

HELDER QUADROS SANTOS

**SISTEMA PARA CÁLCULO DO BALANÇO DE NUTRIENTES E
RECOMENDAÇÃO DE CALAGEM E ADUBAÇÃO DE PASTAGENS PARA
BOVINOS DE CORTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S237s
2003

Santos, Helder Quadros, 1973-
Sistema para cálculo do balanço de nutrientes e recomendação de calagem e adubação de pastagens para bovinos de corte / Helder Quadros Santos. – Viçosa : UFV, 2003.
xi, 142f. : il.; 29cm.

Inclui apêndice.
Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa
Referências bibliográficas: f. 109-127.

1. Pastagens - Adubos e fertilizantes - Modelos matemáticos. 2. Plantas forrageiras - Nutrição - Modelos matemáticos. 3. Calagem dos solos. 4. Plantas e solo. 5. Fertilidade do solo. 6. Bovino de corte - Nutrição. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 633.2
CDD 22.ed. 633.2

HELDER QUADROS SANTOS

**SISTEMA PARA CÁLCULO DO BALANÇO DE NUTRIENTES E
RECOMENDAÇÃO DE CALAGEM E ADUBAÇÃO DE PASTAGENS PARA
BOVINOS DE CORTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

APROVADA: 25 de agosto de 2003.

Dra. Valéria P. Batista Euclides

Prof. Júlio César Lima Neves

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Conselheiro)

Prof. Dilermando M. da Fonseca
(Conselheiro)

Prof. Reinaldo Bertola Cantarutti
(Orientador)

“Entretanto, se descobrirmos de fato uma teoria completa (unificação da física)... Então devemos todos, filósofos, cientistas, e mesmos leigos, ser capazes de fazer parte das discussões sobre a questão de por que nós e o universo existimos. Se encontrarmos a resposta para isto teremos o triunfo definitivo da razão humana; porque, então, teremos atingido o conhecimento da mente de Deus.”

Stephen W. Hawking

(Uma breve história do tempo:
do Big Bag aos buracos negos).

Aos meus pais Heron e Marlove,

Aos meus irmãos André e Aline,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo e pelo amor.

À Universidade Federal de Viçosa, pela inestimável contribuição para a minha formação como profissional e ser humano.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos no Brasil; e à CAPES, pela bolsa de estudos no Brasil e nos Estados Unidos.

Ao professor Reinaldo B. Cantarutti, pela amizade, pela confiança a mim dispensada antes e durante este curso e pela orientação.

Aos professores do Departamento de Solos com os quais tive oportunidade de aprender e conviver, em especial, aos professores Júlio C. L. Neves, Victor Hugo Alvarez V., Roberto F. de Novais e Jaime W. V. de Mello.

Ao professor Lynn E. