

RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E PRODUÇÃO DE RAÍZES E DE FORRAGEM EM DIFERENTES NÍVEIS DE INTENSIFICAÇÃO DO PASTEJO⁽¹⁾

Marco Aurélio Teixeira Costa⁽²⁾, Cássio Antonio Tormena⁽³⁾, Simony Marta Bernardo Lugão⁽⁴⁾, Jonez Fidalski⁽⁴⁾, Willian Gonçalves do Nascimento⁽⁵⁾ & Flaviane Marcolin de Medeiros⁽⁶⁾

RESUMO

A fertilização dos solos sob pastagens pode consistir numa forma sustentável de intensificação do pastejo desde que os efeitos deletérios do pisoteio animal sobre a qualidade física dos solos não comprometam a produtividade e, conseqüentemente, a sustentabilidade do sistema de produção de pastagens. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da intensificação do pastejo proporcionado pela adubação nitrogenada sobre a qualidade física do solo e o impacto na produção de forragem e de raízes de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio. O experimento foi conduzido no noroeste do Estado do Paraná (23° 5' S, 52° 26' W e altitude de 460 m). O manejo dos animais foi realizado em sistema de pastejo intermitente e carga animal variável. Para avaliar o efeito da intensificação de pastejo sobre a qualidade física do solo, foram medidos o conteúdo de água no solo, a resistência do solo à penetração e a produção de massa seca de forragem, de folhas verdes e de raízes como resposta biológica às condições físicas do solo. A adubação nitrogenada aumentou a produção de massa seca de forragem e de folhas verdes. Os menores valores de resistência do solo à penetração ocorreram no menor nível de intensificação na área de maior pisoteio dos animais, entre touceiras. Na região da touceira ocorreram menores valores de resistência do solo à penetração, do tratamento menos intensificado em relação aos demais, somente nas camadas de 0,2–0,3 e 0,3–0,4 m. O incremento

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada a Universidade Estadual de Maringá – UEM. Projeto financiado pelo Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR. Recebido para publicação em 29 de junho de 2011 e aprovado em 7 de março de 2012.

⁽²⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5.790, CEP 87020-900 Maringá (PR). E-mail: marcoatcosta@hotmail.com

⁽³⁾ Professor Associado, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). E-mail: catormena@uem.br

⁽⁴⁾ Pesquisador(a), Instituto Agrônomo do Paraná, Estação Experimental de Paranavaí. Caixa Postal 564, CEP 87701-970 Paranavaí (PR). E-mails: lugão@iapar.br, fidalski@iapar.br

⁽⁵⁾ Professor Adjunto, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Unidade Acadêmica de Garanhuns. Av. Bom Pastor s/n, CEP 55296-901 Garanhuns (PE). E-mail: willian@uag.ufrpe.br

⁽⁶⁾ Eng. Agrônoma, Bolsista de Projeto, Instituto Agrônomo do Paraná, Estação Experimental de Paranavaí. Caixa Postal 564, CEP 87701-970 Paranavaí (PR). E-mail: flaviane.medeiros@hotmail.com

da resistência do solo à penetração reduziu a produção de raízes de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio. A classe de maior produção de raízes foi definida quando os valores de resistência à penetração foram inferiores a 1 MPa.

Termos de indexação: pastagem, *Panicum maximum* Jacq. cv.- IPR-86 Milênio, pisoteio animal, conteúdo de água, compactação do solo.

SUMMARY: *SOIL RESISTANCE TO PENETRATION AND FORAGE AND ROOT PRODUCTION AT DIFFERENT GRAZING INTENSITIES*

Soil fertilization may be a sustainable strategy for the intensification of grazing, considering that the effects of cattle trampling that are deleterious for the soil physical quality do not affect the productivity and the sustainability of pasture production systems. The purpose of this study was to evaluate the effect of grazing at different intensities of N-fertilized pasture on the soil physical quality and impact on forage and root yield of Panicum maximum cv. IPR-86 Milênio. The experiment was conducted in Paranavaí -PR (23° 5' S, 52° 26' W; 460 m asl). The animal management consisted of rotational stocking at variable stocking rates. The amount of water retained in soil, resistance to root penetration and forage dry matter, green leaf and root production, were measured as biological response to soil physical conditions to assess the impact of grazing at different intensities on the soil physical quality. Nitrogen fertilization increased the production of forage dry matter and green leaves. The values of soil penetration resistance were lowest at the lowest grazing level in the area of animal trampling, between grass tussocks. In the tussock area, soil penetration resistance was lower in the less intense treatments than in the others, in the layers 0.2–0.3 and 0.3–0.4 m only. The increase in soil penetration resistance reduced root production of Panicum maximum Jacq.cv. IPR-86 Milênio. Root production was highest when the values of soil penetration resistance were below 1 MPa.

