema (Lugão et al., 2003; Sarmiento et al., 2005). Essa estratégia é fundamental para a viabilidade econômica da atividade pecuária, potencializando o aumento da receita por área sem comprometimento do ganho de peso individual dos animais. Assim, a sustentabilidade dos sistemas pecuários está ancorada na manutenção da produtividade das espécies forrageiras, que por sua vez, dependem da manutenção da estrutura da pastagem e da qualidade física, química e biológica dos solos em condições adequadas ao desenvolvimento das plantas.

O pisoteio animal pode afetar diretamente a pastagem causando dano mecânico sobre a forragem e, indiretamente sua produtividade, em razão da compactação do solo (Greenwood e McKenzie, 2001). A queda de folhas no solo, a renovação radicular intensa e a deposição dos dejetos animais sobre o solo, por outro lado, podem mitigar o efeito do pisoteio animal sobre a estrutura do solo e produtividade das pastagens (Trujillo et al., 2006). A pressão exercida pelo casco dos animais é função da massa corporal, área do casco e da energia cinética exercida sobre os solos (Greenwood e McKenzie, 2001). Assim, a intensificação do pastejo pelo aumento da taxa de lotação animal (relação entre o número de unidades animais e a área ocupada por eles, $UA\ ha^{-1}\ dia^{-1}$) e da pressão de pastejo (relação entre o peso animal em kg e a quantidade de forragem disponível, $kg\ peso\ vivo\ animal\ kg^{-1}\ massa\ seca\ forragem\ dia^{-1}$) são as principais causas relacionadas à compactação dos solos nos sistemas de produção animal a pasto

(Bertol et al., 2000; Silva et al., 2002; Hamza e Anderson, 2005; Leão et al., 2006).

Por outro lado, o ajuste da taxa de lotação em função da produtividade da pastagem, a manutenção de uma massa contínua de forragem sobre o solo e um período de descanso para recuperação da pastagem, contribuem para reduzir o impacto de elevadas taxas de lotação animal sobre os solos (Martínez e Zinck, 2004; Fidalski et al., 2008).

Os atributos físicos do solo exercem um papel determinante na produtividade das pastagens. A resistência do solo à penetração (RP) é um dos mais frequentemente utilizados para a avaliação da compactação do solo. Juntamente com o potencial de água e a aeração do solo, a RP tem a vantagem de ser diretamente relacionada com o crescimento das plantas pelo efeito que exerce nos processos metabólicos e funções vitais da planta (Leão et al., 2006). A RP é dependente da textura, da densidade e, principalmente, do conteúdo de água do solo (Oliveira et al., 2007; Blainski et al., 2008), exigindo cuidado na sua utilização e interpretação (Silva et al., 2009).

A qualidade física dos solos é decisiva para o desenvolvimento das plantas, determinando a habilidade das raízes em desenvolverem e explorarem os solos para absorção de água e nutrientes. Para a elongação das raízes é necessário um ambiente físico do solo com espaço poroso suficiente para movimentação de água e gases e quando submetido ao teste de RP não atinja valores impeditivos ao seu desenvolvimento (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Imhoff et al., 2000a). Apesar da relação funcional bem estabelecida entre a RP e o crescimento das raízes os valores da RP medidos pelo uso de penetrômetro podem ser 2,6 a 7,5 vezes maiores do que a pressão realmente exercida pelas raízes das plantas (Clark et al., 2003) em virtude da ação unidirecional do equipamento. A variação entre a pressão das raízes e a resistência ao penetrômetro é menor nos solos arenosos e menos coesivos e maior nos solos argilosos de alta coesão (Torres e Saraiva, 1999). Apesar disso, maiores valores de RP se correlacionam com menor elongação e produção de raízes (Foloni et al., 2006) reduzindo a

capacidade do sistema radicular em absorver água e nutrientes necessários ao metabolismo das plantas (Rosolem et al., 1994).

Estudos reportados na literatura demonstram alterações nos atributos físico-mecânicos do solo decorrentes do pisoteio animal, porém, a grande maioria, não avalia se eles proporcionam danos reais à produtividade da pastagem e à sustentabilidade dos sistemas produtivos.

O noroeste do Paraná é a mais importante região pecuária do Estado e concentra 36% do rebanho bovino paranaense. Os solos da região possuem baixa fertilidade natural e baixas concentrações de matéria orgânica. As pastagens, de maneira geral, encontram-se degradadas e suportam baixas taxas de lotação animal, as quais variam entre 1,07 e 1,41 UA ha⁻¹ dia⁻¹ (Sá e Caviglione, 1999). A deficiência de nitrogênio nas gramíneas tropicais é relatada como um dos principais fatores limitantes para a produção de forragem (Lugão et al., 2003; Primavesi et al., 2006).

A adubação nitrogenada tem demonstrado importante contribuição no aumento da produtividade das pastagens (Oliveira et al., 2005), principalmente, quando a adubação é realizada no período das chuvas ou em sistemas irrigados (Dupas et al., 2010), permitindo o aumento da capacidade suporte das pastagens. Porém o aumento da taxa de lotação animal pode comprometer a qualidade física do solo nas camadas superficiais. A perda da qualidade física do solo por sua vez poderá limitar a produtividade das pastagens tornando o processo de intensificação inviável. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da intensificação do pastejo proporcionados pela adubação nitrogenada sobre a resistência do solo à penetração e o impacto na produção de forragem e de raízes de *Panicum maximum* Jacq.cv. IPR -86 Milênio.

6.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (23° 00'4" S, 42°02'06"O, altitude 460 m), no município de Paranavaí, na região noroeste do Paraná em solo classificado como Argissolo

Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006). A análise de amostras de solo da área experimental indicou os resultados registrados no Quadro 6.1.

Quadro 6.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Horizonte	Profundidade m	Argila -----	Silte g kg ⁻¹ -----	Areia -----	Classe textural
A	0 – 0,20	110	20	870	Areia franca
Bt ₁	0,20 – 0,50	193	13	793	Franco arenoso
Bt ₂	0,50 – 2,00	207	7	787	Franco argilo arenoso

A área experimental foi implantada em 1997, com o objetivo inicial de avaliar o potencial de produção de bovinos de corte em sistema intermitente e carga animal variável sob diferentes níveis de intensificação do pastejo. Resultados obtidos, no período 2007-2009, indicam aumento do nível de intensificação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio em função da adubação nitrogenada (Quadro 6.2).

Quadro 6.2. Descrição dos níveis de intensificação de uso da pastagem, taxa de lotação, ciclos de pastejo e produção de massa seca de forragem no período de 2007-2009, referentes a um valor médio de ocupação de 209 dias no período de verão.

	NI ₁	NI ₂	NI ₃	NI ₄
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	0	150	300	450
Taxa de lotação (UA ha ⁻¹)	1,26	5,57	7,45	8,23
Ciclos de pastejo	1,25	4,06	5,38	5,38
Massa de forragem (kg MS ha ⁻¹ ciclo de pastejo ⁻¹)*	3689	5734	6351	6638

* Corte a 0,20 m em relação ao nível do solo

O capim IPR-86 Milênio foi semeado em outubro de 1995, e foi explorado com diferentes níveis de intensificação do pastejo (NI) desde outubro de 1997, quando se iniciou a fertilização do solo com diferentes doses de nitrogênio. Os níveis de intensificação do pastejo dispostos no Quadro 6.2 foram baseados na taxa de lotação animal, ciclos de pastejo e massa de forragem que variaram em função da aplicação das doses crescentes de nitrogênio: 0, 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, equivalente aos níveis de intensificação de NI₁ até NI₄. A fonte de N utilizada foi o nitrato de amônio e os demais nutrientes foram aplicados de maneira a não restringir o desenvolvimento das plantas, por meio de adubações periódicas com superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário,

aplicados em superfície e sem incorporação. A caracterização química dos solos de cada um dos níveis de intensificação do pastejo pode ser observada no Quadro 6.3.

Quadro 6.3. Caracterização química do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo em amostras de solo coletadas no ano de 2007.

NI	Camada	P ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽¹⁾	V
	m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³			%
NI ₁	0-0,10	9,48	8,51	6,18	0,00	1,99	1,83	1,17	0,23	61.80
	0,10-0,20	2,10	6,06	5,80	0,00	2,11	1,50	0,84	0,17	54.21
	0,20-0,40	1,00	4,43	5,48	0,00	2,27	1,37	0,83	0,14	50.70
NI ₂	0-0,10	13,33	9,42	5,73	0,00	2,23	1,80	0,98	0,23	57.45
	0,10-0,20	2,95	5,40	5,65	0,00	2,20	1,49	0,83	0,11	52.65
	0,20-0,40	1,58	4,94	5,55	0,00	2,28	1,43	0,92	0,10	51.82
NI ₃	0-0,10	11,95	9,73	4,98	0,04	3,01	1,53	0,94	0,40	48.76
	0,10-0,20	2,43	6,79	5,05	0,07	2,80	1,55	0,86	0,18	48.01
	0,20-0,40	1,28	4,53	5,08	0,01	2,64	1,36	0,87	0,09	46.77
NI ₄	0-0,10	15,95	10,32	4,50	0,14	3,91	1,44	0,77	0,37	39.83
	0,10-0,20	3,45	6,65	4,53	0,19	3,36	1,35	0,62	0,19	39.11
	0,20-0,40	1,43	4,78	4,63	0,16	2,89	1,44	0,82	0,10	44.92

(1) Mehlich 1; (2) Walkley-Black; (3) CaCl₂; (4) KCl 1,0 M.

O ajuste da taxa de lotação animal foi comum a todos os tratamentos tendo por base a produtividade da pastagem e a oferta de 70% de matéria seca de lâminas foliares verdes em relação à produção total da forragem. Além disso, considerou-se o consumo diário de 11 kg de folhas verdes por 450 kg de peso vivo animal. O manejo da pastagem foi realizado visando à manutenção do resíduo pós-pastejo entre 20-25% de lâminas verdes em relação à produção em cada nível de intensificação.

Para avaliar o impacto da intensificação do pastejo sobre o solo foram medidos: o conteúdo de água no solo em base de massa (Ug, kg kg⁻¹), a resistência do solo à penetração (RP, MPa); como resposta biológica às condições físicas do solo foram avaliadas a produção de massa seca de forragem (MSF, kg ha⁻¹), de folhas verdes (MSFV kg ha⁻¹) e de raízes (MSR, g dm⁻³).

A amostragem para determinação da MSF e MSFV foi realizada antes da entrada dos animais nos piquetes cortando o capim acima de 0,20 m em relação ao nível do solo. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para laboratório e pesadas para determinação da massa da amostra (MA). Posteriormente, separaram duas alíquotas e pesaram cada uma. A primeira alíquota após a

pesagem foi encaminhada para secagem em estufa a 65°C até atingir massa constante e através da relação entre o material seco e o material verde determinou-se a massa seca (%MS). A segunda alíquota por sua vez foi encaminhada para separação botânica entre folhas, colmo e material morto e encaminhada para secagem em estufa a 65°C até atingir massa constante, assim determinando a percentagem de folhas, colmo e material morto. Os valores de MSF foram calculados mediante o produto entre a MA e a %MS. Por sua vez, a MSFV foi determinada pelo produto entre a MSF e a % de folhas determinada por meio da separação botânica. Os valores de MSF e MSFV representam a fração da pastagem acima de 0,20 m de altura.. A avaliação dos resultados de produção de MSF e de MSFV foi realizada pelo do ajuste de equações de regressão considerando as doses de nitrogênio aplicadas em cada nível de intensificação do pastejo e o delineamento inteiramente ao acaso.

As variáveis Ug, RP e MSR foram avaliadas nos diferentes níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄), em duas posições de coleta: na área abaixo da touceira - CT e na área entre touceiras - ST em quatro camadas de solo (0-0,100; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m). A análise dos dados foi feita para cada camada de solo individualmente, considerando o delineamento experimental inteiramente ao acaso com parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas principais foram formadas pelos níveis de intensificação e as subparcelas formadas pela posição de coleta das amostras.

A amostragem para determinação da MSR foi realizada a partir da coleta de amostras indeformadas utilizando um amostrador com dimensões de 0,1 x 0,1 x 0,1 m. Inicialmente, selecionaram duas touceiras representativas, ou seja, aquelas que visualmente apresentaram maior ocorrência na área experimental em cada nível de intensificação do pastejo, sendo escavadas trincheiras longitudinais ao centro das touceiras com o objetivo de facilitar a retirada das amostras indeformadas. A partir do centro da touceira foram coletadas seis amostras em direção ao lado esquerdo e seis amostras em direção ao lado direito em cada camada de solo avaliada, formando uma malha de amostragem de 12 amostras simples horizontais nas quatro camadas de cada trincheira. Após a identificação e

o acondicionamento em sacos plásticos, as amostras foram encaminhadas ao laboratório e lavadas sobre peneira com malha de 1 mm para separação de solo e raízes. Posteriormente, as amostras de raízes foram secas em estufa com circulação forçada de ar (65°C) por 48 horas, e pesadas para determinação da MSR.

Para ajustar os dados ao desenho experimental, cada lado da trincheira foi considerado uma repetição experimental. Além disso, para adequação do conjunto de dados às posições de coleta (CT e ST), as amostras localizadas a 30 cm do centro da touceira foram consideradas como representativas da posição touceira (CT) e as localizadas de 30-60 cm do centro da touceira foram consideradas como representativas da posição entre touceiras (ST). Essa decisão foi fundamentada pelo diâmetro médio das touceiras determinado antes da abertura das trincheiras. Assim cada unidade experimental foi constituída da média aritmética da MSR de três amostras simples, totalizando 32 unidades experimentais em cada camada de solo.

A Ug e da RP foi realizada simultaneamente em três épocas distintas acompanhando o secamento do solo (05/06/2008, 01/07/2008, 10/07/2008). O banco de dados de RP e teor de água no solo apresentados neste trabalho, para comparação entre os níveis de intensificação e posição de coleta das amostras foram formados pela média dos valores obtidos nas três datas de coleta. Para determinação do Ug foram coletadas duas subamostras em cada uma das repetições de cada nível de intensificação de pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄), posição de coleta (CT e ST) e camadas de solo (0-0,100; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m). As subamostras de cada unidade experimental foram acondicionadas em latas de alumínio, tampadas e encaminhadas para o laboratório para determinação na massa de solo e de água. O Ug foi determinado pela razão entre a massa de água e a massa de sólidos.

Ao redor de cada ponto de coleta de amostras para determinação do Ug foram realizadas 10 medidas de RP utilizando um penetrômetro equipado com haste e cone com diâmetro de base de 7,94 mm. O equipamento foi configurado para obter leituras em intervalos de 1 cm até 40 cm de profundidade, totalizando

1.920 pontos de leitura (10 pontos x 2 subamostras x 4 níveis de intensificação x 2 posições de coleta x 4 repetições x 3 épocas de amostragem) e 76.800 medidas de RP (1920 pontos de leitura x 40 profundidades). Para padronização dos dados foi considerado a média das medidas de RP em cada nível de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) em cada posição (CT e ST) e em cada camada de solo (0-0,100; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m). A análise das variáveis foi realizada individualmente em cada camada de solo uma vez que o trabalho não teve o objetivo de comparar a Ug, a MSR e a RP entre as camadas de solo. Decorrente do fato que o solo avaliado apresenta variação em sua granulometria e fertilidade no perfil (Quadros 6.1 e 6.3).

A análise dos dados foi realizada utilizando os softwares estatísticos SAS e SISVAR. As médias dos efeitos isolados (nível de intensificação e local de amostragem) foram desdobradas, independente da significância dos valores de “F” das interações na análise de variância principal. Para comparação das médias foi utilizado o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). O estudo da dependência da RP em relação ao Ug (Equação 1) e entre produção de MSR e RP (Equação 2) foi realizado utilizando o procedimento para ajuste de regressões não lineares disponível no pacote estatístico SAS.

$$RP = a Ug^b \quad (1)$$

$$MSR = a RP^b \quad (2)$$

Consideraram os modelos com valores de $p < 0,05$ pelo teste “F”. Além disso, testaram os coeficientes do modelo por meio do intervalo de confiança assintótico considerando o nível de significância de 5%. Os coeficientes foram considerados significativos quando se enquadraram dentro do intervalo de confiança assintótico (Schabenberger, 2010). Os valores do coeficiente de dispersão (R^2) determinados para as equações 1 e 2 foram obtidos pela validação cruzada entre os valores preditos pelo modelo ajustado e os valores observados. Para determinação do valor crítico de RP para produção de MSR foi utilizado o método gráfico proposto por Cate e Nelson (1971).

6.3 Resultados e discussão

A intensificação do sistema de produção do *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio pela adubação nitrogenada proporcionou aumento na produtividade da massa seca de forragem (MSF) e massa seca de folhas verdes (MSFV), demonstrando a importância do nitrogênio no incremento da produção das pastagens (Figura 6.1).

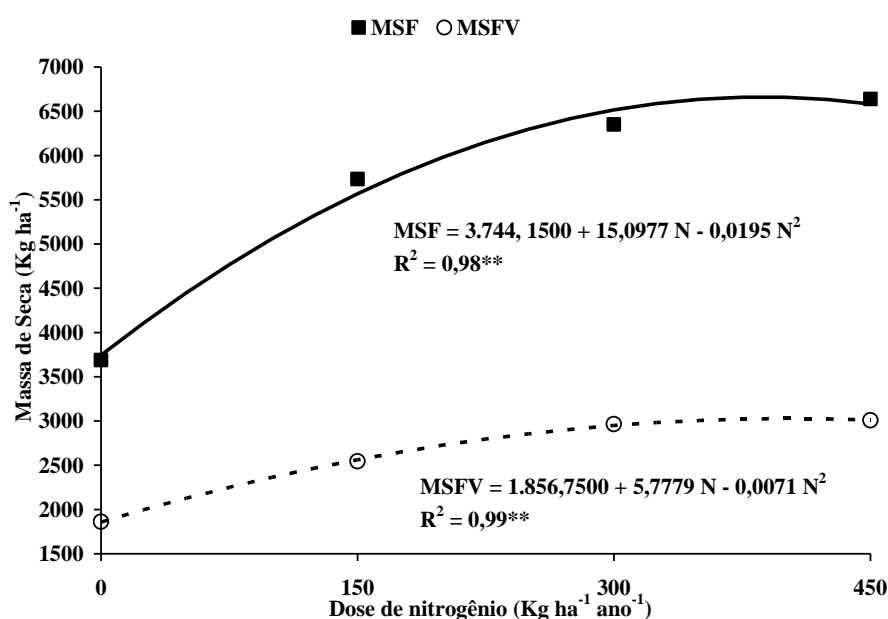


Figura 6.1. Produtividade média da massa seca total (MSF) e da massa seca de folhas verdes (MSFV) do *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR – 86 Milênio em função da adubação nitrogenada referente à média das safras 2007/08 e 2008/09. Os símbolos ** indicam que os modelos ajustados foram significativos com $F < 0,01$.

O ganho de produtividade da pastagem proporcionada pela adubação nitrogenada aumentou os teores de carbono no solo e, consequentemente, a capacidade de troca de cátions (CTC). Por outro lado, houve aumento nos valores da acidez do solo, potencial, ativa e trocável, decorrente do processo de nitrificação ocorrido em consequência, principalmente, da aplicação das mais altas doses de nitrogênio (Cantarella, 2007). Como as cargas geradas pelo aumento da CTC foram ocupadas por componentes da acidez, produzidos, predominantemente, pela reação do fertilizante nitrogenado no solo, ocorreu

redução nos valores de saturação por bases nos tratamentos mais intensificados (Quadro 6.3). Esses resultados indicam que quando se utiliza elevadas doses de adubação nitrogenada, como forma de intensificação da produção de pastagem, a frequência de monitoramento da acidez do solo deve ser aumentada e sua correção realizada, a fim de potencializar a resposta das plantas forrageiras à adubação nitrogenada.

A produtividade máxima de MSF estimada (6.666 kg ha^{-1}) ocorreu para a dose de $387 \text{ kg de N ha}^{-1}$. A dose estimada para a máxima produtividade de MSF encontrada neste trabalho foi semelhante à encontrada por Lugão et al. (2003), $396 \text{ kg de N ha}^{-1}$, e Sarmento et al. (2005), $350 \text{ kg de N ha}^{-1}$, que avaliaram a resposta da produção da massa seca de forragem à adubação nitrogenada neste mesmo experimento nas safras 1998/99, três anos após a implantação e 2001/02, cinco anos após a implantação, respectivamente. Esses resultados demonstram a viabilidade técnica da adubação nitrogenada para o incremento da produtividade da pastagem mesmo após 10 anos de exploração do sistema de produção.

Do ponto de vista da produção animal, a MSFV, torna-se mais importante uma vez que a degradabilidade da matéria seca e o teor de proteína bruta nas folhas é maior em relação ao colmo, sendo a folha a parte da planta mais nutritiva para os animais conforme Campos et al. (2002). Como aconteceu com a MSF, a MSFV respondeu de forma quadrática à adubação nitrogenada (Figura 6.1). A produtividade máxima estimada de MSFV foi de 3032 kg ha^{-1} para a dose de $407 \text{ kg de N ha}^{-1}$. As produtividades máximas estimadas de MSFV obtidas por Lugão et al. (2003), 4.425 kg ha^{-1} , e Sarmento et al. (2005), 3.386 kg ha^{-1} foram obtidas com as doses de $396 \text{ kg de N ha}^{-1}$ e $320 \text{ kg de N ha}^{-1}$, respectivamente. A menor produtividade de MSFV durante a safra 2001/02, em relação à safra 1998/99, avaliada por Lugão et al. (2003) foi justificada por Sarmento et al. (2005) em razão da compactação do solo e a redução da precipitação durante os dois últimos ciclos de pastejo.

Os resultados obtidos por Sarmento et al. (2005) indicam que neste experimento as principais modificações físicas do solo associadas à compactação foram a redução da quantidade de macroporos e aumento da quantidade de

microporos em função do aumento do nível de intensificação de pastejo (doses de nitrogênio 0, 150, 300, e 450 kg ha⁻¹) definidos nesse trabalho como NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄. Sarmento et al. (2005) não verificaram diferença da resistência do solo à penetração entre os níveis de intensificação de pastejo quando o conteúdo médio de água no solo foi de 0,09 kg kg⁻¹ de solo para as camadas de 0-0,100; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Porém, em uma segunda avaliação, com o solo mais seco, os autores obtiveram diferença significativa entre os níveis de intensificação do pastejo. O maior valor de RP (7 MPa) foi observado no tratamento NI₁ e foi associado ao menor conteúdo de água no solo durante o período de coleta das amostras enquanto o menor valor de RP (2,9 MPa) foi encontrado no tratamento NI₂, que foi associado a maior produção de raízes.

A dependência da resistência do solo à penetração (RP) em função do conteúdo de água no solo (Ug) está amplamente registrada na literatura (Busscher, 1990; Imhoff et al., 2000a; Lima et al., 2006; Oliveira et al., 2007; Blainski et al., 2008) de modo que essa relação deve ser levada em conta quando se deseja comparar sistemas produtivos distintos. Neste trabalho, por se tratar de um mesmo sistema de produção, os modelos ajustados (Figura 6.2) tiveram o objetivo de evidenciar a dependência distinta da RP em função do Ug entre as camadas de solo demonstrando a importância de discutir, separadamente, camadas que compõem diferentes horizontes com granulometria distinta, como é o caso do Argissolo Vermelho Distrófico avaliado neste trabalho.

O secamento do solo, decorrente da evaporação e da transpiração das plantas, evidenciou que a camada de solo 0-0,10 m proporcionou menores acréscimos nos valores de RP quando comparadas às demais camadas de solo avaliadas. A camada de 0,10-0,20 m teve um comportamento intermediário enquanto as camadas de 0,20-0,30 e 0,30-0,4 m foram as que tiveram maior dependência do Ug para manter a RP em valores não restritivos ao desenvolvimento das plantas. Considerando o valor de 2,5 MPa, indicado por Imhoff et al. (2000a) como valor limitante ao desenvolvimento adequado das gramíneas, as camadas de 0-0,100; 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m deveriam ter valores de Ug superiores a 0,046, 0,073, 0,098 e 0,104 kg kg⁻¹,

respectivamente (Figura 6.2) para a $RP < 2,5$ MPa.

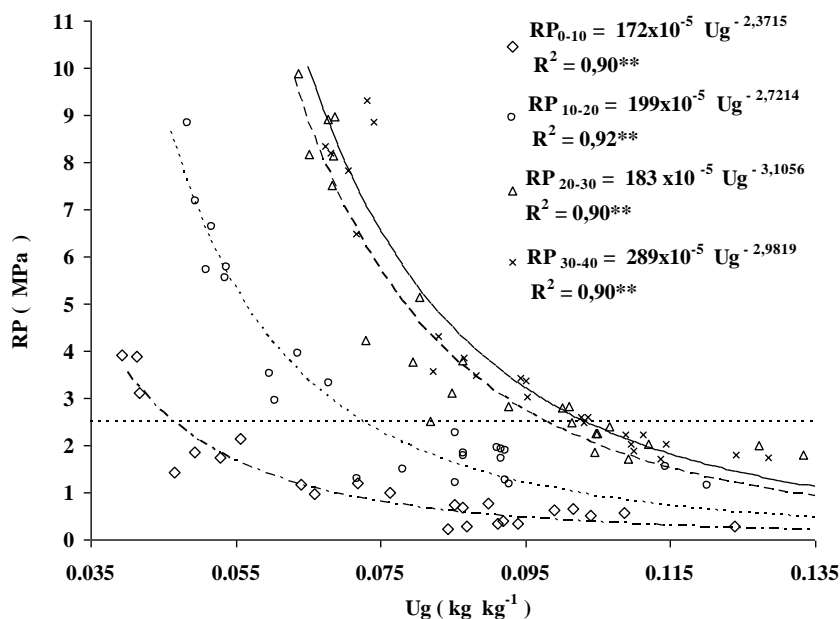


Figura 6.2. Variação da resistência à penetração (RP) em função do conteúdo de água no solo (Ug) nas diferentes camadas do solo estudado em três datas de avaliação. O símbolo ** indica que os modelos ajustados foram significativos ($F < 0,01$).

Neste trabalho, a variação de RP apresentada na Figura 6.3 não foi ajustada em função da variação de Ug, porque neste caso o Ug também é uma variável dependente do sistema de intensificação avaliado. O aumento da produtividade das pastagens e o maior número de pastejo (Quadro 6.2) proporcionados pela adubação nitrogenada aumentam a exigência hídrica dos tratamentos mais intensificados pela maior quantidade de folhas transpirando como demonstrado por Carlesso (1995). Os dados de RP e Ug representados na Figura 6.3 refletem os valores médios de um período de secamento do solo, objetivando assim refletir melhor a variação desses indicadores durante o processo de produção.

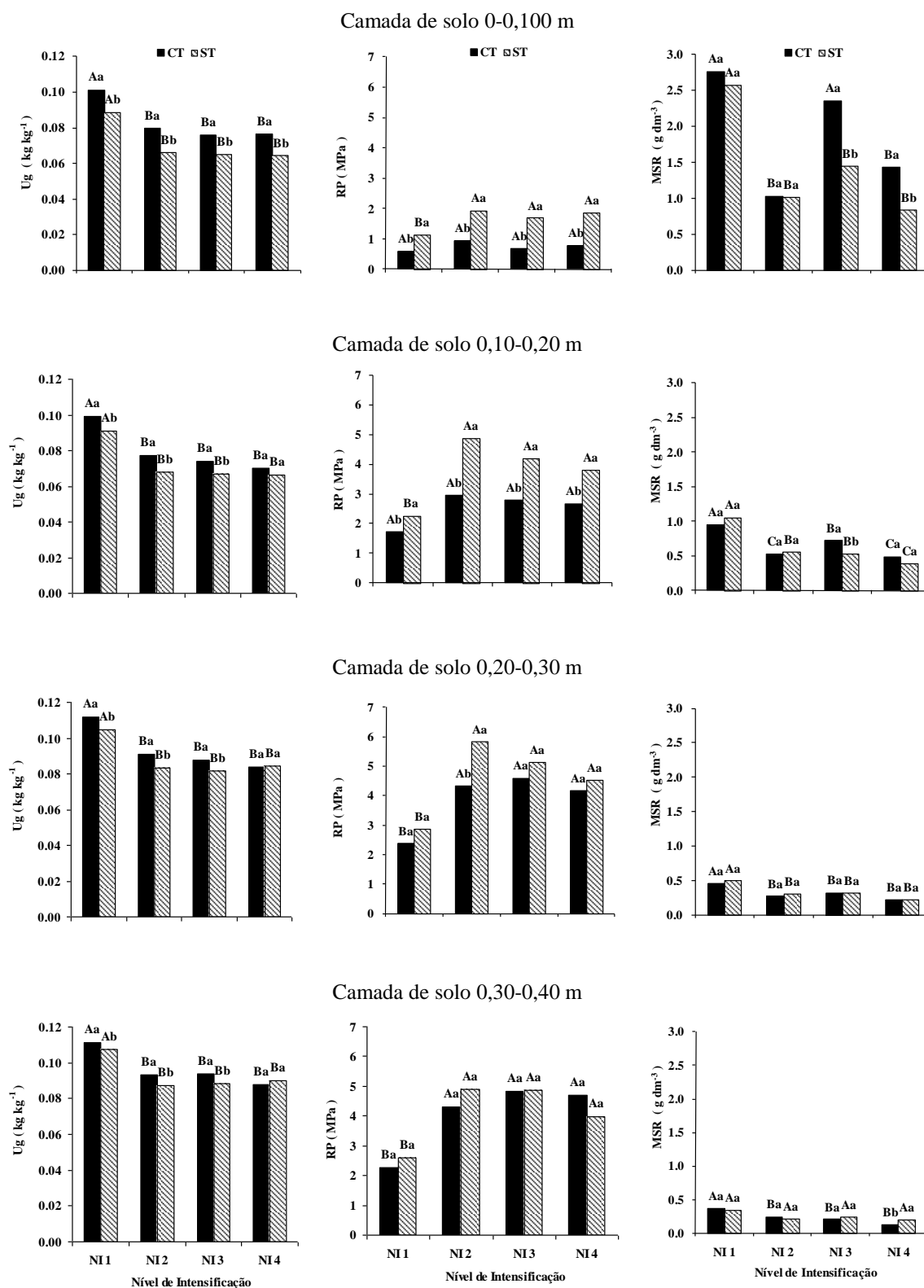


Figura 6.3. Conteúdo de água no solo (Ug), resistência do solo à penetração (RP) e massa seca de raízes (MSR) em função do nível de intensificação do uso da pastagem (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (colunas em preto) e na posição ST (colunas com hachuras). Letras minúsculas comparam as posições (CT e ST) em cada nível de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).

A RP variou em função da intensificação do pastejo e da posição de coleta das amostras (Figura 6.3). Na posição da touceira (CT), não houve incremento da RP entre os níveis de intensificação do pastejo nas camadas de 0-0,100 e 0,10-0,20 m corroborando os resultados obtidos por Sarmiento (2005), indicando que o aumento da taxa de lotação e dos ciclos de pastejo proporcionados pela adubação nitrogenada não comprometem a qualidade física do solo na posição da touceira (CT). Observa-se, ainda, que na camada de 0-0,100 m não houve valores de RP superiores ao valor limite (2,5 MPa), sugerindo que a ação do sistema radicular da pastagem e a deposição de matéria orgânica vegetal e animal sobre o solo contribuíram para mitigar os efeitos negativos do pisoteio animal sobre a estrutura do solo, como foi relatado por Trujillo et al. (2006).

Quando se avaliou a RP nas mesmas camadas de solo e na posição entre as touceiras (ST), verificou-se um incremento da RP nos níveis de intensificação do pastejo NI₂, NI₃, NI₄ em relação à menor intensificação NI₁, demonstrando que na posição ST a intensificação do pastejo contribuiu para o aumento da RP (Figura 6.3). Esses resultados são justificados pelo hábito de crescimento cespitoso da espécie *Panicum maximum* que direciona o pisoteio animal na região entre as touceiras e cria uma zona de proteção na região da touceira. Além disso, observa-se que os valores de RP nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m na área de pisoteio dos animais, ST, foram sempre superiores a região protegida pela touceira, CT.

Os resultados observados neste trabalho foram semelhantes aos encontrados por Oliveira et al. (2007) em Latossolo Vermelho argiloso cultivado com *Panicum maximum* cv. Tanzânia e por Imhoff et al. (2000b) em Terra Roxa Estruturada eutrófica cultivada com *Pennisetum purpureum* Schum. Imhoff et al. (2000b) associaram os maiores valores de RP na área entre touceiras ao aumento da densidade do solo em relação a posição abaixo da touceira e os menores valores de densidade do solo na posição da touceira foram associados a maior produção de raízes e matéria orgânica do solo nessa posição de amostragem.

Assim, em pastagens formadas com espécies que apresentam hábito de crescimento cespitoso, o local de amostragem tem importância relevante na determinação do impacto do pisoteio animal sobre a qualidade física do solo e a alteração nas características físicas do solo não é generalizada na área de produção de forragem.

Nas camadas de solo 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, a RP foi maior nos tratamentos com maior intensificação do pastejo (NI₂, NI₃, NI₄), independentemente da posição de coleta das amostras ao contrário do que aconteceu nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m em que não se observou diferença dos valores de RP na posição CT (Figura 6.3).

O incremento da RP, nas camadas de 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, não pode ser associado ao pisoteio animal, o comprometimento da estrutura do solo decorrente da ação do pisoteio restringe-se as camadas superficiais do solo como observado por Greenwood et al. (1997) que avaliaram diferentes intensidades de pastejo após doze anos e demonstraram que a intensificação do pastejo aumentou a RP somente na camada de 0,025 a 0,05 m. De forma semelhante, Müller et al. (2004) observaram em área pastejada por bovinos que os maiores valores de densidade do solo foram encontrados nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Assim, os maiores valores de RP nos tratamentos mais intensificados (NI₂, NI₃ e NI₄) nas camadas inferiores (Figura 6.3) podem estar relacionados ao menor Ug resultante da maior exigência hídrica da forragem nestes tratamentos, que associado ao maior teor de argila (Quadro 6.1) resulta numa maior coesão e fricção entre as partículas, e consequentemente, em aumento da RP.

Nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, o conteúdo de água no solo no tratamento NI₁ também foi sempre superior aos demais níveis de intensificação de pastejo (Figura 6.3), porém, como foi demonstrada na Figura 6.2, a dependência de elevados conteúdos de água no solo para manutenção da resistência à penetração foi maior com o incremento em profundidade das camadas avaliadas.

O menor conteúdo de água (Ug) nos tratamentos com maior

intensificação do pastejo (NI₂, NI₃ e NI₄) e a ausência de diferença entre eles (Figura 6.3) pode estar associado ao maior consumo de água nesses tratamentos po causa do incremento na produção de massa de forragem nos maiores níveis de intensificação de pastejo em relação ao menor nível, NI₁. Lugão et al. (2003) demonstraram, neste mesmo experimento, que a taxa de acúmulo de forragem aumentou em 205% quando a aplicação de nitrogênio variou de 0 para 150kg ha⁻¹, ou seja, do NI₁ para o NI₂, quando a dose de nitrogênio variou de 300 para 450 kg/ha (NI₃ para NI₄) ocorreu um aumento de apenas 12%. Tendo em vista que o acúmulo de forragem demanda água e nutrientes para a produção de massa é correto associar o maior consumo de água nos tratamentos que tiveram maior acúmulo de forragem e, como demonstraram Lugão et al. (2003), o grande incremento do acúmulo ocorreu entre as doses de 0 e 150 kg N ha⁻¹, o que corresponde neste trabalho aos tratamentos NI₁ e NI₂,respectivamente.

A redução da Ug nos tratamentos com maior nível de intensificação de pastejo não deve ser atribuído ao aumento do pisoteio animal, uma vez que esse efeito ocorreu em todas as camadas de solo avaliadas e não somente nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m em que o pisoteio exerceu seu efeito. Fidalski et al. (2008) avaliaram os efeitos do pisoteio animal sobre a qualidade física do solo e observaram que o aumento do nível de intensificação do pastejo em Latossolo Vermelho Distrófico textura arenosa não proporcionou redução da porosidade do solo.

O Ug, de maneira geral, foi maior na posição da touceira, CT (Figura 6.3) demonstrando que esse local possui maior capacidade de retenção de água e, possivelmente, uma melhor condição física do solo às plantas, como proposto por Imhoff et al. (2000a).

Do total de MSR produzida, independentemente do nível de intensificação avaliado, 81% concentraram-se nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, 58% entre 0-0,10 m, 23% entre 0,10-0,20 m, 11% entre 0,20-0,30 m e 8% entre 0,30-0,40 m. Esses resultados podem ser justificados pelo gradiente físico ligado a granulometria do solo no perfil, visto que as duas primeiras camadas se encontram em um horizonte com granulometria mais grosseira (Quadro 6.1), o

que contribuiu para obtenção de menores valores de RP (Figura 6.3). A menor fertilidade química nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (Quadro 6.2) também contribuiu para os menores valores de MSR, uma vez que os teores de fósforo disponível concentraram principalmente na camada de 0-0,10 m. Esses resultados são justificados pelo gradiente de fertilidade química entre a camada superficial e as camadas mais profundas por causa da aplicação de fertilizantes e corretivos em superfície.

A MSR na camada de 0-0,10 m, no menor nível de intensificação de pastejo, NI₁, salvo a exceção no NI₃ na posição da touceira, foi sempre superior (Figura 6.3), demonstrando que a intensificação de pastejo teve efeito negativo sobre a produção de raízes do *Panicum maximum*. O mesmo efeito foi observado na camada de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, em que os tratamentos mais intensificados tiveram valores de RP superiores a 2,5 MPa. Na camada de 0,30-0,40 m esse comportamento foi observado somente para a posição da touceira. Os resultados demonstram que os tratamentos mais intensificados tornaram cada vez mais dependentes do Ug, tendo em vista que possuem maior demanda hídrica, como foi demonstrado na Figura 6.3. Durante a condução do experimento foi observado o enrolamento das folhas nos níveis de intensificação NI₃ e NI₄ em períodos de veranico, sugerindo que a intensificação de pastejo em anos com distribuição irregular de chuvas pode comprometer o efeito da adubação.

A maior MSR no tratamento com menor intensificação do pastejo (NI₁) está relacionada a uma série de fatores: a) o conteúdo de água do solo nesse tratamento foi sempre superior aos demais, o que proporciona melhores condições para elongação da raiz, uma vez que o influxo de água na célula gera pressão de turgor que promove a força motriz necessária para o alongamento da raiz por meio da expansão celular e da divisão celular no meristema apical (Clark et al., 2003); b) o maior conteúdo de água no solo submetido ao nível de intensificação do pastejo NI₁ mantém temporalmente menores valores de resistência à penetração das raízes, de modo a reduzir o impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular (Figura 6.3); c) no NI₁ a menor carga

animal decorrente da menor taxa de lotação e o menor número de ciclos de pastejo (Quadro 6.2) reduziram o dano mecânico ao sistema radicular promovido pelo pisoteio animal nas camadas superficiais.