Index terms: Pasture, water content, animal trampling, soil compaction, Panicum maximum - IPR-86 Milênio.

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, pois potencializa 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 níveis não impeditivos ao desenvolvimento das plantas.

O pisoteio animal pode alterar diretamente a pastagem, devido ao dano mecânico sobre a forragem, e indiretamente sua produtividade, devido à compactação do solo (Greewood & 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 intensidade da pressão exercida pelo casco dos animais depende da massa corporal, da área do casco e da energia cinética exercida sobre os solos (Greewood & 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 & 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 & Zinck, 2004; Fidalski et al., 2008).

Os atributos físicos do solo exercem papel determinante na produtividade das pastagens. A resistência do solo à penetração (RP) é um dos mais frequentemente utilizados para avaliação da compactação do solo. Juntamente com o potencial da água e a aeração do solo, a RP tem a vantagem de ser diretamente relacionada com o crescimento das plantas devido ao efeito que exerce nos processos metabólicos e nas funções vitais da planta (Leão et al., 2006). A RP é dependente da textura, da densidade e, sobretudo, do teor 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, pois determina a habilidade das raízes em se desenvolver e explorar os solos para absorção de água e nutrientes. Para a alongação das raízes, é necessário um ambiente físico do solo com espaço poroso suficiente para movimentação de água e gases e que, quando submetido a testes 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), devido à ação unidirecional do equipamento. As diferenças entre a pressão das raízes e a resistência medida pelos penetrômetros são menores nos solos arenosos e menos coesivos e maiores nos solos argilosos de alta coesão (Torres & Saraiva, 1999). Apesar disso, maiores valores de RP correlacionam-se com menor alongação e produção de raízes (Foloni et al., 2006), reduzindo a capacidade do sistema radicular de absorver água e nutrientes necessários ao metabolismo das plantas (Rosolem et al., 1994).

Estudos reportados na literatura demonstram alterações nos atributos físicos e 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 & Caviglione, 1999). A deficiência de N nas gramíneas tropicais tem sido relatada como um dos principais fatores limitantes para a produção de forragem (Lugão et al., 2003; Primavesi et al., 2005). 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. Contudo, 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. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da intensificação do pastejo proporcionado pela adubação nitrogenada sobre a qualidade física do solo e o impacto na produção de forragem e de raízes de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (23° 00' 4" S, 42° 02' 06" W e altitude de 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 1.

Quadro 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 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 e não publicados, 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 2).

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 se iniciou a fertilização do solo com diferentes doses de N. Os níveis de intensificação do pastejo dispostos no quadro 2 foram baseados na taxa de lotação animal, nos ciclos de pastejo e na massa de forragem, que variaram em função da aplicação das doses crescentes de N: 0, 150, 300 e 450 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, 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 3.

O ajuste da taxa de lotação animal baseou-se na produtividade da pastagem e considerou o consumo 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 do animal vivo. O manejo da pastagem foi realizado visando à manutenção do resíduo pós-pastejo entre 20 e 25 % de lâminas verdes, em relação à produção em cada nível de intensificação.

Para avaliar o impacto da intensificação de pastejo sobre o solo, foram medidos o conteúdo de água no solo em base de massa (Ug, kg kg⁻¹) e a resistência do solo à penetração (RP, MPa); como resposta biológica às condições físicas do solo, foi avaliada 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).

Quadro 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 seca de forragem (kg MS ha ⁻¹)	3689	5734	6351	6638

Quadro 3. Caracterização química do Argissolo Vermelho distrófico típico nos diferentes níveis de intensificação de pastejo

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	0-0,1	9,48	8,51	6,18	0,00	1,99	1,83	1,17	0,23	61,80
	0,1-0,2	2,10	6,06	5,80	0,00	2,11	1,50	0,84	0,17	54,21
	0,2-0,4	1,00	4,43	5,48	0,00	2,27	1,37	0,83	0,14	50,70
NI ₂	0-0,1	13,33	9,42	5,73	0,00	2,23	1,80	0,98	0,23	57,45
	0,1-0,2	2,95	5,40	5,65	0,00	2,20	1,49	0,83	0,11	52,65
	0,2-0,4	1,58	4,94	5,55	0,00	2,28	1,43	0,92	0,10	51,82
NI ₃	0-0,1	11,95	9,73	4,98	0,04	3,01	1,53	0,94	0,40	48,76
	0,1-0,2	2,43	6,79	5,05	0,07	2,80	1,55	0,86	0,18	48,01
	0,2-0,4	1,28	4,53	5,08	0,01	2,64	1,36	0,87	0,09	46,77
NI ₄	0-0,1	15,95	10,32	4,50	0,14	3,91	1,44	0,77	0,37	39,83
	0,1-0,2	3,45	6,65	4,53	0,19	3,36	1,35	0,62	0,19	39,11
	0,2-0,4	1,43	4,78	4,63	0,16	2,89	1,44	0,82	0,10	44,92

⁽¹⁾ Mehlich-1. ⁽²⁾ C: carbono orgânico (Walkley-Black). ⁽³⁾ CaCl₂. ⁽⁴⁾ KCl 1,0 mol L⁻¹.

A amostragem para determinação da MSF e MSFV foi realizada antes da entrada dos animais nos piquetes, cortando-se o capim acima de 40 cm e entre 20 e 40 cm de altura. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para laboratório e pesadas, para determinação da massa da amostra (MA). Posteriormente, separaram-se duas porções e pesou-se cada uma delas. A primeira porção após a pesagem foi encaminhada para secagem em estufa a 65 °C até atingir massa constante; por meio da relação entre o material seco e o material verde, determinou-se a massa seca (%MS). A segunda porção foi encaminhada para separação botânica entre folhas, colmo e material morto, que posteriormente foram secados em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. Em seguida, determinaram-se 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 percentagem de folhas determinada por meio da separação botânica. Os valores de MSF e MSFV representam a fração da pastagem acima de 20 cm de altura determinados pelo somatório das frações de 20–40 cm e acima de 40 cm. A análise da produção da MSF e da MSFV foi realizada pelo ajuste de equações de regressão, considerando as doses de N aplicadas em cada nível de intensificação do pastejo, no delineamento inteiramente casualizado.

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 (0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,3; e 0,3–0,4 m). A análise dos dados foi feita para cada camada de solo individualmente, considerando o delineamento experimental inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas principais foram formadas pelos níveis de intensificação, e as subparcelas, pela posição de coleta das amostras.

A amostragem para determinação da MSR foi feita a partir da coleta de amostras indeformadas, utilizando-se um amostrador com dimensões de 0,1 x 0,1 x 0,1 m. Inicialmente, selecionaram-se duas touceiras representativas, ou seja, aquelas que visualmente apresentaram maior ocorrência na área experimental em cada nível de intensificação do pastejo, onde foram 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 h 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 representativas da posição touceira (CT), e as localizadas de 30 a 60 cm do centro da touceira foram consideradas 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 avaliação do Ug e da RP foi realizada simultaneamente em três épocas distintas, acompanhando o secamento do solo (05/06/2008, 01/07/2008 e 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 foi formado 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 (N1, N2, N3 e N4), posição de coleta (CT e ST) e camadas de solo (0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,3; e 0,3–0,4 m). As subamostras de cada unidade experimental foram acondicionadas em latas de alumínio, tampadas e encaminhadas para o laboratório, para determinação da 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-se 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 (1.920 pontos de leitura x 40 profundidades). Para padronização dos dados, foi considerada 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 (0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,3; e 0,3–0,4 m). A análise das variáveis foi feita 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, tendo em vista que o solo avaliado apresenta variação em sua granulometria e fertilidade no perfil (Quadros 1 e 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, independentemente da significância dos valores de F das interações na análise de variância principal. Na 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-se o procedimento para ajuste de regressões não lineares, disponível no pacote estatístico SAS.

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

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

Os modelos foram considerados ajustados para valores de $p < 0,05$ pelo teste F; além disso, testaram-se 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 determinação (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. Na determinação do valor crítico de RP para produção de MSR foi utilizado o método gráfico proposto por Cate & Nelson (1971).