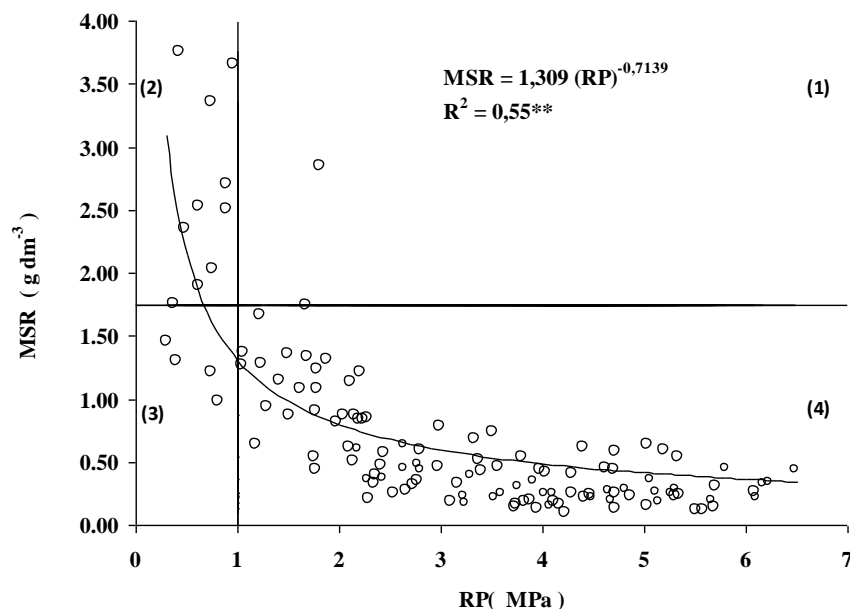


Figura 6.4. Relação entre a massa seca de raízes (MSR) e resistência do solo à penetração (RP) utilizando dados obtidos em todos os tratamentos e as camadas de solos estudadas. Os números de 1 a 4 indicam o número do quadrante. O símbolo ** indica que o modelo ajustado foi significativo ($F < 0,01$).

O aumento da RP influenciou negativamente a produção de raízes (Figura 6.4). O uso do método proposto por Cate e Nelson (1971) permitiu o estabelecimento do valor crítico de 1 Mpa para a produção de raízes uma vez que poucos pontos se localizam nos quadrantes ímpares. Em valores de e RP menores que 1 MPa observou-se produção de MSR entre de 1,75 e 3,75 g dm⁻³. A partir deste valor houve redução acentuada na produção de MSR. Dos fatores avaliados, esse comportamento pode ser justificado pela concentração do sistema radicular na camada de 0-0,10 m em que se observaram menores valores de RP (Figura 6.3) e melhores índices de fertilidade do solo (Quadro 6.3).

6.4 Conclusões

1. A adubação nitrogenada aumentou a produção de massa seca de forragem e de folhas verdes de *Panicum maximum* Jacq. cv. – IPR 86 Milênio; a

produção máxima de forragem, 6.666 kg ha⁻¹, foi obtida com a dose de 387 kg de N ha⁻¹ e a de folhas verdes, 3.032 kg ha⁻¹, com 407 kg de N ha⁻¹.

2. Na área de maior pisoteio, entre touceiras, os menores valores de resistência do solo à penetração, em todas as camadas avaliadas, ocorreram no menor nível de intensificação do pastejo. Na posição da touceira, ocorreu menor valor de resistência à penetração no tratamento menos intensificado NI₁ somente nas camadas de solo 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m.

3. O incremento da resistência do solo à penetração reduziu a produção de raízes de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio. As maiores produções de raízes foram obtidas quando os valores de resistência à penetração foram inferiores a 1 MPa .

7. CAPÍTULO 2: INFLUÊNCIA DA INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO NA QUALIDADE FÍSICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO

7.1 Introdução

A pressão causada pelo pisoteio dos animais é frequentemente associada à compactação do solo (Greenwood e McKenzie, 2001). A intensificação do pastejo decorrente do aumento das taxas de lotação animal pode comprometer a qualidade física e estrutural dos solos em áreas sob pastagens resultando em redução das taxas de infiltração de água (Zimmermann et al., 2010), aumento da densidade (Sarmiento et al., 2008) e da resistência do solo à penetração (Donkor et al., 2002, Lanzasova et al., 2007). As alterações nessas propriedades físicas do solo podem reduzir a produtividade das pastagens e, conseqüentemente, a produção animal (Greenwood e McKenzie, 2001). O ajuste das taxas de lotação animal em função da produtividade das pastagens, a manutenção de uma massa contínua de forragem sobre o solo e um período de descanso para recuperação das pastagens podem, por outro lado, reduzir o impacto causado pelo pisoteio dos animais sobre os solos (Martínez e Zinck, 2004; Fidalski et al., 2008).

A qualidade física dos solos depende do tamanho, forma e organização das partículas sólidas e dos poros a elas associados (Brewer e Sleeman, 1960). A porosidade é responsável pela condução e retenção de água no solo e por esse motivo tem importante participação no fornecimento de oxigênio, água e nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas. O comprometimento da produtividade das pastagens ocorre quando distribuição de poros do solo não permite adequada drenagem e armazenamento de água capazes de fornecer oxigênio, água e nutrientes às plantas. O bom funcionamento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas forrageiras dependem de adequada aeração e capacidade de armazenamento de água no solo, além disso, necessitam de valores apropriados de densidade e resistência do solo à penetração (Reynolds et al., 2002). Diversos estudos sugerem que as camadas superficiais de solo apresentem

entre 0,10 e 0,15 m³m⁻³ dos poros preenchidos com ar (Grable e Siemer, 1968; Cockcroft e Olsson, 1997) e os valores de água disponível para as plantas estejam acima de 0,20 m³ m⁻³ (Cockcroft e Olsson, 1997), ou entre 0,15 e 0,25 m³m⁻³ (Craul, 1999).

A densidade do solo é definida pela razão entre a massa de sólidos por unidade de volume de solo seco. Tendo em vista que este volume inclui as partículas sólidas e o espaço poroso do solo, a densidade do solo estabelece uma relação inversa com a porosidade total. Jones (1983) estabeleceu relações empíricas para distinguir duas classes de densidade do solo em função dos teores de argila; uma em que não há impedimento ao crescimento das raízes e outra em que o crescimento das raízes é reduzido em até 20%. Em solos com até 20% de argila, os modelos ajustados não indicaram restrição ao desenvolvimento de raízes para valores inferiores a 1,39 Mg dm⁻³. Com valores de densidade entre 1,39 Mg dm⁻³ e 1,64 Mg dm⁻³ os modelos estimaram redução na produção de raízes de até 20% da produtividade máxima obtida.

A condutividade hidráulica saturada estabelece uma relação direta com a porosidade total do solo e particularmente com a macroporosidade. Porém, este indicador é determinado pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, tornando dependente, portanto da forma, quantidade, distribuição e continuidade dos mesmos (Mesquita e Moraes, 2004). Assim o tamanho e a organização das partículas sólidas exercem importante papel na forma e no diâmetro dos poros e consequentemente na condutividade hidráulica. Os valores de condutividade hidráulica saturada apresentam ampla variação em solos com textura distinta e entre camadas de solo. Figueiredo (2010) observou, em amostras indeformadas avaliadas em laboratório, valores médios de condutividade hidráulica saturada, nas camadas de 0-0,10 m e 0,20-0,30 m, respectivamente, de 70 e 173 mm h⁻¹ em solos de textura média e de 9 e 54 mm h⁻¹ em solo de textura argilosa.

Indicadores como macroporosidade, microporosidade e capacidade de campo são frequentemente utilizados para avaliar a compactação do solo em diferentes classes de solo e sistemas de manejo (Tarrá et al., 2010). Além destes,

Reynolds et al (2002) propôs outros indicadores tais como porosidade no domínio dos macroporos, porosidade no domínio da matriz do solo e capacidade da aeração da matriz do solo como indicadores alternativos para obtenção de uma estimativa direta da capacidade do solo em armazenar água e ar na zona de absorção das raízes.

Skoop et al. (1990) concluíram que a produtividade máxima das culturas ocorre quando 66% do espaço poroso do solo estava ocupado com água e , conseqüentemente, com 34% de ar. Utilizando estes resultados e o fato que os espaços porosos preenchidos com água e ar dependem, parcialmente, das características físicas do solo, Olness et al. (1998) propôs como indicadores para quantificar a qualidade física dos solos a relação entre a capacidade de campo e a porosidade total do solo ou entre a capacidade de aeração total e a porosidade total do solo. A relação da capacidade de campo com a porosidade total foi denominada capacidade de armazenamento de água no solo, enquanto a relação da capacidade de aeração total com a porosidade total foi denominada capacidade de armazenamento de ar no solo. Assim esse autor propôs que o balanço entre o conteúdo entre ar e água no solo seria atingido para valores de capacidade de armazenamento de ar de 0,34 ou capacidade de armazenamento de água de 0,66.

As alterações na estrutura do solo, decorrentes da pressão exercida pelo casco dos animais, podem reduzir a qualidade física dos solos em níveis restritivos ao desenvolvimento das plantas. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da intensificação de pastejo e da posição de amostragem na pastagem sobre a qualidade física de um Argissolo Vermelho Distrófico utilizando indicadores diretos e indiretos da capacidade de armazenamento de água e ar em quatro camadas de solo.

7.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (23° 00'4" S, 42°02'06"W, altitude 460 m), no município de Paranavaí, região noroeste do Paraná, em solo classificado como Argissolo

Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006). Os resultados das análises de amostras de solo da área experimental são apresentados no Quadro 7.1.

Quadro 7.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Horizonte	Profundidade m	Argila -----	Silte g kg ⁻¹ -----	Areia -----	Classe textural
A	0 – 0,20	110	20	870	Areia Franca
Bt ₁	0,20 – 0,50	193	13	793	Franco arenoso
Bt ₂	0,50 – 2,00	207	7	787	Franco argilo arenoso

O capim *Panicum maximum* IPR-86 Milênio foi semeado em outubro de 1995, e explorado com diferentes níveis de intensificação do pastejo (NI) desde outubro de 1997, quando se iniciou a fertilização do solo com diferentes doses de nitrogênio. Os níveis de intensificação do pastejo dispostos no Quadro 7.2 foram baseados na taxa de lotação animal, ciclos de pastejo e massa de forragem que variaram em função da aplicação das doses crescentes de nitrogênio: 0, 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, equivalente aos níveis de intensificação de NI₁ até NI₄.

Quadro 7.2. Descrição dos níveis de intensificação de uso da pastagem, taxa de lotação, ciclos de pastejo e produção de massa seca de forragem no período de 2007-2009, referentes a um valor médio de ocupação de 209 dias no período de verão.

	NI ₁	NI ₂	NI ₃	NI ₄
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	0	150	300	450
Taxa de lotação (UA ha ⁻¹)	1,26	5,57	7,45	8,23
Ciclos de pastejo	1,25	4,06	5,38	5,38
Massa de forragem (kg MS ha ⁻¹ ciclo de pastejo ⁻¹)*	3689	5734	6351	6638

* Corte a 0,20 m em relação ao nível do solo

A fonte de N utilizada foi o nitrato de amônio e os demais nutrientes foram aplicados com o objetivo de não restringir o desenvolvimento das plantas, por meio de adubações periódicas com superfosfato simples, cloreto de potássio e calcário, aplicados em superfície e sem incorporação. A caracterização química dos solos de cada um dos níveis de intensificação do pastejo pode ser observada no Quadro 7.3.

Quadro 7.3. Caracterização química do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo em amostras de solo coletadas no ano de 2007

NI	Camada	P ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽¹⁾	V
	m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³			%
NI ₁	0-0,10	9,48	8,51	6,18	0,00	1,99	1,83	1,17	0,23	61.80
	0,10-0,20	2,10	6,06	5,80	0,00	2,11	1,50	0,84	0,17	54.21
	0,20-0,40	1,00	4,43	5,48	0,00	2,27	1,37	0,83	0,14	50.70
NI ₂	0-0,10	13,33	9,42	5,73	0,00	2,23	1,80	0,98	0,23	57.45
	0,10-0,20	2,95	5,40	5,65	0,00	2,20	1,49	0,83	0,11	52.65
	0,20-0,40	1,58	4,94	5,55	0,00	2,28	1,43	0,92	0,10	51.82
NI ₃	0-0,10	11,95	9,73	4,98	0,04	3,01	1,53	0,94	0,40	48.76
	0,10-0,20	2,43	6,79	5,05	0,07	2,80	1,55	0,86	0,18	48.01
	0,20-0,40	1,28	4,53	5,08	0,01	2,64	1,36	0,87	0,09	46.77
NI ₄	0-0,10	15,95	10,32	4,50	0,14	3,91	1,44	0,77	0,37	39.83
	0,10-0,20	3,45	6,65	4,53	0,19	3,36	1,35	0,62	0,19	39.11
	0,20-0,40	1,43	4,78	4,63	0,16	2,89	1,44	0,82	0,10	44.92

Mehlich 1; ⁽²⁾ Walkley-Black; ⁽³⁾ CaCl₂; ⁽⁴⁾ KCl 1,0 M.

O ajuste da taxa de lotação animal teve por base a produtividade da pastagem e a oferta de 70% de matéria seca de lâminas foliares verdes em relação à produção total da forragem. Além disso, considerou-se a oferta diária de 11 kg de folhas verdes por 450 kg de peso vivo animal. O manejo da pastagem foi realizado visando a manutenção do resíduo pós-pastejo entre 20-25% de lâminas verdes em relação à produção em cada nível de intensificação.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Nas parcelas principais foram dispostos os níveis de intensificação de pastejo, NI₁ até NI₄ e nas subparcelas a posição de amostragem, área da touceira, CT, e área entre touceiras, ST, totalizando 32 unidades experimentais. A influência da intensificação do pastejo, na qualidade física do solo, foi determinada através da densidade do solo e da condutividade hidráulica saturada, os quais indicam a alteração da quantidade e da distribuição de poros no solo, bem como por meio de indicadores com influência direta da capacidade de armazenamento de ar e água no solo: porosidade total, macroporosidade, microporosidade, porosidade no domínio dos macroporos, porosidade no domínio da matriz do solo, capacidade de aeração da matriz do solo, capacidade de aeração total do solo e capacidade de campo ilustrados na Figura 7.1.

A porosidade total foi calculada pela relação entre a massa de água em solo saturado e o volume da amostra. A macroporosidade foi determinada pela

diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e no potencial matricial de -6 kPa e a microporosidade foi determinada como sendo o volume de água retido a -6 kPa (Embrapa, 2007). A porosidade no domínio dos macroporos foi definida como o volume de poros drenados entre a saturação e o potencial mátrico de -1 kPa. A porosidade no domínio da matriz do solo reflete o conteúdo de água no solo retido no potencial mátrico de -1 kPa. A capacidade de aeração da matriz foi estimada pela diferença entre os conteúdos de água nos potenciais mátricos de -1 kPa a -10 kPa. A capacidade de aeração total corresponde ao volume de poros drenados entre a saturação e o potencial de -10 kPa e a capacidade de campo corresponde a quantidade de água retida no potencial de -10 kPa (Reynolds et al, 2002).

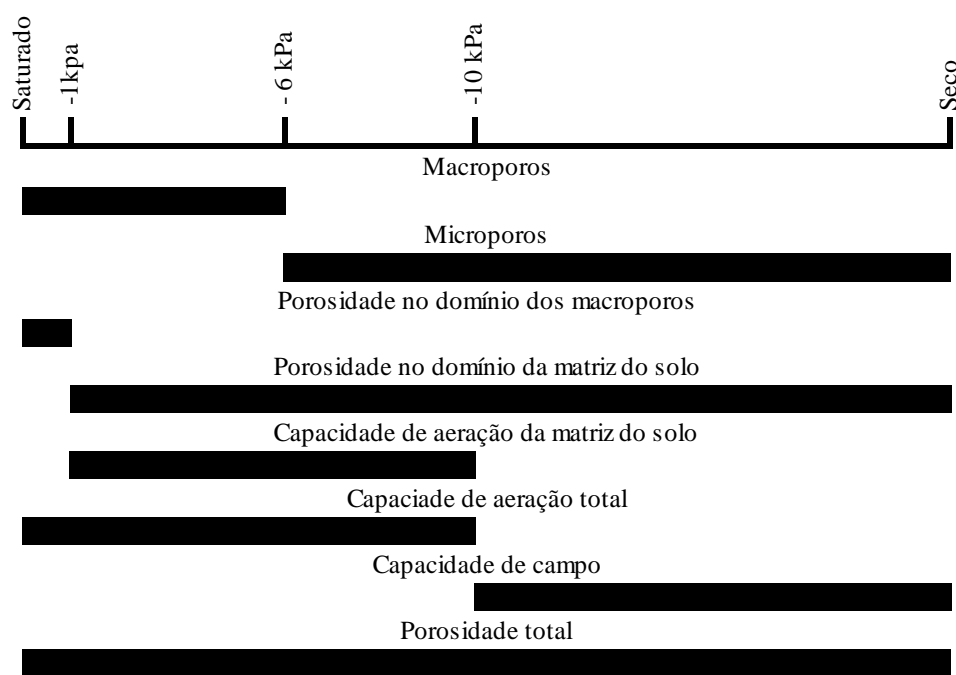


Figura 7.1. Representação dos indicadores da capacidade de armazenamento de ar e água no solo (Conforme Fidalski et al. 2008).

A coleta das amostras para avaliação dos indicadores de qualidade física do solo foi realizada de forma independente em quatro camadas de solo: 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m. Em cada parcela experimental foi retirada uma amostra indeformada utilizando anéis volumétricos de aço inox com 5 cm de altura e diâmetro. No momento da coleta as amostras foram envoltas em papel alumínio e mantidas sob refrigeração até o momento das determinações.

Em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade em bandejas com lâmina de água até dois terços da altura do anel volumétrico. A determinação do conteúdo de água retida nos potenciais de -1, -6 e -10 kPa foi realizada em mesa de tensão conforme Reynolds et al. (2002). Posteriormente as amostras foram levadas para estufa permanecendo por 48 horas em temperatura constante de 105°C. Em seguida, determinou-se a massa de sólidos. A densidade do solo foi calculada pela razão entre a massa de sólidos e o volume de solo da amostra.

A determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi realizada utilizando a metodologia de carga decrescente (Reynolds e Elrick, 2002) conforme o esquema mostrado na Figura 7.2.

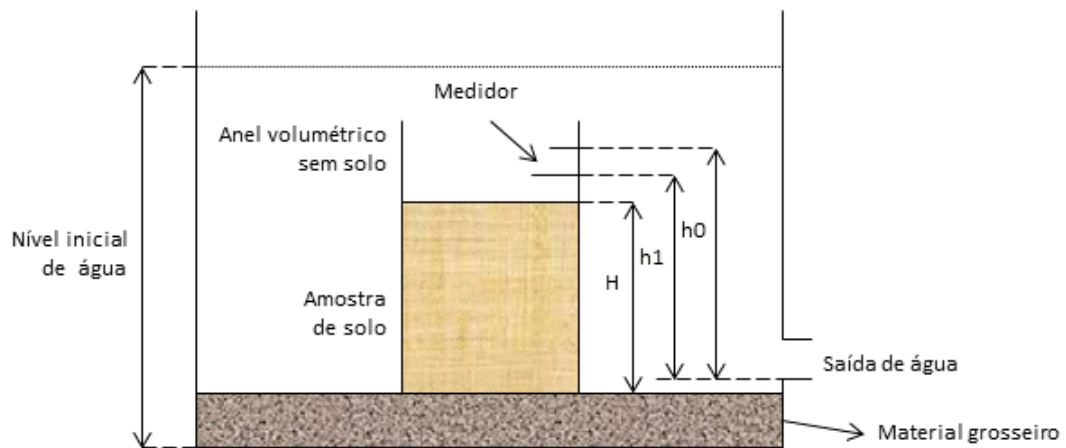


Figura 7.2. Vista do corte longitudinal de permeâmetro utilizado para determinação da condutividade hidráulica saturada em amostras indeformadas de solo conforme Figueiredo (2010).