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 N no incremento da produção das pastagens (Figura 1). O ganho de produtividade da pastagem proporcionada pela adubação nitrogenada aumentou os teores de carbono no solo e, conseqüentemente, a capacidade de troca de cátions. Por outro lado, houve aumento nos valores de acidez do solo, potencial, ativa e trocável, decorrente do processo de nitrificação ocorrido em consequência, principalmente, da aplicação das doses mais altas de N (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 3). Esses resultados indicam que, quando se utilizam 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 kg ha^{-1} de N. A dose estimada para a máxima produtividade de MSF encontrada neste trabalho foi semelhante à encontrada por Lugão et al. (2003), 396 kg ha^{-1} de N, e Sarmiento et al. (2005), 350 kg ha^{-1} de N, 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 são maiores em relação ao colmo, sendo a folha a parte da planta mais nutritiva para os animais (Campos et al., 2002). Como aconteceu com a MSF, a MSFV respondeu de forma quadrática à adubação nitrogenada (Figura 1). A produtividade

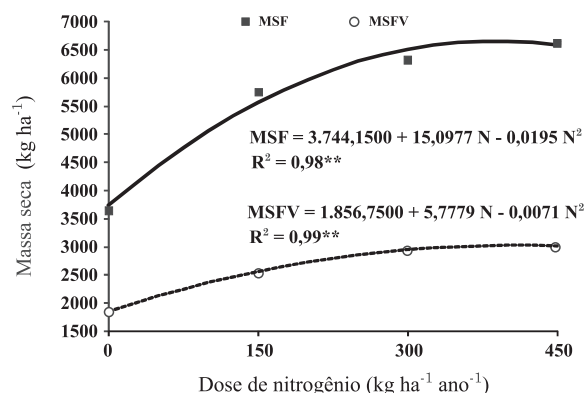


Figura 1. Produtividade média da massa seca total (MSF) e da massa seca de folhas verdes (MSFV) do *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR – 86 Milênio, em função da adubação nitrogenada referente à média das safras 2007/08 e 2008/09. Os símbolos ** indicam que os modelos ajustados foram significativos com $F < 0,01$.

máxima estimada de MSFV foi de 3.032 kg ha⁻¹ para a dose de 407 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 e 320 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) pela compactação do solo e pela redução da precipitação pluvial 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 o aumento da quantidade de microporos em função do aumento do nível de intensificação de pastejo (doses de N de 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 0–0,1, 0,1–0,2 e 0,2–0,4 m. Contudo, em uma segunda avaliação, com o solo mais seco, esses autores obtiveram diferença significativa entre os níveis de intensificação do pastejo. O maior valor de RP (7 MPa) foi observado no tratamento NI₁ e 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, o qual foi associado à 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 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 utilização da água pelas plantas, evidenciou que a camada de solo de 0–0,1 m proporcionou menores acréscimos nos valores de RP quando comparada às demais. A camada de 0,1–0,2 m teve comportamento intermediário, enquanto as de 0,2–0,3 e 0,3–0,4 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 0–0,1, 0,1–0,2, 0,2–0,3 e 0,3–0,4 m deveriam ter valores de Ug superiores a 0,046, 0,073, 0,098 e 0,104 kg kg⁻¹, respectivamente (Figura 2), para RP < 2,5 MPa.

Neste trabalho, a variação de RP apresentada na figura 3 não foi ajustada em função da variação de Ug, pois nesse caso o Ug também é uma variável dependente do sistema de intensificação avaliado. O aumento da produtividade das pastagens e o maior número de pastejos (Quadro 3) proporcionados pela adubação nitrogenada aumentam a exigência hídrica dos tratamentos mais intensificados devido à maior quantidade de folhas transpirando, como demonstrado por Carlesso (1995). Os dados de RP e Ug representados na figura 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.

A RP variou em função da intensificação do pastejo e da posição de coleta das amostras (Figura 3). Na posição da touceira (CT), não houve incremento da RP entre os níveis de intensificação do pastejo nas camadas de 0–0,1 e 0,1–0,2 m, o que corrobora os resultados obtidos por Sarmento (2005), indicando que o aumento da taxa de lotação e dos ciclos de pastejo proporcionados pela adubação