O cálculo da condutividade hidráulica saturada foi realizado usando a Equação 1.

$$K_{sat} = \frac{\emptyset}{\emptyset_s} * \frac{H}{t} * \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (1)$$

Em que:

K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada em (mm h^{-1}), \emptyset é o diâmetro do anel volumétrico sem solo (mm), \emptyset_s é o diâmetro do anel volumétrico com solo (mm), H corresponde a altura do anel volumétrico com solo e h_0 e h_1 correspondem as alturas de referência do medidor em relação a saída de água e t é o tempo necessário para deslocar a coluna de água entre h_0 e h_1 .

Para enfatizar o significado das variações obtidas nas medidas de condutividade hidráulica saturada nas diferentes camadas de solo, recorreu-se a classificação de percolação proposta por Cunha et al. (2008) e apresentada no Quadro 7.4.

Quadro 7.4. Classes de percolação em função da condutividade hidráulica saturada, Ksat (Adaptado de Cunha et al., 2008).

Velocidade de percolação	Valores de Ksat (mm h ⁻¹)
Muito lenta	0 - 1
Bastante lenta	1 - 5
Lenta	5 - 20
Média	20 - 65
Rápida	65 - 125
Bastante rápida	125 - 250
Muito rápida	> 250

O diâmetro dos poros envolvidos em cada um dos potenciais aplicados foi obtido pela relação entre o potencial de água e o diâmetro máximo dos poros ocupados com água (Cunha et al., 2008) através da Equação 2.

$$D = 2 * \frac{-2\sigma \cos \alpha}{\rho g h} \approx \frac{-0,2964}{h} \quad (2)$$

Em que:

D é o diâmetro equivalente do poro (mm); σ é o coeficiente de tensão superficial da água (72,44 N mm⁻¹ a 22°C); α é o ângulo de contato entre a água e a parede do poro (considerou-se $\alpha=0$ devido a forte atração entre a água e as partículas de solo); ρ é a densidade da água (997,8 x 10⁻⁶ g mm⁻³ a 22°C); g é a aceleração em virtude da gravidade (9,81 x 10³ mm s⁻²) e h é o potencial da água no solo (mm).

Os dados obtidos foram tabulados e analisados para avaliação da homogeneidade da variância utilizando o teste de Levene e normalidade dos resíduos pelo índice de Shapiro-Wilk. Quando alguma das variáveis estudadas não atendeu estes pressupostos da análise de variância os dados foram transformados e realizando novamente o teste de Levene e Shapiro-Wilk. Atendidas as pressuposições a análise dos dados foi realizada utilizando os softwares estatísticos SAS e SISVAR. As médias dos efeitos isolados (nível de

intensificação e local de amostragem) foram desdobradas, independentemente da significância dos valores de “F” das interações na análise de variância principal. Para comparação das médias foi utilizado o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Além disso, foram estabelecidos testes de correlação de Pearson para determinação da correlação entre as variáveis avaliadas.

7.3 Resultados e discussão

A intensificação do pastejo não alterou a densidade do solo na posição da touceira (CT), independentemente da camada de solo avaliada. Na posição entre touceiras (ST) ocorreu alteração dos valores de densidade do solo, entre os níveis de intensificação do pastejo apenas na camada de solo de 0-0,10 m, onde os valores de densidade do solo variaram entre 1,57 e 1,72 Mg dm^{-3} . Na primeira avaliação da qualidade física do solo, neste experimento, realizada por Sarmento et al. (2008) na safra 2001/2002, cinco anos após a implantação, os valores de densidade do solo encontrados foram semelhantes aos encontrados neste estudo e variaram entre 1,61 e 1,66 Mg dm^{-3} na camada de 0-0,10 m em amostras de solo retiradas entre as touceiras.

A comparação dos níveis de intensificação na camada de solo de 0-0,10 m e na posição entre touceira demonstrou que os tratamentos mais intensificados, NI_3 e NI_4 , tiveram valores de densidade do solo superiores aos menos intensificados, NI_1 e NI_2 (Figura 7.3).

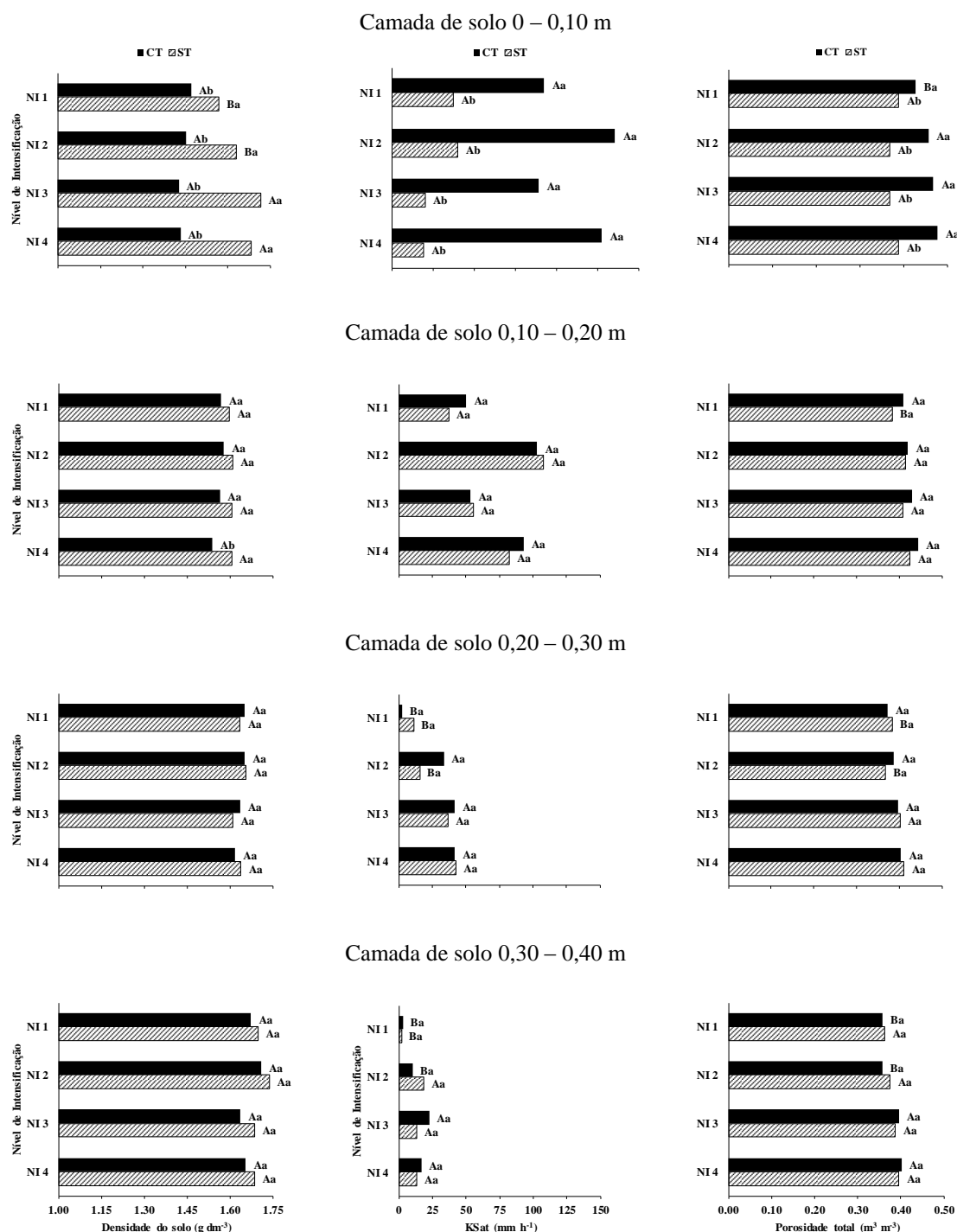


Figura 7.3. Valores médios de densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica saturada (KSat) e porosidade total (Pt) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam as posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).

A diferenciação dos valores de densidade do solo somente na camada superficial 0-0,10 m comprova que o pisoteio animal foi capaz de alterar os valores de densidade do solo somente na camada superficial do solo. Além disso,

as alterações dos valores de densidade do solo ficaram concentradas na posição entre touceiras, ST, demonstrando que o hábito de crescimento cespitoso da espécie forrageira avaliada proporcionou uma barreira física ou delimitou a área para o pisoteio dos animais.

O maior valor de densidade do solo nos níveis de intensificação do pastejo NI₃ e NI₄ são justificados pelo aumento da carga animal e da frequência de pisoteio dos animais sobre o solo. Nesses tratamentos ocorreram as maiores taxas de lotação animal e maior número de ciclos de pastejo (Quadro 7.2). Em Latossolo, com conteúdo de argila semelhante a do solo do presente estudo, a intensificação de pastejo em pastagens consorciadas (coastcross + amendoim forrageiro), manejada em sistema contínuo, não alterou a densidade do solo na camada 0 – 0,15 m (Fidalski et al., 2008). Os tratamentos avaliados por esses autores receberam dose máxima de fertilizante nitrogenado de 200 kg ha⁻¹, menos que a metade da dose máxima usada no presente trabalho, portanto o uso do pasto foi menos intensivo. Como consequência teve por resultado menor variação na massa de forragem produzida e menor variação das taxas de lotação animal (3,75 – 4,79 UA ha⁻¹ dia⁻¹). No presente trabalho, usando Capim-Milênio e nos tratamentos que receberam doses crescentes de nitrogênio, as taxas de lotação variaram de 5,57 a 8,23 UA ha⁻¹ dia⁻¹ (Quadro 7.2).

A comparação entre as posições de amostragem confirmou o efeito localizado de aumento da densidade de solo na camada superficial do solo 0-0,10 m e os maiores valores de densidade do solo na posição ST em todos os níveis de intensificação confirma a capacidade das touceiras em exercer barreira física ao pisoteio dos animais. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2007) e Pereira et al. (2010) que observaram maiores valores de densidade do solo na posição entre touceiras, quando comparada à posição da touceira de *Panicum maximum* CV Tanzânia.

No maior nível de intensificação NI₄ a densidade do solo na posição ST foi superior aos valores encontrados na posição da touceira, CT, até 0,20 m de profundidade demonstrando que o dano causado pelo pisoteio dos animais neste nível de intensificação não ficou restrito a camada de 0-0,10 m. Nas camadas de

solo de 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m não houve diferença nos valores de densidade do solo.

A condutividade hidráulica saturada expressa a habilidade do solo em conduzir água através dos poros (Cunha et al., 2008). A intensificação do pastejo não alterou os valores médios de condutividade hidráulica saturada (Figura 7.3) nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. Nessas camadas de solo, as taxas de condutividade foram classificadas entre bastante rápida e média conforme a classificação proposta por Cunha et al. (2008) apresentada no Quadro 7.4. As camadas de 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m apresentaram taxas de condutividade que variaram entre média a bastante lenta, o tratamento menos intensificado NI₁ apresentou a menor taxa de condutividade hidráulica saturada em relação aos níveis de intensificação NI₃ e NI₄. A redução da taxa de condutividade abaixo de 0,20 m de profundidade é coerente com a deposição de argila no horizonte Bt do Argissolo avaliado (Quadro 7.1).

Na comparação entre os locais de amostragem somente foi observado diferença da condutividade hidráulica saturada na camada de 0-0,10 m, em que os valores na posição CT foram superiores aos encontrados na região ST, em todos os níveis de intensificação de pastejo (Figura 7.3). A redução nos valores de condutividade hidráulica saturada da posição da ST, em relação à posição CT, foi de 59,68; 70,34; 77,37 e 84,47 % para os níveis de intensificação NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄, respectivamente. Essa redução está relacionada à pressão exercida pelo casco dos animais na área entre touceiras, ST. De forma semelhante, Waggoner e Denton (1989) observaram redução da condutividade hidráulica saturada de 86%, na camada de solo de 0,025 a 0,10 m, quando compararam a região da entrelinha não trafegada com a região trafegada pelo rodado das máquinas agrícolas em área cultivada com trigo.

As alterações nos valores de densidade e condutividade hidráulica saturada estão associadas a uma mudança na estrutura do solo que alterou a quantidade e a distribuição dos poros por classe de tamanho. A porosidade do solo é representada por espaços vazios com diferentes tamanhos e formas, definidas pelo arranjo das partículas sólidas. Ela constitui a fração

volumétrica ocupada com ar e solução do solo (Ribeiro et al., 2007). O bom desenvolvimento e desempenho das raízes em exercer suas funções estão associados ao adequado fornecimento de ar e água no solo bem como adequados valores de resistência do solo à penetração e densidade (Reynolds et al., 2002).

Os valores de densidade e condutividade hidráulica saturada correlacionaram-se significativamente ($p < 0,01$) com a porosidade total do solo, em todas as profundidades avaliadas (Quadro 7.5). Na camada 0-0,10 m e 0,20–0,30 m verificaram os maiores valores de correlação entre essas variáveis. O aumento dos valores de densidade do solo e a redução da condutividade hidráulica saturada estão associados a redução da porosidade total do solo, o que determina a relação inversa ou direta das variáveis demonstradas pelo sinal negativo ou positivo, respectivamente, nos coeficientes da correlação de Pearson.

Quadro 7.5. Correlação entre os valores médios de densidade e condutividade hidráulica saturada com os valores de porosidade total do solo, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30 – 0,40 m.

	Porosidade total do solo			
	Camada de solo (m)			
	0-0,10	0,10-0,20	0,20- 0,30	0,30-0,40
Ds	-0,87**	-0,45**	-0,63**	-0,48**
Ksat	0,74**	0,35**	0,78**	0,59**

** Indica Valores de $F < 0,01$ no teste de correlação de Pearson.

A intensificação do pastejo reduziu a porosidade total do solo, na posição CT, nas camadas de 0-0,10 m e 0,30-0,40 m. Na camada superficial de 0-0,10 m, o menor valor de porosidade ocorreu no menor nível de intensificação. Na camada de 0,30-0,40 m, os níveis NI_1 e NI_2 apresentaram porosidade total semelhante e inferior aos níveis NI_3 e NI_4 . A porosidade total na posição ST foi reduzida nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m (Figura 7.3). A redução da porosidade total na camada de 0-0,10 m e nos níveis de pastejo mais intensificados pode ser justificada pelo aumento da carga animal sobre o solo ainda que a área da touceira, CT, não seja uma região preferencial de pisoteio dos animais. Porém os menores valores de porosidade total encontrados nos níveis de intensificação NI_1 e NI_2 na camada de solo 0,30-0,40 m não têm relação com a intensificação de pastejo uma vez que a ação do pisoteio dos animais está restrita à camada superficial do solo (Greenwood e McKenzie, 2001).

As maiores alterações na porosidade total ocorreram na camada de 0-0,10 m quando se comparou a área da touceira (CT) com a área entre touceiras (ST). (Figura 7.3). Os valores de porosidade total na CT foram superiores à posição ST e estiveram associados a menores valores de densidade do solo e a maior condutividade hidráulica saturada, conforme descrito anteriormente.

Além da porosidade total, a distribuição do tamanho e o arranjo dos poros no perfil do solo afetam a retenção e a condutividade de água (Ribeiro et al., 2007). A análise da correlação entre componentes da porosidade e a porosidade total do solo demonstra que as variáveis macroporosidade, porosidade na matriz do solo, capacidade de aeração da matriz e capacidade de aeração total relacionaram- com a porosidade total do solo (Quadro 7.6), indicando que a redução da porosidade ocorreu, principalmente, por perda de poros drenados em potenciais de água que variam entre -1 kPa e -10 kPa, associado aos poros com diâmetro entre 0,3 e 0,03 mm. Os valores de correlação entre a porosidade total e o volume de microporos ou a capacidade de campo demonstram que os poros responsáveis pela retenção de água no solo não influenciaram significativamente na alteração da porosidade total.

Quadro 7.6. Correlação entre os valores médios de macroporos, microporos, porosidade no domínio dos macroporos (PDmacro), porosidade no domínio da matriz do solo (PDmatriz), capacidade de aeração da matriz do solo (CAM), capacidade de aeração total (CAT) e capacidade de campo (CC) com os valores de porosidade total do solo.

	Porosidade total do solo			
	Camada de solo (m)			
	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4
Macroporos	0,84**	0,50**	0,63**	0,64**
Microporos	-0,11 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
PDMacro	0,41*	-0,12 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,09 ^{ns}
PDMatriz	0,98**	0,96**	0,97**	0,95**
CAM	0,84**	0,64**	0,84**	0,85**
CAT	0,88**	0,63**	0,87**	0,71**
CC	0,01 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,08 ^{ns}

** Indica Valores de $F < 0,01$, * indica valores de $F < 0,05$ e ns indica ausência de significância no teste de correlação de Pearson.

A macroporosidade do solo foi alterada, pelos diferentes níveis de intensificação de pastejo, somente nas camadas de solo de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m (Figura 7.4). Na camada de 0-0,10 m, somente ocorreu alteração da porosidade, entre os níveis de intensificação, na posição ST. Nessa posição, os

menores níveis de intensificação, NI₁ e NI₂, apresentaram maior quantidade de macroporos em relação aos sistemas mais intensificados NI₃ e NI₄. Por outro lado, na camada 0,10-0,20 m, a macroporosidade do solo foi alterada pelos níveis de intensificação nas duas posições, porém somente o NI₂ apresentou valores superiores de macroporos aos observados em NI₃ e NI₄. A comparação entre as posições de amostragem demonstrou redução da macroporosidade na posição entre touceiras, ST, nos níveis de intensificação NI₂ NI₃ e NI₄ na camada de solo de 0 - 0,1 m.

Os macroporos proporcionam condições para o fornecimento de ar para a respiração das raízes e a condução de água de drenagem do solo (Othmer et al., 1991). Diversos trabalhos mostram a necessidade de no mínimo, $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, de poros de aeração nas camadas superficiais do solo para o crescimento adequado da maioria das culturas. Considerando esse critério e os resultados encontrados neste trabalho, pode-se inferir que a redução da macroporosidade causada pelo pisoteio dos animais não resultou em níveis de porosidade com ar que comprometesse a aeração do solo a níveis restritivos ao desenvolvimento da pastagem. Por outro lado, o efeito sobre a condução de água de drenagem ficou evidente quando se comparou a posição de amostragem na camada de 0-0,10 m. Na área prioritária de pisoteio dos animais, entre touceiras, ST, foram verificados os menores valores de condutividade hidráulica saturada (Figura 7.3), decorrente da redução da macroporosidade nessa camada (Figura 7.4).