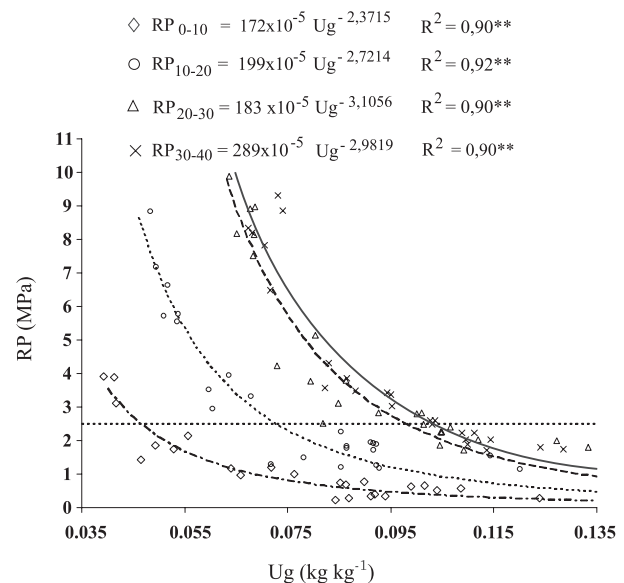


Figura 2. Variação da resistência à penetração (RP) em função do conteúdo de água no solo (Ug) nas diferentes camadas do solo estudado, em três datas de avaliação. O símbolo ** indica que os modelos ajustados foram significativos (F < 0,01).

nitrogenada não compromete a qualidade física do solo na posição da touceira (CT). Observa-se, ainda, que na camada de 0–0,1 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, conforme 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 incremento dela nos níveis de intensificação do pastejo NI₂, NI₃ e NI₄, em relação à menor

intensificação, NI₁, demonstrando que na posição ST a intensificação do pastejo contribuiu para o aumento da RP (Figura 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 0–0,1 e 0,1–0,2 m na área de pisoteio dos animais, ST, foram sempre superiores aos da região protegida pela touceira, CT.

Os resultados observados neste trabalho foram semelhantes aos encontrados por Oliveira et al.