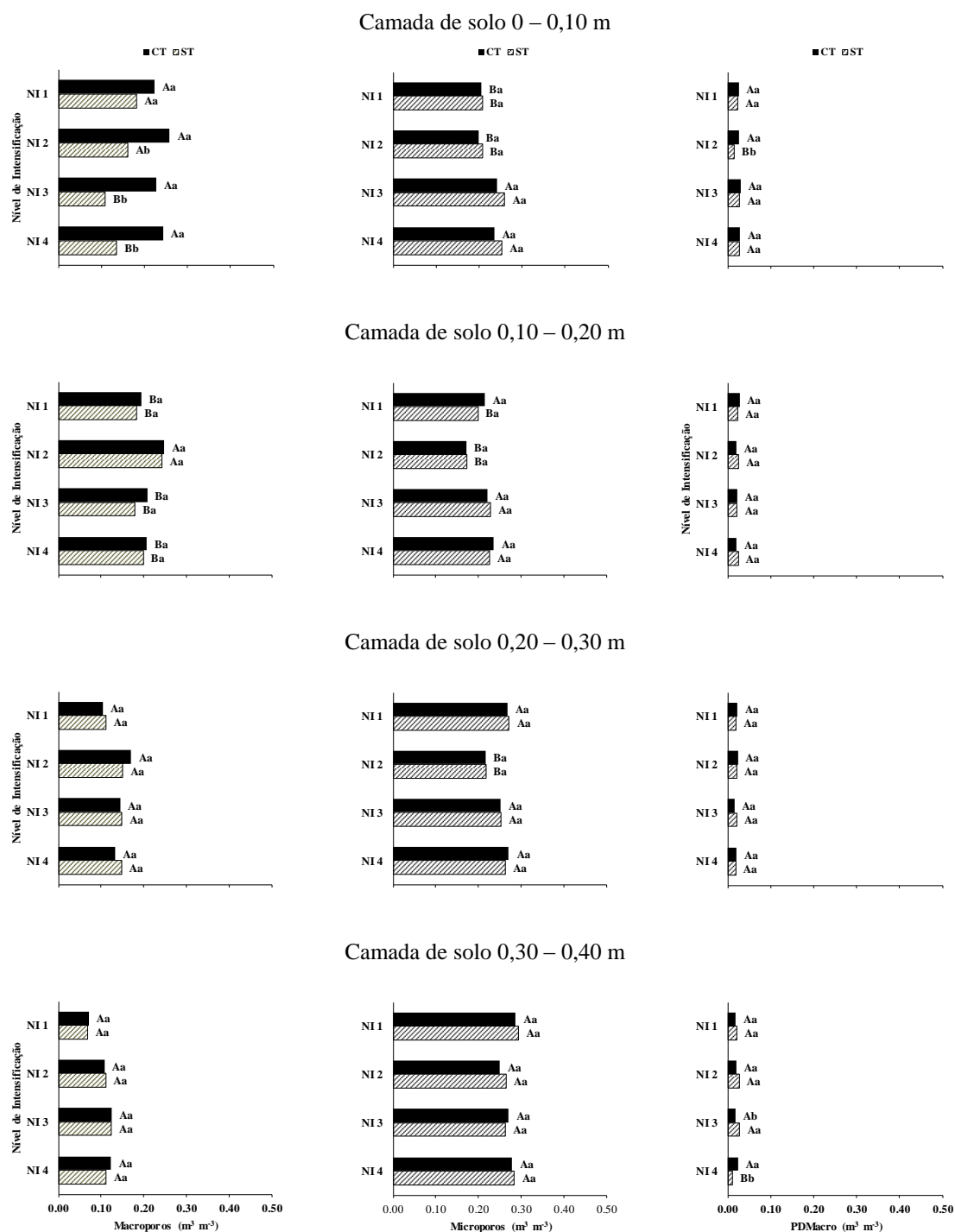


Figura 7.4. Valores médios de macroporosidade, microporosidade e porosidade no domínio dos macroporos (PDMacro) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam nas posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).

A microporosidade do solo, na camada superficial 0-0,10 m foi maior nos níveis de pastejo mais intensificados, NI₃ e NI₄, independentemente da posição de amostragem. Este mesmo comportamento ocorreu para a posição

entre touceiras, ST, na camada de solo de 0,10-0,20 m. Na camada de solo 0,20-0,30 m o nível de intensificação NI₂ teve microporosidade inferior aos demais níveis de intensificação de pastejo nas duas posições de amostragem. A intensificação de pastejo não afetou a microporosidade na camada de 0,30-0,40 m. Na comparação entre os locais de amostragem não se observou diferença nos valores de microporosidade do solo em nenhum dos níveis de intensificação de pastejo em todas as camadas de solo avaliadas (Figura 7.4).

A porosidade no domínio dos macroporos representa poros formados prioritariamente após a morte de raízes e pela movimentação da macrofauna no solo (bioporos). Os diâmetros destes poros são superiores a 0,30 mm, e por essa razão, são drenados rapidamente. A porosidade no domínio dos macroporos não foi alterada pela ação da intensificação do pastejo ou da posição de coleta das amostras de solo. Estes dados justificam a semelhança da condutividade hidráulica entre os níveis de intensificação avaliados. Exceções a esse comportamento ocorreram no NI₂, na camada de 0-0,10 m, e nos níveis de intensificação NI₃ e NI₄, na camada de solo de 0,30-0,40 m.

Reynolds et al. (2002) observaram maior porosidade no domínio dos macroporos em solo sob floresta nativa, comparada a lavouras em plantio direto e sistema convencional, e associou esse comportamento aos maiores teores de carbono orgânico no solo, a maior produção de raízes e ao maior número de poros formados pela atividade da biota do solo. Os valores de carbono orgânico encontrados por Reynolds et al. (2002), na camada de 0-0,10 m, em solos de textura arenosa foram de 22,80 mg dm⁻³ para floresta nativa, 7,70 mg dm⁻³ para lavoura em plantio direto e 7,30 mg dm⁻³ para lavoura em plantio convencional o que permitiu diferenciar a área sob mata nativa das áreas de lavoura. No presente estudo, a comparação entre os níveis de intensificação foram feitas em um mesmo sistema de produção, assim, espera-se que a quantidade de poros formados pela atividade da biota do solo tenha sido semelhante entre os níveis de intensificação avaliados.

Os valores de carbono orgânico do solo aumentaram com os níveis de intensificação e variaram entre 8,51 – 10,32 mg dm⁻³ para a camada de 0-0,10 m;

5,40-6,79 mg dm⁻³ para a camada de 0,10-0,20 m e 4,43 - 4,94 para a camada de solo de 0,2 – 0,4 m (Quadro 7.3) o que sugere uma contribuição para a agregação do solo e incremento da porosidade no domínio dos macroporos nos maiores níveis de intensificação avaliados. Apesar disso, a variação do teor de carbono no solo entre os níveis de intensificação de pastejo foi pequena quando comparada às obtidas por Reynolds et al. (2002), entre os sistemas de cultivo e a mata nativa. Desta forma, o incremento nos conteúdos de carbono orgânico no solo, pode não ter sido suficiente para o aumento da agregação do solo a ponto de alterar a porosidade no domínio dos macroporos, justificando a ausência de diferença da porosidade entre os níveis de intensificação avaliados, em sua maioria. Além disso, a produção de raízes, no tratamento NI₁ foi superior aos demais níveis de intensificação (Figura 6.3 no capítulo 1) o que pode ter contribuído para a formação de poros com diâmetro superiores 0,30 mm.

A porosidade no domínio da matriz do solo (Figura 7.5) teve comportamento muito semelhante ao da porosidade total (Figura 7.3). Tendo em vista que a porosidade no domínio dos macroporos pouco se alterou, é de se esperar que a porosidade no domínio da matriz do solo tenha comportamento semelhante ao da porosidade total. A correlação dos valores de porosidade total com a porosidade no domínio da matriz do solo foi de 0,98**; 0,95**; 0,97** e 0,95** enquanto com a porosidade no domínio dos macroporos foi de 0,41*; - 0,12^{ns}; 0,16^{ns} e 0,09^{ns} para as camadas de solo de 0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m, respectivamente (Quadro 7.6). Estes resultados indicam que o comprometimento da porosidade proporcionado pela intensificação do pastejo ou pela posição de amostragem reduziu principalmente os poros com diâmetro abaixo de 0,30 mm.

A capacidade de aeração da matriz do solo apresentou algumas alterações quando comparada aos níveis de intensificação dentro de cada posição de amostragem nas camadas de solo avaliadas. Porém, a redução dos valores de capacidade de aeração da matriz do solo ficou evidenciada nos níveis de intensificação NI₂, NI₃ e NI₄ da camada de solo 0-0,10 m quando comparada as

posições de amostragem. Nestes níveis de intensificação houve redução da capacidade de aeração da matriz do solo na posição entre touceiras, ST.

A capacidade de aeração total do solo não sofreu alteração em função da intensificação do pastejo, salvo na camada de 0,10-0,20 m em que os níveis de intensificação NI₁ e NI₃ tiveram menor capacidade de aeração em relação aos níveis de intensificação NI₂ e NI₄ (Figura 7.5). Quando comparadas as posições de amostragem, verificou-se que ocorreram menores valores de capacidade de aeração total na posição entre touceiras, ST, na camada de 0-0,10 m. Nas demais camadas de solo avaliadas a posição de amostragem não alterou os valores de capacidade de aeração total (Figura 7.5).

Os elevados índices de correlação da porosidade no domínio da matriz do solo, da capacidade de aeração da matriz e capacidade de aeração total do solo (Quadro 7.6) permitiram inferir que estas variáveis foram as que mais influenciaram na alteração da porosidade total do solo. A comparação dos níveis das posições de amostragem em cada nível de intensificação do pastejo permitiu demonstrar que a posição entre touceiras, ST na camada superficial do solo foi a maior responsável pela redução da porosidade total.

A capacidade de campo não foi alterada pela intensificação do pastejo ou pela posição de amostragem nas camadas de solo 0-0,10 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m (Figura 7.6). Na camada de solo de 0,10-0,20 m o NI₂ apresentou menores valores de capacidade de campo em relação aos demais níveis de intensificação. Além disso, nos níveis de intensificação NI₁ e NI₄ a posição da touceira, CT, apresentou maiores valores de capacidade de campo em relação à posição de pisoteio dos animais. Os poros responsáveis pela retenção de água quando o solo se encontra na capacidade de campo apresentam diâmetro inferior a 0,03 mm. Desta forma, a ausência de diferença nos valores de capacidade de campo entre os tratamentos avaliados indicam que o efeito da intensificação do pastejo ou posição de coleta das amostras não alterou a estrutura do solo na fração de poros com diâmetro menor que 0,03 mm.

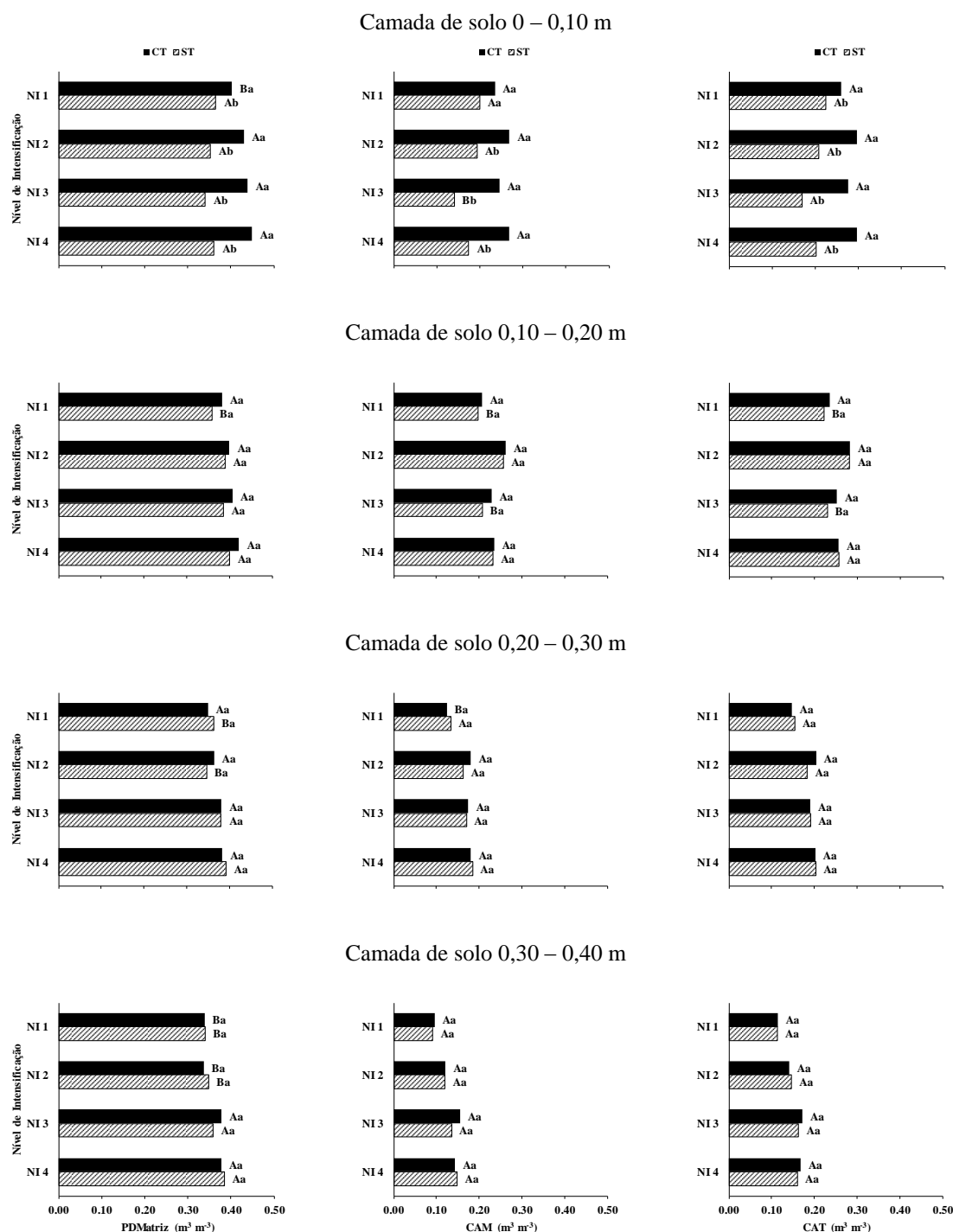


Figura 7.5. Valores médios de porosidade no domínio da matriz do solo (PDmatriz), capacidade de aeração da matriz do solo (CAM) e capacidade de aeração total (CAT) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam as posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).

O Argissolo avaliado neste experimento demonstrou, de maneira geral, baixa capacidade de retenção de água no solo (Figura 7.6), principalmente nas

camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m onde a relação entre a capacidade de campo e a porosidade total foram substancialmente inferiores ao valor proposto por Olness et al. (1998) como adequado ao desenvolvimento das plantas ($CC/Pt = 0,66$). Na camada de 0-0,10 m os maiores níveis de intensificação do pastejo NI_3 e NI_4 na posição entre touceiras, ST apresentaram maiores valores de capacidade de armazenamento de água em relação aos tratamentos menos intensificados sugerindo que a intensificação do pastejo contribuiu para a retenção de água no solo. Observa-se que apesar da porosidade total não se alterar entre os níveis de intensificação do pastejo na posição ST (Figura 7.3), a macroporosidade reduziu e a microporosidade aumentou nos níveis de intensificação NI_3 e NI_4 em relação aos níveis NI_1 e NI_2 na camada de solo de 0-0,10 m (Figura 7.4) justificando a maior capacidade de retenção de água nos tratamentos mais intensificados.

A comparação da capacidade de armazenamento de água entre os níveis de intensificação na camada de 0-0,10 m demonstrou que a posição ST teve maior capacidade de retenção de água em relação à posição da touceira, CT. Estes resultados ocorreram pela redução dos macroporos que ocorreram na posição ST em relação à posição CT. Desta forma, a perda de poros de maior tamanho contribuiu para a retenção de água no solo.

A capacidade de armazenamento de ar no solo ao contrário da capacidade de armazenamento de água no solo reduziu na posição entre touceira e nos maiores níveis de intensificação de pastejo na camada de solo de 0-0,10 m. Porém os valores observados de forma geral em todas as camadas de solo avaliadas foram superiores aos valores propostos por Olness et al. (1998) como adequados ao desenvolvimento das plantas ($CAT/Pt = 0,34$).

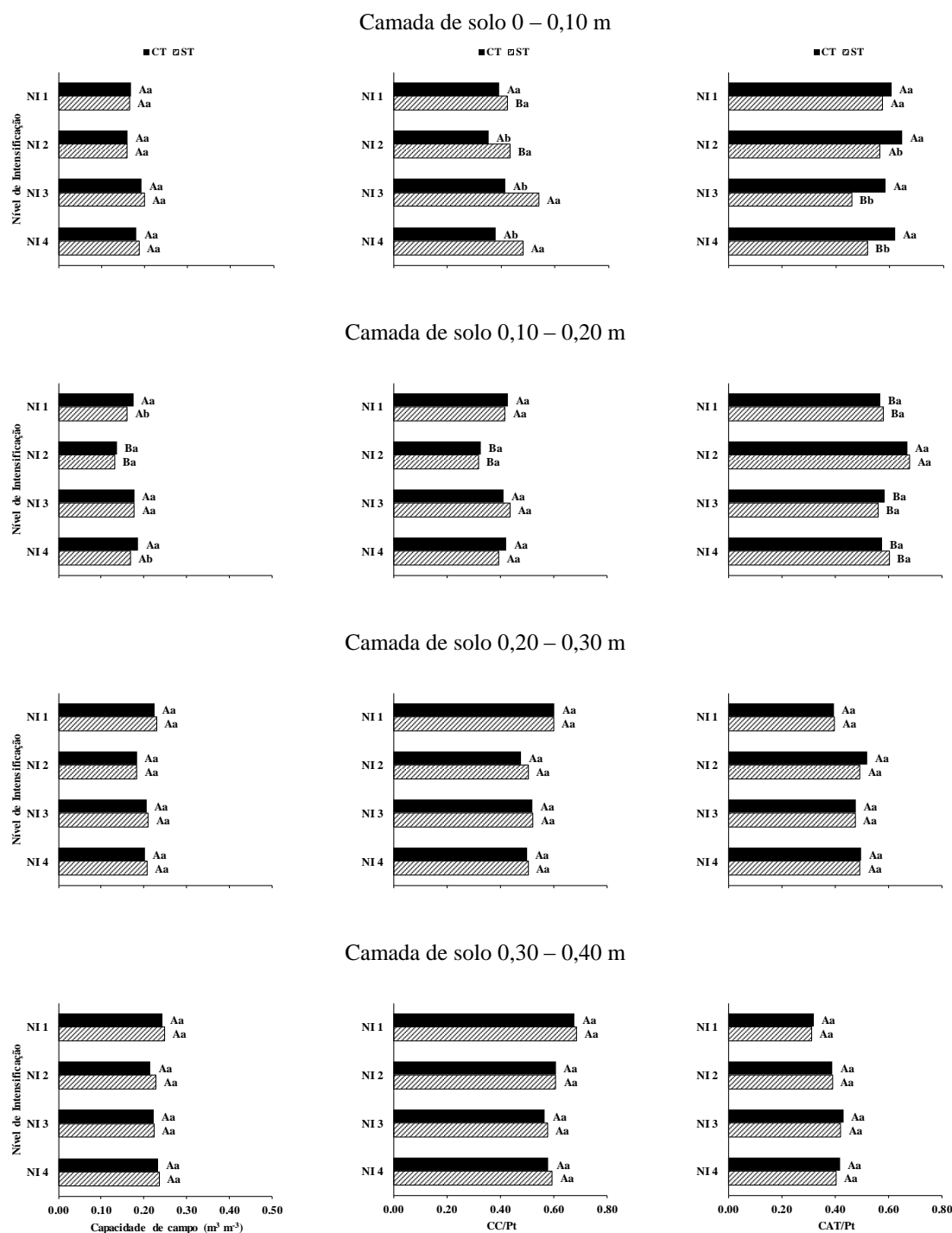


Figura 6. Valores médios de capacidade de campo, capacidade de armazenamento de água (CC/Pt) e capacidade de armazenamento de ar no solo (CAT/Pt) em Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (barras em preto) e na posição ST (barras com hachuras); Letras minúsculas comparam nas posições (CT e ST) em cada nível de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); Letras iguais não diferem pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$).