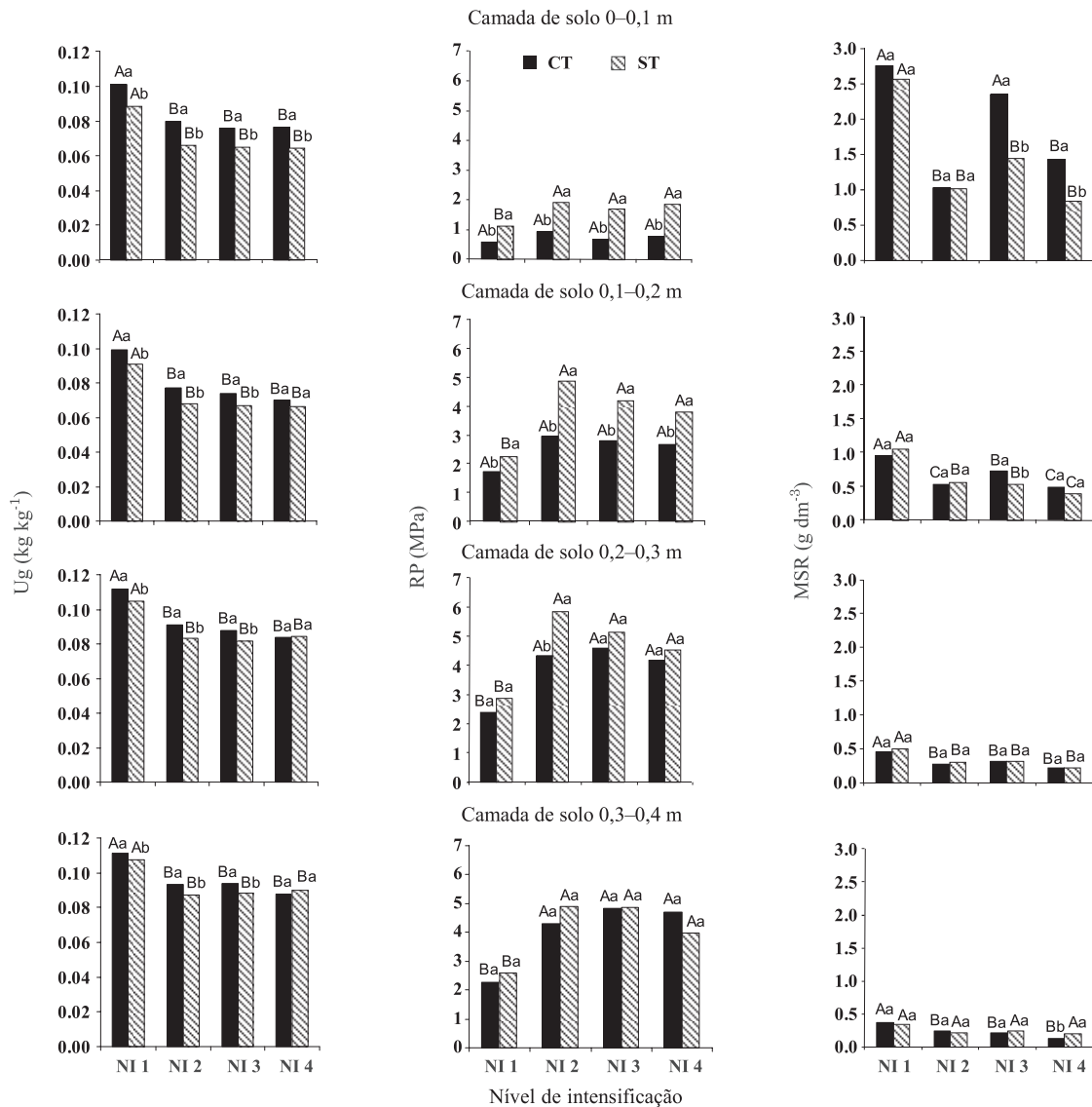


Figura 3. Conteúdo de água no solo (U_g), resistência do solo à penetração (RP) e massa seca de raízes (MSR) em função do nível de intensificação do uso da pastagem (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) e da posição de coleta das amostras (CT e ST). Letras maiúsculas comparam os níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄) na posição CT (colunas em preto) e na posição ST (colunas com hachuras); letras minúsculas comparam nas posições (CT e ST) em cada um dos níveis de intensificação (NI₁, NI₂, NI₃ e NI₄); e letras iguais não diferem pelo teste de Scott-Knott (p < 0,05).

(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 na posição entre touceiras, em relação à posição abaixo da touceira, e os menores valores de densidade do solo na posição da touceira foram associados à 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 de 0,2–0,3 e 0,3–0,4 m, a RP foi maior nos tratamentos com maior intensificação do pastejo (NI₂, NI₃ e NI₄), independentemente da posição de coleta das amostras, ao contrário do que aconteceu nas camadas de 0–0,1 e 0,1–0,2 m, onde não se observou diferença dos valores de RP na posição CT (Figura 3). O incremento da RP, nas camadas de 0,2–0,3 e 0,3–0,4 m, não pode ser associado ao pisoteio animal, pois o comprometimento da estrutura do solo decorrente da ação do pisoteio restringe-se às suas camadas superficiais, como observado por Greenwood et al. (1997), que avaliaram diferentes intensidades de pastejo após 12 anos e demonstraram que a intensificação do pastejo aumentou a RP somente na camada de 0,25 a 0,50 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 0–0,1 e 0,1–0,2 m. Assim, os maiores valores de RP nos tratamentos mais intensificados (NI₂, NI₃ e NI₄) nas camadas inferiores (Figura 3) podem estar relacionados ao menor Ug resultante da maior exigência hídrica da forragem nesses tratamentos, que, associado ao maior teor de argila (Quadro 2), resulta numa maior coesão e fricção entre as partículas e, conseqüentemente, em aumento da RP.

Nas camadas de 0–0,1 e 0,1–0,2 m, o conteúdo de água no solo no tratamento NI₁ também foi sempre superior ao dos demais níveis de intensificação de pastejo (Figura 3), porém, como foi demonstrado na figura 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 3) podem estar associados ao maior consumo de água, devido ao 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 N variou de 0 para 150 kg ha⁻¹, ou seja, do NI₁ para o NI₂, ao passo que com a variação da dose de N de 300 para 450 kg ha⁻¹ (NI₃ para NI₄) houve 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; como demonstraram Lugão et al. (2003), o grande incremento do acúmulo ocorreu entre as doses de 0 e 150 kg ha⁻¹ de N, o que corresponde neste trabalho aos tratamentos NI₁ e NI₂, respectivamente.

A redução da porosidade do solo devido à intensificação do pastejo parece não ser uma explicação plausível para a redução do Ug nos tratamentos com maior nível de intensificação de pastejo, uma vez que esse efeito ocorreu em todas as camadas de solo avaliadas, e não somente nas camadas de 0–0,1 e 0,1–0,2 m, onde o pisoteio animal 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 conteúdo de água do solo, de maneira geral, foi maior na posição da touceira, CT (Figura 3), demonstrando que esse local possui maior capacidade de retenção de água e, possivelmente, oferece 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 0–0,1 e 0,1–0,2 m; 58 %, entre 0 e 0,1 m; 23 %, entre 0,1 e 0,2 m; 11 %, entre 0,2 e 0,3 m; e 8 %, entre 0,3 e 0,4 m. Esses resultados podem ser justificados pelo gradiente físico ligado à granulometria do solo no perfil, pois as duas primeiras camadas encontram-se em um horizonte com granulometria mais grosseira (Quadro 2), o que contribuiu para obtenção de menores valores de RP (Figura 3). No entanto, a menor fertilidade química nas camadas de 0,1–0,2 e 0,2–0,4 m (Quadro 1) também contribuiu para os menores valores de MSR, uma vez que os teores de P disponível concentraram-se principalmente na camada de 0–0,1 m. Esses resultados são justificados pela aplicação de fertilizantes e corretivos em superfície, evidenciando deficiência

do sistema na correção da fertilidade química do solo nas camadas mais profundas.

A MSR na camada de 0–0,1 m, no menor nível de intensificação de pastejo, NI₁, salvo a exceção no NI₃ na posição da touceira, foi sempre superior (Figura 3), demonstrando que a intensificação de pastejo teve efeito negativo sobre a produção de raízes de *Panicum maximum*. O mesmo efeito foi observado nas camadas de 0,1–0,2 e 0,2–0,3 m, nas quais os tratamentos mais intensificados tiveram valores de RP superiores a 2,5 MPa. Na camada de 0,3–0,4 m, esse comportamento foi observado somente para a posição entre touceiras. Os resultados demonstram que os tratamentos mais intensificados tornaram-se cada vez mais dependentes do Ug, tendo em vista que eles têm maior demanda hídrica, como foi demonstrado na figura 3. Durante a condução do experimento, observou-se o enrolamento das folhas nos níveis de intensificação NI₃ e NI₄ nos períodos de estiagem, sugerindo que a intensificação de pastejo em anos com má distribuição de chuvas pode comprometer a produtividade das pastagens.

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 ao dos demais, o que proporciona melhores condições para alongação 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 teor 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 3); e c) no NI₁, a menor carga animal decorrente da menor taxa de lotação e o menor número de ciclos de pastejo (Quadro 2) reduziram o dano mecânico ao sistema radicular promovido pelo pisoteio animal nas camadas superficiais.

O aumento da RP influenciou negativamente a produção de raízes (Figura 4). O uso do método proposto por Cate & Nelson (1971) demonstrou boa correlação entre as variáveis avaliadas, uma vez que poucos pontos localizaram-se nos quadrantes pares. Em valores de RP menores que 1 MPa, observou-se produção de MSR entre 1,75 e 3,75 g dm⁻³. A partir desse valor, houve redução acentuada na produção de MSR. Dos fatores avaliados, esse comportamento pode ser justificado pela concentração do sistema radicular na camada de 0–0,1 m, onde foram observados menores valores de RP (Figura 3) e melhores índices de fertilidade do solo (Quadro 3).

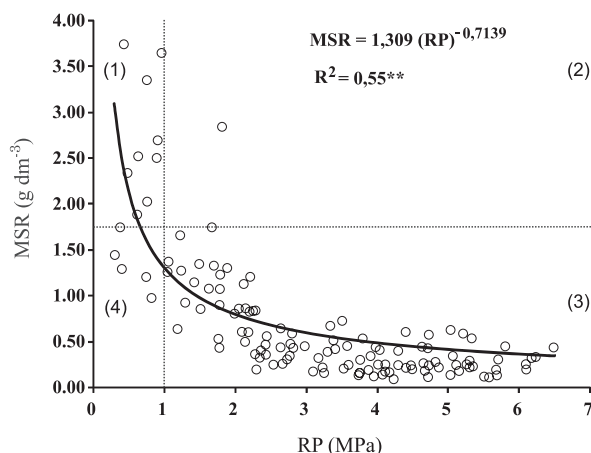


Figura 4. Relação entre a massa seca de raízes (MSR) e a resistência do solo à penetração (RP), utilizando dados obtidos em todos os tratamentos e as camadas de solos estudadas. Os números de 1 a 4 indicam o quadrante. O símbolo ** indica que o modelo ajustado foi significativo ($F < 0,01$).