7.4 Conclusões

1. A intensificação do pastejo não reduziu a qualidade física do Argissolo Vermelho Distrófico.
2. A posição entre touceiras sofreu o impacto do pisoteio dos animais demonstrando menores valores de porosidade total com consequente aumento da densidade e redução da condutividade hidráulica saturada na camada de 0-0,10 m.
3. A redução da porosidade total, decorrente do pisoteio animal, reduziu a quantidade de poros com diâmetro entre 0,03 e 0,3 mm comprometendo a porosidade no domínio dos macroporos, a capacidade de aeração total e da matriz do solo.
4. A redução da porosidade na região entre touceira contribuiu para o aumento da capacidade de retenção de água no solo. A capacidade de retenção de ar no solo não foi restritiva ao desenvolvimento do *Panicum maximum* IPR-86 Milênio.

8. CAPÍTULO 3:INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO E ACUMULAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO EM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO

8.1 Introdução

A variação temporal do conteúdo de carbono orgânico do solo (COS), principal contribuinte da matéria orgânica, é determinado pela diferença entre as quantidades adicionadas na forma de resíduos vegetais e animais e as quantidades perdidas pela decomposição microbiana. Em solos sob condição natural há uma tendência de estabilização do COS, por causa do equilíbrio entre as quantidades adicionadas e perdidas anualmente (Bayer e Mielniczuk, 1997).

A utilização dos solos pela agropecuária é baseada em práticas convencionais de manejo que proporcionam um declínio dos estoques de COS (Cardoso et al., 2010), principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, em que as condições climáticas favorecem as taxas de decomposição microbiana. Desta forma, o aporte de COS ao solo, necessário para a manutenção dos estoques nessas regiões é superior a quantidade necessária em solos de regiões temperadas (Bayer e Mielniczuk, 2008). Paustian et al. (1992) em experimento conduzido na Suécia (temperatura média anual de 5,4 °C) concluíram que foi necessário a adição de 1,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de carbono fotossintetizado para manutenção dos estoques iniciais de carbono orgânico no solo (32,38 Mg ha⁻¹). Por outro lado, Lovato et al. (2004) relatam que, em experimento conduzido no sul do Brasil (temperatura média anual de 19,5 °C), é necessário adicionar de 8,55 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para manutenção dos estoques iniciais de COS no solo (32,55 Mg ha⁻¹).

Além das condições climáticas, a textura do solo também exerce papel marcante quanto ao conteúdo e estoque de carbono orgânico nos solos. Normalmente, solos argilosos com predomínio de carga variável, como os Latossolos, apresentam menores taxas de decomposição de matéria orgânica em

comparação com solos arenosos menos intemperizados (Bayer, 1996). Sob condições ambientais semelhantes, solos com maiores conteúdos de argila geralmente apresentam maiores conteúdos de COS. A maior superfície específica das frações argila e silte favorecem a formação de ligações com matéria orgânica solúvel criando um ambiente de proteção coloidal do carbono no solo. Além disso, nos solos mais argilosos, a floculação das argilas e a formação de agregados estáveis proporcionam uma proteção física pela oclusão da matéria orgânica solúvel dentro dos agregados, dificultando ou impedindo ação dos microrganismos decompositores e suas enzimas, resultando na maior preservação do carbono orgânico no solo (Silva e Mendonça, 2007). Esses mecanismos de proteção são mais atuantes em camadas mais superficiais, em que a incorporação de resíduos vegetais é maior e os processos de decomposição da matéria orgânica são mais ativos (Zinn et al., 2005).

A manutenção e acúmulo de carbono orgânico têm fundamental importância na capacidade produtiva dos solos em razão dos efeitos sobre a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de troca de cátions, a complexação de elementos tóxicos, a agregação, a infiltração e retenção de água, a aeração e a atividade e biomassa microbiana (Bayer e Mielniczuk, 2008; Ciotta et al., 2003; Bayer e Mielniczuk, 1997). A baixa capacidade de troca de cátions é uma das características responsáveis pela limitação do potencial produtivo dos solos de textura arenosa. Assim, nestes solos a contribuição da matéria orgânica para o aumento da retenção de cátions é essencial para a obtenção de elevadas produtividades em sistema de produção agropecuária.

O acúmulo de carbono orgânico no solo sob qualquer vegetação está associado a sua produtividade primária líquida (PPL). Nas pastagens esse valor pode ser estimado pela soma da produção total de forragem, equivalente a PPL da parte aérea e produção total de raízes, equivalente PPL subterrânea (Boddey et al., 2001). Neste contexto, a adubação dos solos e em especial a adubação nitrogenada proporciona expressiva contribuição para a produtividade das pastagens e conseqüentemente para a PPL. O aumento da produtividade das pastagens associada ao aumento da velocidade de crescimento das forragens

adubadas com nitrogênio permite o aumento das taxas de lotação animal por área (intensificação do pastejo) sem comprometer a quantidade de forragem ofertada individualmente aos animais. Assim, a intensificação do pastejo baseada na adubação das pastagens pode contribuir para o aumento do aporte de COS e para o acúmulo no decorrer dos anos devido ao incremento de fitomassa e dejetos animais adicionados ao solo ao longo dos anos.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da intensificação do pastejo, decorrente do aumento da produtividade de *Panicum maximum* IPR-86 Milênio pela adubação nitrogenada, no conteúdo e estoque de carbono orgânico do solo (COS) na capacidade de troca de cátions (CTC) na camada de 0- 0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico, bem como avaliar a relação do carbono orgânico com a CTC.

8.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (23° 00'4" S, 42°02'06"O, altitude 460 m), no município de Paranaíba, região noroeste do Paraná, em solo classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006). Os resultados das análises de amostras de solo da área experimental são apresentados no Quadro 8.1.

Quadro 8.1. Caracterização granulométrica e classe textural dos diferentes horizontes do Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Horizonte	Profundidade	Argila	Silte	Areia	Classe textural
	m	-----	g kg ⁻¹	-----	
A	0 – 0,2	110	20	870	Areia Franca
Bt ₁	0,2 – 0,5	193	13	793	Franco arenoso
Bt ₂	0,5 – 2,0	207	7	787	Franco argilo arenoso

O capim IPR-86 Milênio foi semeado em outubro de 1995, e explorado com diferentes níveis de intensificação do pastejo (NI) desde outubro de 1997, quando iniciou a fertilização do solo com diferentes doses de nitrogênio. Os níveis de intensificação do pastejo dispostos no Quadro 8.2 foram baseados na taxa de lotação animal, ciclos de pastejo e massa de forragem que variaram em

função da aplicação das doses crescentes de nitrogênio: 0, 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, equivalente aos níveis de intensificação de NI₁ até NI₄.

Quadro 8.2. Descrição dos níveis de intensificação de uso da pastagem, taxa de lotação, ciclos de pastejo e produção de massa seca de forragem no período de 2007-2009, referentes a um valor médio de ocupação de 209 dias no período de verão.

	NI ₁	NI ₂	NI ₃	NI ₄
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	0	150	300	450
Taxa de lotação (UA ha ⁻¹)	1,26	5,57	7,45	8,23
Ciclos de pastejo	1,25	4,06	5,38	5,38
Massa de forragem (kg MS ha ⁻¹ ciclo de pastejo ⁻¹)*	3689	5734	6351	6638

* Corte a 0,20 m em relação ao nível do solo

A fonte utilizada para a adubação nitrogenada foi o nitrato de amônio e a aplicação das doses foi parcelada nos ciclos de pastejo. A adubação fosfatada (superfosfato simples) e potássica (cloreto de potássio) foram realizadas quando necessárias, para manter a disponibilidade destes nutrientes em níveis adequados ao desenvolvimento da forragem. A correção da acidez do solo foi realizada durante os anos de 1998, 2000 e 2007. As quantidades de calcário aplicadas em cada um dos níveis de intensificação podem ser observadas no quadro 8.3.

Quadro 8.3. Histórico da aplicação de calcário para a correção da acidez do solo

Ano	Nível de intensificação	Calcário t ha ⁻¹
1998	NI ₁	1,0
	NI ₂	1,12
	NI ₃	1,46
	NI ₄	1,70
2000	NI ₁	1,0
	NI ₂	1,0
	NI ₃	1,0
	NI ₄	1,0
2007	NI ₁	0,35
	NI ₂	0,44
	NI ₃	0,72
	NI ₄	1,08

No ano de 1998, foi utilizado calcário calcítico (PRNT = 96%) e o objetivo da calagem foi corrigir a saturação por bases a 70% na camada de 0-0,20 m. Em 2000, foi aplicada uma tonelada em todos os níveis de intensificação do pastejo como forma de manutenção. No ano de 2007, por sua vez as doses de calcário aplicadas (PRNT = 85%) tiveram o objetivo de corrigir a saturação por bases para 70% apenas na camada de 0-0,10 m.

A caracterização química do solo na camada de 0-0,2 m em cada um dos níveis de intensificação do pastejo pode ser observada no quadro 8.4.

Quadro 8.4 . Caracterização química da camada de 0-0,2 m do Argissolo Vermelho Distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo durante os anos de condução do experimento.

Ano	NI	P ⁽¹⁾	C ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽¹⁾	CTC	V
		mg dm ⁻³	g dm ⁻³								%
1998	NI1	4.9	6.41	5.5	0.00	2.40	1.58	0.57	0.25	4.79	49.86
	NI2	3.8	5.97	5.3	0.00	2.45	1.35	0.55	0.23	4.57	46.41
	NI3	3.1	6.48	4.9	0.03	2.90	1.36	0.49	0.28	5.03	42.20
	NI4	4.6	7.21	4.7	0.05	3.18	1.23	0.40	0.42	5.23	38.79
2000	NI1	4.7	6.25	5.6	0.00	2.11	1.55	0.63	0.26	4.55	53.55
	NI2	4.2	5.93	5.3	0.00	2.29	1.33	0.58	0.25	4.45	48.74
	NI3	3.3	6.75	4.9	0.03	2.69	1.21	0.57	0.39	4.85	44.35
	NI4	4.4	6.56	4.4	0.16	3.06	0.89	0.45	0.45	4.84	36.47
2001	NI1	7.8	7.39	6.4	0.00	1.62	2.39	1.14	0.30	5.45	70.06
	NI2	5.6	7.06	6.3	0.00	1.65	2.07	1.02	0.21	4.95	66.60
	NI3	5.9	7.66	6.4	0.00	1.69	2.01	1.06	0.49	5.24	67.81
	NI4	8.1	6.91	6.3	0.00	1.69	1.78	0.92	0.41	4.79	64.76
2004	NI1	9.0	7.32	6.1	0.00	2.09	1.82	1.13	0.15	5.19	59.47
	NI2	6.4	7.06	5.8	0.00	2.23	1.49	0.99	0.23	4.95	54.62
	NI3	4.3	7.40	5.4	0.01	2.57	1.36	2.26	0.34	5.17	50.73
	NI4	4.0	7.67	5.2	0.03	2.64	1.17	0.92	0.31	5.04	47.04
2005	NI1	6.1	6.97	5.8	0.00	2.27	1.60	0.99	0.16	5.01	54.47
	NI2	6.8	7.57	5.8	0.00	2.23	1.48	1.03	0.16	4.90	54.40
	NI3	5.2	8.35	5.6	0.00	2.44	1.58	1.14	0.23	5.39	54.46
	NI4	4.1	7.75	5.1	0.02	2.74	1.36	0.99	0.21	5.29	47.96
2007	NI1	4.7	7.29	6.0	0.00	2.05	1.66	1.01	0.20	4.91	58.01
	NI2	6.5	7.41	5.7	0.00	2.21	1.65	0.91	0.17	4.93	55.05
	NI3	5.7	8.26	5.0	0.06	2.90	1.54	0.90	0.29	5.64	48.39
	NI4	7.4	8.49	4.5	0.16	3.63	1.40	0.70	0.28	6.00	39.47
2009	NI1	6.7	7.18	5.5	0.00	2.38	1.44	0.84	0.24	4.90	51.25
	NI2	6.8	7.41	5.4	0.00	2.50	1.51	0.90	0.18	5.09	50.83
	NI3	7.2	8.18	4.7	0.08	3.31	1.28	0.82	0.20	5.61	40.80
	NI4	9.8	8.54	4.3	0.32	4.28	0.78	0.61	0.17	5.84	26.87

Mehlich 1; ⁽²⁾ Walkley-Black; ⁽³⁾ CaCl₂; ⁽⁴⁾ KCl 1,0 M.

O ajuste da taxa de lotação animal teve por base a produtividade da pastagem e a oferta de 70% de matéria seca de lâminas foliares verdes em relação à produção total da forragem. Além disso, considerou-se a oferta diária de 11 kg de folhas verdes por 450 kg de peso vivo animal. O manejo da pastagem foi realizado visando à manutenção do resíduo pós-pastejo entre 20-25% de lâminas verdes em relação à produção em cada nível de intensificação.

As amostras de solo para determinação do carbono orgânico total (COS) e da capacidade de troca de cátion (CTC) foram coletadas em cada unidade experimental (piquete) nos anos 1998, 2000, 2001, 2004, 2005, 2007 e 2009 totalizando 112 unidades experimentais (4 níveis de intensificação do pastejo, 4 repetições e 7 anos de avaliação).

A determinação do conteúdo de carbono orgânico do solo (COS) foi realizada através da oxidação da matéria orgânica do solo por $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ em meio ácido (Walkley-Black) e seguiu os procedimentos de determinação descritos por Pavan et al. (1992). Os estoques de carbono foram calculados pelo produto do conteúdo de carbono orgânico do solo, a densidade e o volume da camada de solo amostrada.

A capacidade de troca de cátions potencial (pH 7,0) foi calculada pela soma dos conteúdos de H^+ , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e a CTC efetiva foi calculada pela soma dos conteúdos de Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis.

Os dados obtidos foram tabulados e analisados para avaliação da homogeneidade da variância (Levene) e normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk). Quando alguma das variáveis estudadas não atendeu estes pressupostos da análise de variância os dados foram transformados e novamente foi realizado o teste de Levene e Shapiro-Wilk. Atendidas as pressuposições a análise dos dados foi realizada utilizando os softwares estatísticos SAS e SISVAR.

A análise estatística dos resultados para a comparação dos níveis de intensificação foi realizada considerando através da análise de variância com disposição das parcelas em delineamento inteiramente ao acaso com parcelas subdivididas. Fator principal, parcela, foi constituída pelos níveis de intensificação ($\text{NI}_1, \text{NI}_2, \text{NI}_3$ e NI_4) e o secundário, subparcelas, pelos anos de avaliação (1998, 2000, 2001, 2004, 2005, 2007 e 2009).

As médias dos efeitos isolados (nível de intensificação e ano de avaliação) foram desdobradas, independente da significância dos valores de “F” das interações na análise de variância principal (Mischán e Pinho, 1996). Para comparação das médias dos níveis de intensificação do pastejo, dentro de cada ano de avaliação, foi utilizado o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). O efeito dos anos

em cada nível de intensificação foi realizado através da análise de regressão. Os modelos foram considerados ajustados quando seus coeficientes foram significativos.

8.3 Resultados e discussão

A avaliação do teor de carbono orgânico do solo (COS) na camada de 0-0,20 m do Argissolo Vermelho Distrófico demonstrou diferenças entre os níveis de intensificação em apenas alguns dos anos avaliados (Quadro 8.5). No primeiro ano o tratamento mais intensificado NI₄ apresentou teor de COS superior aos demais níveis de intensificação. No terceiro, quarto e sétimo ano após a implantação não foi observada diferença entre os níveis de intensificação do pastejo. Os tratamentos mais intensificados (NI₃ e NI₄) passaram a apresentar maiores conteúdos de COS em relação ao tratamento NI₁ no oitavo ano e ao NI₁ e NI₂ no décimo e décimo segundo ano após a implantação da pastagem (Quadro 8.5).

Os resultados demonstram uma estabilização dos conteúdos de COS no solo entre os níveis de intensificação do pastejo nos primeiros anos de avaliação e posteriormente uma diferenciação em que os tratamentos mais intensificados apresentaram maior conteúdo de carbono no solo (Quadro 8.5). Em solos tropicais o acúmulo de carbono no solo tende a ocorrer lentamente, sendo necessários alguns anos para que mostre tal tendência (Bayer e Mielniczuk, 2008).

Quadro 8.5. Valores médios de carbono orgânico do solo (COS), em g dm⁻³ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo em diferentes anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-86 Milênio.

Nível de intensificação	Anos após a implantação											
	1		3		4		7		8		10	
NI ₁	6,41	B	6,25	A	7,39	A	7,32	A	6,97	B	7,29	B
NI ₂	5,97	B	5,93	A	7,06	A	7,06	A	7,57	A	7,41	B
NI ₃	6,48	B	6,75	A	7,66	A	6,50	A	7,76	A	8,26	A
NI ₄	7,21	A	6,56	A	6,91	A	7,67	A	8,35	A	8,49	A

Médias seguidas da mesma letra dentro de cada ano de avaliação (coluna) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

O conteúdo de carbono orgânico no solo é determinado pelas quantidades de carbono adicionadas e perdas do sistema (Bayer e Mielniczuk, 2008). A adição representa a fração do carbono efetivamente retida no solo após a deposição e decomposição dos dejetos animais ou de resíduos vegetais, exudados radiculares e raízes. As perdas, por sua vez, representam a fração do carbono retirada do solo pela atividade microbiana, erosão ou lixiviação (Dalal e Mayer, 1986).

Considerando que a taxa de decomposição do material adicionado e as quantidades de carbono perdidas foram semelhantes nos diferentes níveis de intensificação do pastejo avaliados, os maiores conteúdos de carbono nos tratamentos mais intensificados podem ser decorrentes do maior aporte de material orgânico sobre os solos. A maior quantidade de massa seca de forragem dos tratamentos NI₃ e NI₄ proporcionaram o aumento das taxas de lotação animal e aumento do número de ciclos de pastejo (Quadro 8.2) que, por sua vez, contribuíram para o aporte de matéria orgânica decorrente do maior pisoteio dos animais sobre a pastagem e maior deposição de dejetos animais sobre os solos nestes tratamentos. Quando o aumento da taxa de lotação animal não acompanha o aumento da produtividade da pastagem (aumento da pressão de pastejo) há uma redução da quantidade de material orgânico depositado sobre o solo na forma de liteira (Resende et al., 1999) reduzindo o aporte de carbono no solo (Souza et al., 2009). Desta forma o aumento da produtividade das pastagens pela adubação nitrogenada e o controle da oferta animal realizado no experimento do presente trabalho foi fundamental para aumentar o aporte de matéria orgânica no solo nos tratamentos mais intensificados.

A diferenciação dos conteúdos de carbono orgânico no solo nos últimos anos de avaliação indica taxas de acúmulo diferenciadas entre os níveis de intensificação do pastejo. O ajuste de modelos de regressão dos teores de COS em função dos anos após a implantação da pastagem, em cada um dos níveis de intensificação, confirmou o acréscimo nos teores de COS em todos os níveis de intensificação do pastejo. Porém a taxa de acúmulo anual de COS na camada de 0-20 cm de solo, dada pelo coeficiente angular das equações, aumentou do menor

para o maior nível de intensificação do pastejo, sendo 0,07; 0,14; 0,17 e 0,17 g dm⁻³ para os níveis de intensificação NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄, respectivamente (Figura 8.1).

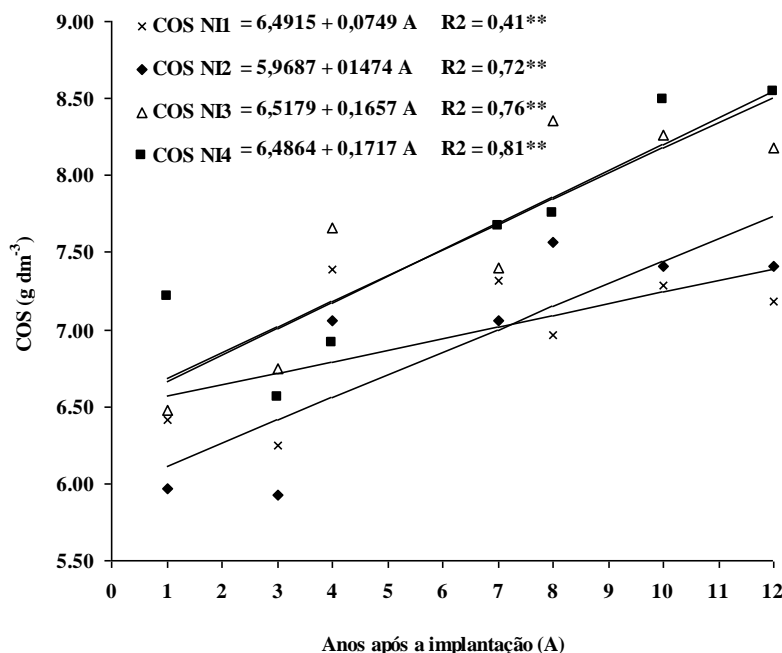


Figura 8.1. Modelos de regressão ajustados para o conteúdo de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico, em cada um dos níveis de intensificação avaliados (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄), em função dos anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-68 Milênio

O conteúdo de carbono orgânico no solo, COS, determinado durante os anos avaliados apresentou relação positiva com os valores de CTC pH 7,0 (Figura 8.2). A CTC pH 7,0 da fração mineral, obtida pelo coeficiente de interceptação do modelo ajustado na Figura 8.2 foi de 1,71 cmol_c dm⁻³. Considerando que o teor de argila desta camada de solo, 110 g kg⁻¹ de argila (Quadro 8.1), e que somente a fração argila é responsável pela CTC da fração mineral, estimou-se que a CTC em pH 7,0 da fração argila foi de 15,58 cmol_c dm⁻³.

A influência do conteúdo de COS sobre a CTC pH 7,0 é representada na equação da Figura 8.2 pelo coeficiente angular, indicando o incremento de 0,47 cmol_c dm⁻³ por 1 g de COS adicionado ao solo. Se considerar a densidade do COS igual a 1 kg dm⁻³ de COS, a estimativa da CTC pH 7,0 da matéria orgânica foi de 465 cmol_c dm⁻³. Comparando os altos valores estimados para a CTC pH

7,0 da fração orgânica ($465 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) com os baixos valores da CTC pH 7,0 da fração mineral ($15,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), observa-se a importância do COS na capacidade de retenção de cátions no solo, em especial em solos arenosos como o utilizado neste experimento.

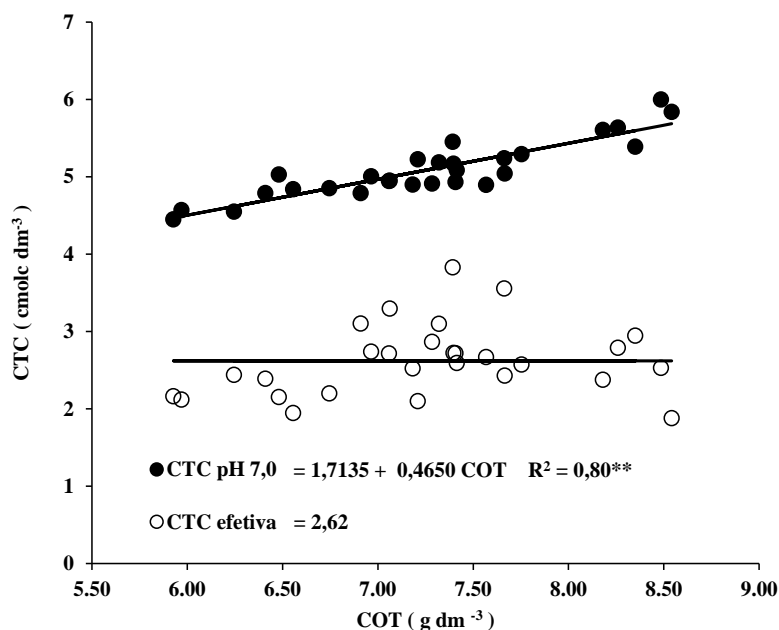


Figura 8.2. Relação entre os conteúdos de carbono orgânico total (COT) e a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC pH7,0) e efetiva (CTC efetiva) em Argissolo Vermelho Distrófico. Os pontos são referentes a média de quatro repetições dos quatro níveis de intensificação de pastejo em 7 anos avaliados entre 1998 e 2009.

O coeficiente angular dos modelos ajustados da capacidade de troca de cátions em função do conteúdo de carbono orgânico no solo reflete também a contribuição dos sistemas de manejo para o aumento da CTC potencial dos solos. Desta forma, a contribuição da pastagem, $0,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ por 1 g de COT adicionado ao solo no Argissolo Vermelho Distrófico (110 g kg^{-1} de argila), foi superior a encontrada por Bayer e Mielniczuk (1997) em Argissolo Vermelho ($0,28 \text{ g kg}^{-1}$ de argila) cultivado em sistema plantio direto com combinações de rotação de milho, aveia, trevo e caupi em clima subtropical ($0,31 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ por 1 g de COT adicionado ao solo). Estes resultados demonstram o grande potencial das pastagens adubadas, cultivada em sistema de pastejo rotacionado com controle das taxas de lotação, em acumular carbono orgânico e aumentar a capacidade produtiva dos solos pelo aumento da CTC potencial.

A CTC efetiva não mostrou dependência em relação à adição de COT (Figura 8.2). Esses resultados podem ser justificados pela baixa adição de bases no decorrer do experimento e pelo processo de acidificação do solo decorrentes da adubação nitrogenada fazendo com que grande parte da CTC pH 7,0 do solo fosse ocupada com os íons H^+ e Al^{+3} . Esses resultados proporcionaram intensa redução nos valores de saturação por bases nos maiores níveis de intensificação do pastejo, em que ocorreram os maiores acúmulos de COT no solo (Quadro 8.4).

A intensificação do pastejo diferenciou a capacidade de troca de cátions potencial do solo, CTC pH 7,0 (Quadro 8.6). No primeiro ano após o plantio da pastagem os maiores níveis de intensificação, NI₃ e NI₄, apresentaram CTC pH 7,0 superiores aos menores níveis de intensificação NI₁ e NI₂. No terceiro, quarto e sétimo ano a CTC pH 7,0 variou pouco entre os níveis de intensificação de pastejos avaliados. No quarto ano, apesar da baixa variação dos valores de CTC pH 7,0 houve diferenças significativas entre os níveis de intensificação, sendo que, os níveis de intensificação NI₂ e NI₄ apresentaram valores inferiores aos níveis NI₁ e NI₃.

Nos últimos anos de avaliação, os maiores níveis de intensificação, NI₃ e NI₄ voltaram a apresentar maior capacidade de troca de cátions em relação aos menores níveis de intensificação avaliados NI₁ e NI₂ (Quadro 8.6). Esses resultados demonstraram que as maiores taxas de adição de carbono nos tratamentos mais intensificados, discutidos anteriormente, possibilitaram o incremento da CTC pH 7,0 contribuindo para o aumento potencial de retenção de cátions básicos no solo.

Quadro 8.6. Valores médios de capacidade de troca de cátions a pH 7,0 em $cmol_c\ dm^{-3}$ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico em função do nível de intensificação do pastejo em diferentes anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-86 Milênio.

Nível de intensificação	Anos após a implantação											
	1		3		4		7		8		10	
NI ₁	4,79	B	4,55	A	5,45	A	5,18	A	5,01	B	4,92	B
NI ₂	4,57	B	4,45	A	4,95	B	4,95	A	4,90	B	4,94	B
NI ₃	5,02	A	4,85	A	5,28	A	5,28	A	5,39	A	5,63	A
NI ₄	5,22	A	4,84	A	5,04	B	5,04	A	5,29	A	6,00	A

Médias seguidas da mesma letra dentro de cada ano de avaliação (coluna) não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Os valores da CTC pH 7,0 têm valor relativamente constante para cada solo e é considerada uma característica inalterável por práticas agrícolas em um curto prazo de tempo (Raij, 2011). A avaliação no decorrer de doze anos da utilização do solo com pastagem de *Panicum maximum* IPR-86 milênio mostrou que os níveis de intensificação NI₂, NI₃ e NI₄ foram capazes de aumentar os valores da CTC pH 7,0 (Figura 8.3). O aumento da CTC pH 7,0 ocorreu pela contribuição da fração orgânica justificada pelas taxas de acúmulo de COS nos solos com o passar dos anos (Figura 8.3). No menor nível de intensificação os acúmulos de carbono com o passar dos anos não foram suficientes para aumentar a CTC pH 7,0 do solo.

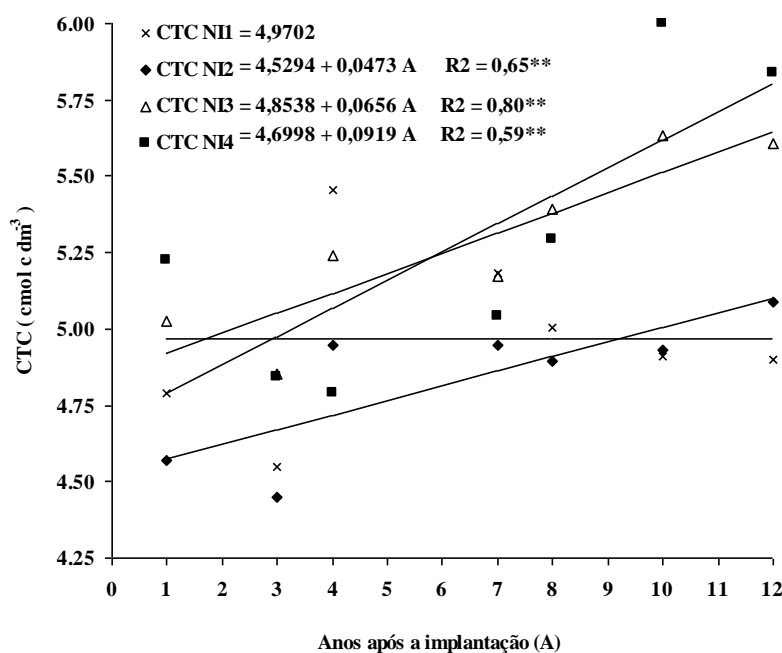


Figura 8.3. Modelos de regressão ajustados para o Capacidade de troca de cátions do solo (CTC) a pH 7,0 em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico, em cada um dos níveis de intensificação avaliados (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄), em função dos anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-68 Milênio

O coeficiente angular dos modelos matemáticos ajustados permitem inferir que a contribuição dos anos para o incremento da CTC pH 7,0 do solo aumentou de acordo com o nível de intensificação do pastejo. A cada ano de adoção do sistema de manejo houve incremento de $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o NI₂, $0,07 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o NI₃ e $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o NI₄. Considerando como

referência a CTC pH 7,0 média do tratamento NI₁ (4,9702 cmol_c dm⁻³) pode-se inferir que após 12 anos da implantação do experimento os níveis de intensificação NI₂, NI₃ e NI₄ foram capazes de incrementar a CTC pH 7,0 do solo em 11%, 16% e 22%, respectivamente, aumentando o potencial produtivo do Argissolo Vermelho Distrófico avaliado.

As diferentes taxas de acúmulo de carbono entre os níveis de intensificação do pastejo, discutidas anteriormente, contribuíram para diferenciar os estoques de carbono na camada de 0-0,2 m do Argissolo Vermelho Distrófico avaliados quatorze anos após a implantação da pastagem. Os níveis de intensificação NI₃ e NI₄ apresentaram maiores quantidades de carbono orgânico estocado em relação aos níveis de intensificação NI₁ e NI₂ (Figura 8.4).

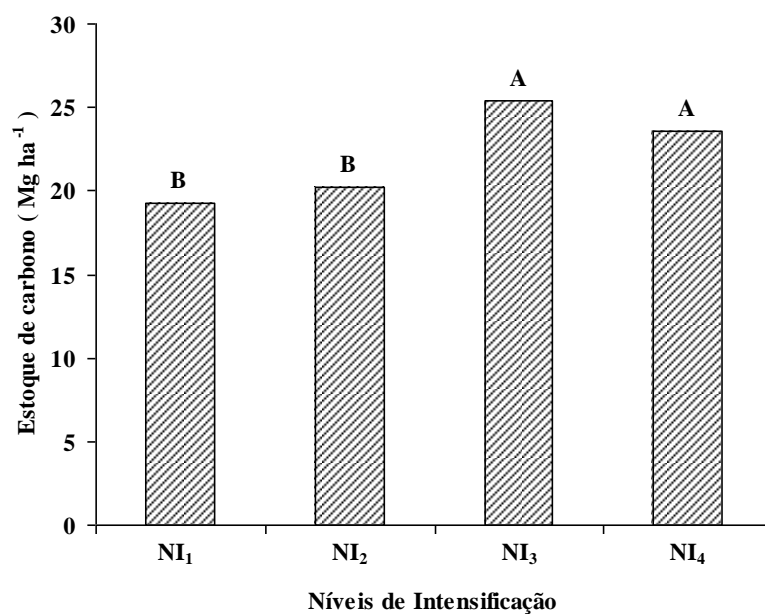


Figura 8.4. Comparação do estoque de carbono entre os níveis de intensificação do pastejo (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo Vermelho Distrófico quatorze anos após a implantação da pastagem de *Panicum maximum* Jacq. IPR-68 Milênio pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A utilização de estratégias de manejo conservacionistas em experimentos de longa duração tem demonstrado uma relação linear e positiva entre o aporte de resíduos vegetais e o incremento do estoque de carbono (Bayer et al., 2007). As maiores quantidades de carbono estocado nos tratamentos mais intensificados são justificadas pela maior taxa de acúmulo anual de carbono no solo observada

nestes tratamentos (Figura 8.1). Ressalta-se que o ajuste das taxas de lotação a quantidade de forragem produzida e, as maiores quantidades de forragem produzidas nos maiores níveis de intensificação do pastejo (Quadro 8.2) foram fundamentais para a diferenciação no estoque de carbono no solo. Salton (2005) observou comportamento semelhante no acúmulo do estoque de carbono com o passar dos anos em Latossolo Vermelho Distroférico típico cultivado com pastagem (*Brachiaria decumbens*) e sob sistema de integração entre lavoura e pastagem (soja 2 anos, *Brachiaria decumbens* dois anos).

8.4 Conclusões

1. A intensificação do pastejo proporcionou aumento da taxa de acúmulo anual de carbono orgânico do solo na camada de 0-0,2 m do Argissolo Vermelho Distrófico.
2. O aumento do conteúdo de carbono orgânico do solo teve relação positiva com o incremento da capacidade de troca de cátions potencial do solo CTC pH 7,0.
3. A intensificação do pastejo proporcionou aumento da taxa de incremento anual da capacidade de troca de cátions potencial do Argissolo Vermelho Distrófico.
4. A quantidade de carbono estocado no solo foi mais elevada nos maiores níveis de intensificação do pastejo.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As alterações ocorridas nos indicadores de qualidade física do solo pela intensificação do pastejo não comprometeram a resposta do capim *Panicum maximum* Jacq IPR – 86 milênio à adubação nitrogenada mesmo após 12 anos de utilização da pastagem com os diferentes níveis de intensificação (Figura 6.1).

A alteração dos indicadores de qualidade física do solo pelo pisoteio dos animais ocorre na camada de solo de 0-0,10 m (Greenwood e McKenzie, 2001). Nesta camada de solo os valores de resistência do solo à penetração e densidade se mostraram adequadas ao desenvolvimento das plantas levando em conta os limites críticos usualmente citados nas literaturas científicas (Quadro 9.1).

Quadro 9.1. Indicadores de qualidade física na camada de 0-0,10 m do solo e valores adequados sugeridos por diferentes autores

Indicador	Valor mínimo	Valor máximo	Valor adequado	Fonte
RP (MPa)	0,59	1,93	< 2,5	Imhoff et al., 2000
Ds (Mg m ⁻³)	1,43	1,73	< 1,8	Jones., 1993
CAT/Pt (%)	46	65	34	Olness et al., 1998
CC/Pt (%)	35	54	66	Olness et al., 1998

Considerando ainda a camada de 0-0,10 m, observou-se que na posição de pisoteio dos animais (entre touceiras, ST) ocorreu maiores valores de resistência do solo à penetração (Figura 6.3) e densidade do solo (Figura 7.3) em relação à posição da touceira (CT) em todos os níveis de intensificação. A menor quantidade de poros na posição entre touceiras, ST (Figura 7.3) justificam os maiores valores de densidade do solo (Figura 7.3) e a menor quantidade de poros associada ao menor conteúdo de água (Figura 6.3) justificam os maiores valores de resistência à penetração (Figura 6.3).

Os resultados discutidos acima demonstram que a pressão causada pelo pisoteio dos animais na área entre touceiras (ST) alterou a estrutura do solo em todos os níveis de intensificação do pastejo reduzindo a capacidade de infiltração de água no solo nesta posição representada neste trabalho pela condutividade hidráulica saturada (Figura 7.3). No entanto, as alterações causadas à estrutura do solo pelo pisoteio dos animais, mesmo nos maiores níveis de intensificação da

pastagem, não atingiram os limites críticos usualmente citados na literatura como restritivo ao desenvolvimento das plantas (Quadro 9.1).

Os índices de capacidade de aeração total do solo (CAT/Pt) e a capacidade de armazenamento de água no solo (CC/Pt) na camada de 0-0,10, mostraram inadequados nas duas posições de amostragem e em todos os níveis de intensificação demonstrando a baixa capacidade de retenção de água desta camada de solo (Figura 9.1). Estes resultados demonstraram a baixa capacidade de retenção de água da camada de 0-0,10 m sendo que a taxa de infiltração na região da touceira (CT) variou entre rápida a bastante rápida e na região entre touceiras (ST) de lenta a média (Figura 7.6, Quadro 7.4).

A alteração da estrutura do solo causada pelo pisoteio dos animais na área entre touceiras (ST) contribuiu para melhorar a retenção de água no solo na camada superficial do solo em que concentrou 58% das raízes (Figura 6.3). Esse efeito foi mais evidenciado nos tratamentos mais intensificados NI₃ e NI₄ que apresentaram o melhor equilíbrio entre a capacidade de armazenamento de água e aeração do solo mostrando que a intensificação do pastejo também contribuiu para aumentar a retenção de água no solo.