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 ha⁻¹ de N, e a de folhas verdes (3.032 kg ha⁻¹), com 407 kg 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. Esse efeito, na posição da touceira, ocorreu somente nas camadas de solo de 0,2–0,3 e 0,3–0,4 m.

3. O incremento da resistência do solo à penetração reduziu a produção de raízes de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio. A classe de maior produção de raízes foi definida quando os valores de resistência à penetração foram inferiores a 1 MPa.

AGRADECIMENTOS

Ao IAPAR, pelo financiamento do projeto. Ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor e da bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo autor.

LITERATURA CITADA

- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A.; ALMEIDA, E.X. & KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de Capim-elefante-anão cv. Mott. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1047-1054, 2000.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:975-983, 2008.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. ASAE*, 3:519-524, 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. *Sci. Agri.*, 59:217-225, 2002.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ci. Rural*, 15:183-188, 1995.
- CATARELLA, H. Nitrogênio. 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, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 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 Sci. Am. J.*, 35: 658-660, 1971.
- CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R. & BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil*, 255:93-104, 2003.
- 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. *R. Bras. Zootec*, 39:2598-2603, 2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - 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. & COSTA, M.A. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob o pastejo contínuo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:1583-1590, 2008.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L. & BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:49-57, 2006.
- GREENWOOD, K.L. & MCKENZIE, B.M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: A review. *Austr. J. Exper. Agric.*, 41:1231-1250, 2001.
- GREENWOOD, K.L.; MacLEOD, D.A. & HUTCHINSON, J. Long-term stoking rate effects on soil physical properties. *Austr. J. Exper. Agric.*, 37:413-419, 1997.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.*, 82:121-145, 2005.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Aplicação da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1493-1500, 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*, 219:161-168, 2000b.
- 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 Tillage Res.*, 88:297-285, 2006.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:217-223, 2006.
- LUGÃO, S.M.B.; RODRIGUES, L.R.A.; ABRAHÃO, J.J.S.; MALHEIROS, E.B. & MORAIS, A. Acúmulo de forragem e eficiência de utilização do nitrogênio em pastagem de *Panicum maximum* Jacq. (Acesso BRA-006998) adubadas com nitrogênio. *Acta Sci.*, 25:371-379, 2003.
- MARTÍNEZ, L.J. & ZINCK, J.A. Temporal variation of soil and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil Tillage Res.*, 75:3-17, 2004.
- MÜLLER, M.M.L.; GUIMARÃES, M.F.; DESJARDINS, T. & MITJA, D. The relationship between pasture degradation and soil properties in Brazilian Amazon: A case study. *Agric. Ecos. Environ.*, 103:279-288, 2004.
- OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C. & MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração em Latossolo vermelho da microrregião de Goiânia, GO. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 11:265-270, 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 brizantha* cv. Marandu em Neossolo Quartzarênico. *R. Bras. Zootec*, 34:1121-129, 2005.
- 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. *Ci. Agrotec.*, 30:562-568, 2008.
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S. & SACRAMENTO, L.V.S. Sistema radicular e nutrição de soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, 53:259-266, 1994.
- SÁ, J.P.G. & CAVIGLIONE, J.H. Arenito Caiuá – Capacidade de lotação das pastagens. Londrina, IAPAR, 1999. 15p. (Informe de Pesquisa, 132)
- SARMENTO, P. Respostas agrônomicas e morfológicas de *Panicum maximum* Jacq. (Acesso BRA – 006998), sob pastejo, à adubação nitrogenada. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2005. 92p. (Tese de Doutorado)

- SARMENTO, P.; RODRIGUES, L.R.A.; LUGÃO, S.M.B.; CRUZ, M.C.P.; CAMPOS, F.P. & FERREIRA, M.E. Respostas agronômicas e morfológicas de *Panicum maximum* Jacq. CV. IPR-86 Milênio, sob pastejo, à adubação nitrogenada. B. Indust. An., 4:333-346, 2005.
- 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 de jul., 2010.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & CORSI, M. Soil compaction versus cow-stoking rates on irrigated grazing system. Adv. Geocol., 32:397-406, 2002.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 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. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.6. p.1-30.
- 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 Tillage Res., 87:28-38, 2006.