Além do aumento na retenção de água, a intensificação do pastejo proporcionou aumento da capacidade de acúmulo de carbono orgânico no solo (Figura 8.1) resultando em maiores quantidades de carbono estocado no solo 14 anos após a implantação da pastagem (Figura 8.4). O incremento no conteúdo de carbono orgânico do solo aumentou a capacidade produtiva do Argissolo Vermelho Distrófico em razão do incremento nos valores da CTC potencial (Figura 8.2). A quantidade de carbono orgânico estocado no solo demonstrou relação positiva com indicadores relacionados a capacidade de retenção de água no solo e negativa com a resistência do solo à penetração (Quadro 8.7) demonstrando que os maiores conteúdos de carbono orgânico no solo nos tratamentos mais intensificados podem ter contribuído para mitigar o efeito deletério do pisoteio animal sobre o solo.

A falta de relação entre o estoque de carbono e a capacidade de troca de cátions efetiva (Figura 8.2) demonstrou que as correções da acidez do solo no

decorrer do experimento não foram eficientes. Assim a baixa saturação por bases observada nos tratamentos mais intensificados (Figura 8.4), em que o potencial de acidificação do solo foi maior por causa das maiores doses de fertilizante nitrogenado aplicado no solo, contribuiu para redução da produção de raízes nestes tratamentos (figura 6.3) e pode ainda ter inibido a capacidade do *Panicum maximum* Jacq. IPR-86 Milênio expressar sua máxima capacidade produtiva. Assim, a correção da acidez do solo pela calagem deve ser realizada com maior frequência com a finalidade de garantir condições adequadas para as pastagens expressarem seu potencial produtivo.

A adequação da taxa de lotação animal a produção de *Panicum maximum* Jacq. IPR-86 Milênio e a manutenção de uma massa de forragem adequada após o pastejo foi fundamental para a sustentabilidade do solo e da pastagem. A pressão de pastejo neste trabalho foi a mesma nos diferentes níveis de intensificação do pastejo. Independentemente da produtividade da espécie forrageira utilizada, deve-se respeitar a capacidade suporte das pastagens afim de não aumentar a pressão de pastejo e conduzir o sistema à degradação.

Desta forma, recomenda-se a intensificação do pastejo baseadas no controle da taxa de lotação animal em função da produtividade da pastagem como forma tecnicamente sustentável de melhoria da produtividade animal por área explorada em Argissolo Vermelho Distrófico. Tendo em vista o potencial acidificante dos fertilizantes nitrogenados recomenda-se o aumento da frequência de correção da acidez do solo.

10. Referências bibliográficas

- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado sobre mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2p. 337- 345, 2004.
- BALSALOBRE, M.A.A.; SANTOS, P.M.; MENDONÇA DE BARROS, A.L.; Inovações tecnológicas, investimentos financeiros e gestão de sistemas de produção animal em pastagens. In: PEIXOTO, A.M.; MOURA J.C.; PEDEIRA, C.G.S.; FARIA, V.P. (eds). Simpósio sobre Manejo de Pastagens, 19. **Anais...**Piracicaba, 2002. p.1-30
- BARCELLOS, A.O. Sistema extensivos e semi-intensivos de produção: pecuária bovina de corte nos cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília. **Anais...** Planaltina: Embrapa-CPAC, 1996. p. 130-136.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 241 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1996.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21 n.1 p. 105-112, 1997.
- BAYER, C.; MIELNIZUK, J. Dinâmica e Função da Matéria Orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.O. (eds). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.7-18.

- BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, n. 3, p. 341-358, 1990.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. de; ALMEIDA, E.X.; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de Capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35 n. 5 p. 1047-1054, 2000.
- BERTOL, I.; GOMES, K. E.; DENARDIN, R. B. N.; MACHADO, L. A Z.; MARASCNIN, G. E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33 n.5 p. 779-786, 1998.
- BERTOL, I.; MAFRA, A. L.; COGO, N. P. Conservação do solo em pastagem. In: PEREIRA, C. G. S.; MOURA, J. C.; SILVA, S. C.; FARIA, V. P. (eds) **As pastagens e o meio ambiente – SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS**, 23; Piracicaba, FEALQ, 2006. p.139-163.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v, 32 n. 3 p.975-983, 2008.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.). **Method of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R.; OLIVEIRA, O.C.; URGUAGA, S. Potencial para acumulação e sequestro de carbono em pastagens de *Brachiaria*. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ D.G. (orgs.). **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 213-229.

- BREWER, R.; SLEEMAN, J.R. Soil structure and fabric: their definition and description. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 172-185, 1960.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transaction of the ASABE**, St. Joseph, v.3, n. 2 p. 519-524, 1990.
- CAMPOS, F.P.; LANNA, D.P.D.; BOSE, M.L.V.; BOIN, C.; SARMENTO, P. Degradabilidade do capim-elefante com diferentes estágios de maturidade avaliada pelo método in vitro/gás. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59 n. 2, p.217-225, 2002.
- CANTARUTTI, R. B.; NASCIMENTO Jr, D.; COSTA, O V. Impacto do animal sobre o solo: compactação e reciclagem de nutrientes. In: MATTOS, W. R. S. et al. (eds) **Produção animal na visão dos brasileiros**; Piracicaba, 2001. Piracicaba: FEALQ, 2001. p 826 – 837.
- CARDOSO, E.V.; SILVA, M.L.N.; SILVA, C.A.; CURI, N.; FREITAS, D.A.F. Estoques de carbono e nitro gênio em solo sob floretas nativas e pastagem no bioma pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, n. 9, p. 1028-1035, 2010.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25 n. 1, p.183-188, 1995.
- CATARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N.F; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. e NEVES,J.C.L., (eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa, SBCS, 2007. p.375-470.
- CATE, R.B.J.; NELSON, L.A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 35 n.4, p. 658-660, 1971.

- CAVALLINI, M.C.; ANDREOTTI, M.; OLIVEIRA, L.L.; PARIZ, C.M. CARVALHO, M.P. Relação entre produtividade de *Brachiaria brizantha* e atributos físicos de um Latossolo do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n. 4, p. 1007-1015, 2010.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.
- CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? **Plant Soil**, Holanda, v. 255, n. 1, p. 93-104, 2003.
- COCKROFT, B.; OLSSON, K.A. Case study of soil quality in south-eastern Australia: Management of structure for roots in duplex soils. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (Eds.). **Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science**, Elsevier, New York, 1997. p. 339-350.
- CORSI, M. Parâmetros para intensificar o uso de pastagens. In: Congresso brasileiro de raças zebuínas, 1., 1994, Uberaba. **Anais...Uberaba:ABCZ**, 1994. p.113-126.
- CRAUL, P.J. **Urban Soils: Applications and Practices**. Wiley, Toronto , 1999.
- CUNHA, J.E.; NOBREGA, M. T.; CASTRO, S.S. Infiltração de água no solo no sistema pedológico campos do arenito, Cidade Gaúcha, noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n. 5, p. 1837-1848, 2008.
- DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Queensland, v.24, n. 2, p. 281-292, 1986.

- DAVIS, W.J.; ZHANG. J. Roots signal and regulations of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Bayreuth, v. 42, p. 55-76, 1991.
- DEXTER A. R.. Soil structure: the key to soil function. **Advances in GeoEcology**, Reiskirchen, v.35, p.57-69, 2002.
- DIAS JUNIOR, M. de S.; ESTANISLAU, W. T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 45 – 51, 1999.
- DONKOR, N. T.; GEDIR, J. V., HUDSON, R. J.; BORK, E. W.; CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. **Canadian Journal of Soil Science**, Nepean, v. 82, n.1, p. 1–8, 2002.
- DUPAS, E.; BUZETTI, S.; SARTO, A. L.; HERNANDEZ, F. B.T.; BERGAMASCHINE, A. F. Dry matter yield and nutritional value of Marandu grass under nitrogen fertilization and irrigation in cerrado in São Paulo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, n. 12, p. 2598-2603, 2010.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de laboratório**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2007, 212 p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; CECATO, U.; BARBEIRO, L.M.; LUGÃO, S.M.B. e COSTA, M. A. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob o pastejo contínuo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1583-1590, 2008.

- FIGUEREDO, G. C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 163 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010. 163p
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L. e BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1. p. 49-57, 2006.
- GOMES, A.S.; SILVA, C.A.S.; PARFIT, J.M.B.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. **Caracterização de indicadores da qualidade do solo, com ênfase às áreas de várzea do Rio Grande do Sul**. Pelotas, Embrapa Clima Temperado, 2006. 40 p. (Documentos, 169).
- GOMIDE, J. A. Manejo da pastagem para a produção de leite. In: Simpósio Internacional de Forragicultura, 31, 1994, Maringá. **Anais...Maringá: SBZ**, p.141-168,1994.
- GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968.
- GREENWOOD, K.L.; MACLEOD, D.A. e HUTCHINSON, K.J. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Queensland, v. 37, n. 4, p. 413-419, 1997.
- GREENWOOD, K.L.; McKENZIE, B.M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Queensland, v. 41, n. 8, p. 1231-1250, 2001.
- GRUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v.6, n.1, p. 65-100, 1987.

- HAKANSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. eds. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.167-180.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p. 121-145, 2005.
- HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 34, n.4 ,p. 535-546, 1988.
- HILLEL, D. **Environment soil physics**. San Diego, Academic Press, 1998. 771 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário (2006)**; Disponível em: [http:// www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br); Acesso em: dez/2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção pecuária Municipal 2010**;Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=2002&id_pagina=1; Acesso em: jul/2012.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Aplicação da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35 n.7 , p.1493-1500, 2000a.
- IMHOFF, S; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing system. **Plant Soil**, Holanda, v. 219 , n.1 p.161-168, 2000b.
- JONES, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 6, p.1208-1211, 1983.

- LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T. ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, A.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1-2, p.297-285, 2006.
- LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. In HODGSON, J.; ILLIUS, A. W. (eds). **Ecology and management of grazing systems**. Wallingford: CAB International, 1996. p. 3-36.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1 n. 1, p. 277-294, 1985.
- LIBARDI, P. L.; van LIER, Q. de J. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. In. Fernandes, M. F.; Tavares, E. D.; Leal, M. de L. da S. (Eds). **Workshop sobre sistema radicular: metodologias e estudo de casos**. Aracaju, 1999. EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 1999. p 47-55.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p.217-223, 2006.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Carbono e nitrogênio adicionados e sua relação com o rendimento do milho e estoques destes elementos no solo em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p.175-187, 2004.

- LUGÃO, S. M. B. **Produção de forragem e desempenho animal em pastagem de *Panicum maximum* Jacq. (acesso BRA – 006998) adubadas com nitrogênio na região noroeste do Paraná.** 2001. 151f. Tese (Doutorado em zootecnia) – Faculdade de ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2001.
- LUGÃO, S.M.B; RODRIGUES, L.R.A.; ABRAHÃO, J.J.S.; MALHEIROS, E.B. e MORAIS, A. Acúmulo de forragem e eficiência de utilização do nitrogênio em pastagem de *Panicum maximum* Jacq. (Acesso BRA-006998) adubadas com nitrogênio. *Acta Scientiarum (Animal Science)*, Maringá, v. 25, n. 2, p.371-379, 2003.
- MACEDO, M. C. M. **Degradação de pastagens: conceitos, alternativas e métodos de recuperação.** In: CURSO DE PASTAGENS, Embrapa Gado de Corte, maio de 2001, 12 p.
- MARTÍNEZ, L.J.; ZINCK, J.A. Temporal variation of soil and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 75, n. 1, p.3-17, 2004
- MESQUITA M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n. 3, p.963-969, 2004.
- MISCHAN, M.M.; PINHO, S.Z. **Experimentação agrícola: Dados não balanceados.** Botucatu, FUNDIBIO, 1996. 456 p.
- MOREIRA, J. A. A.; OLIVEIRA, I. P. de; GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F. Atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.35, n. 3, p. 155-161, 2005.
- MOREIRA, W.H.; BETIOLI JUNIOR. E.; PETEAN, L.P.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.; COSTA, M.A.T.; FRNCO, H.H.S. Atributos físicos de um

- Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 389-400, 2012.
- MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. de F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. da S. Degradação de pastagens na região amazônica: propriedades físicas dos solos e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, V. 36, n. 11, p. 1409-1418, 2001.
- MULLER, M.M.L.; GUIMARÃES, M.F.; DESJADINS, T. e MITJA, D. The relationship between pasture degradation and soil properties in Brazilian Amazon: a case study. **Agriculture Ecosystems e. Environment**, v. 103, n. 2, p. 279-288, 2004.
- NASCIMENTO JR, D.; QUEIROZ, D. S.; SANTOS, M. V. F. **Degradação das pastagens e critérios para a avaliação**. In: : SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 11.; Piracicaba, 1994. p.107-151.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI,N.; Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.
- OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração em Latossolo vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11 n. 3, p.265-270, 2007.
- OLIVEIRA, P.P.A.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, W.S.; CORSI,M. Fertilização com N e S na recuperação de pastagem de *Brachiaria brizanthacv*. Marandu em Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1121-129, 2005.

- OLNESS, A.; CLAPP, C.E.; LIU, R.; PALAZZO, A.J. Biosolids and their effects on soil properties. In: WALLACE, A.; TERRY, R.E. eds. **Handbook of soil conditioners**. New York, Marcel Dekker, 1998. p. 141-165.
- OTHMER, H.; DIEKKRUGER, B.; KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, n. 3, p. 139-150, 1991.
- PAGOTTO, D. S. **Comportamento do sistema radicular do capim Tanzânia irrigado e submetido a diferentes intensidades de pastejo**. 2001. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2001.
- PASSIOURA, M.; GARDNER, P.A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 17, p. 149-157. 1990.
- PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 2, p. 476-488, 1992.
- PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina, IAPAR, 1992. 40 p. (Circular técnica, 76).
- PEREIRA, S.A.; OLIVEIRA, G.C.; KLIEMANN, J.; BALBINO, L.C.; FRANÇA, A.F.S.; CARVALHO, E.R. Influence of different grazing systems on physical properties and aggregation in Savannah soils. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40 n. 3, p. 274-282, 2010.
- POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; MASSMANN, J. W.; HANSEN, J.A. Gas permeability and diffusivity in undisturbed soil. **Journal of Environment. Engineering**, New York, v.124, n. 10, p.979-986, 1998.

- PRIMAVESI, A.C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L.A.; SILVA, A.G.; CANTARELLA, H. Nutrientes na fitomassa de capim-Marandu em função de fontes e doses de nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.30, n. 3, p. 562-568, 2006.
- RAIJ, B.van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- RESENDE, C.P.; CANTARUTTI, R.B.; BRAGA, M.J.; GOMIDE, J.A.; PEREIRA, J.M.; FERREIRA, E., TARRÉ, R.M.; MACEDO, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K.; BODDEY, R.M. Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pasture in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 54, n. 1, p. 99-112, 1999.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110 n. 1-2, p. 131-146, 2002.
- REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Eds). **Methods of soil analysis**. 3 Ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 809-812.
- RIBEIRO, D.E.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solo da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n. 4, p.1167-1175, 2007.
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; SACRAMENTO, L.V.S. Sistema radicular e nutrição de soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.
- SÁ, J.P.G.; CAVIGLIONE, J.H. **Arenito Caiuá – Capacidade de lotação das pastagens**. Londrina, IAPAR. 15p. 1999. (Informe de Pesquisa 132)

- SALLES, P. A.A.; GONÇALVES, J. O. N. Eficiência econômica do uso de nitrogênio em pastagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.16, n. 1, p. 27-31, 1981.
- SALTON, J.C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158 f. Tese (Doutorado em ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SARMENTO, P. **Respostas agronômicas e morfológicas de *Panicum maximum* Jacq. (Acesso BRA – 006998), sob pastejo, à adubação nitrogenada**. 2005. 92 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2005
- SARMENTO, P.; RODRIGUES, L.R.A.; LUGÃO, S.M.B.; CRUZ, M.C.P. da; CAMPOS, F.P.; FERREIRA, M.E. Respostas agronômicas e morfológicas de *Panicum maximum* Jacq. CV. IPR-86 Milênio, sob pastejo, à adubação nitrogenada. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 64, n. 4, p. 333-346, 2005.
- SARMENTO. P.; RODRIGUES, L.R.A.; CRUZ, M.C.P; LUGÃO, S.M.B.; CAMPOS, F.P.; CENTURION, J. F.; FERREIRA, M.E. Atributos químicos e físicos de um Argissolo cultivado com *Panicum maximum* Jacq.cv. IPR-86 Milênio, sob lotação rotacionada e adubado com nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32 n. 1, p. 183-193,2008.
- SCHABENBERGER, O. SAS Library: **Nonlinear regression in SAS**. UCLA. Disponível em: http://www.ats.ucla.edu/stat/sas/library/SASNLin_os.htm, Acesso em 14/07/2010.
- SHUKLA, M.K.; LAL,R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, p. 194-204, 2006.

- SILVA, A. P. da; INHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigate short-duration grazing system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.70, p. 83-90, 2003.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; CORSI, M. Soil compaction versus cow-stocking rates on irrigated grazing system. **Advances in GeoEcology**, Reiskirchen, v. 35, n.4, p. 397-406, 2002.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S.; FIDALSKI, J.; NEVES JUNIOR, A.F. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: RIBEIRO, M.R.; NASCIMENTO, C.W.A.; RIBEIRO FILHO, M.R.; CANTALICE, J.R.B., Eds. **Tópicos em ciência do solo**. v.6. Viçosa, SBCS, 2009. p. 1-30.
- SILVA, I.R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V, V. H.; BARROS, N.F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.
- SKOPP, J.; LAWSON, M.D.; DORAN, J.W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 6, p. 1619-1625, 1990.
- SOUZA NETO, J. M.; PEDREIRA, C. G. S. Caracterização do grau de degradação de pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM: Fertilidade do solo para pastagens produtivas. 21. 2004. Piracicaba, SP. **Anais ...Piracicaba: FEALQ**, 2004. p. 7-32.
- SOUZA, E.D.; COSTA, S.E.V.G.A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoque de carbono e nitrogênio no solo em

sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidade de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009.

SSSA - SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Disponível em : <http://www.soils.org/sssagloss/>. Acesso em 25 fev.2011.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and roots systems subjects to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, n. 2-4, p. 217-243, 1994.

TARRÁ, I. L. C.; LUIZÃO, F.J.; WANDELLI, E.V.; TEIXEIRA W. G.; MORAIS W. J.; CASTRO, J.G.D. Tempo de uso em pastagens e volume de macroporos no solo na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 678-683, 2010.

TAYLOR, R.H.; BURNETT, E. Influence of soil strength on root growth habits of plant. **Soil Science**, Cheshire, v. 98, p.174-180, 1964.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da; LIBARD. P. I. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.22, n. 4, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p.

TRUJILLO, W.; FISCHER, M.J.; LAL, R. Roots dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 28-38, 2006.

TWERDOFF, D. A.; CHANASYK, D. S.; MAPFUMO, E.; NAETH, M. A.; BARON, V. S. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface

- relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, Nepean, v.79, n. 3, p. 465-471 1999.
- VEPRASKAS, M.J.; Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 6, p. 1220-1225, 1984.
- VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 4, n. 2, p. 242-246, 1966.
- WAGGER, M.G.; DENTON, H.P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 4, p. 1206-1210, 1989.
- ZIMMER, A. R.; EUCLIDES, V.P.B. Importância das pastagens para o futuro da pecuária de corte no Brasil. In: Simpósio de Forragicultura e Pastagens, 1., Lavras, 2000. **Anais...** Lavras:UFLA, 2000. p. 1-50.
- ZIMMERMANN, B.; PAPRITZ, A.; ELSENBEER, H. Asymmetric response to disturbance and recovery: Changes of soil permeability under forest-pasture transition. **Geoderma**, Amsterdam, v. 159 n. 1-2 , p. 209-215, 2010.
- ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbono stocks under agriculture in Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam. v.84, n.1, p. 28-40, 2005.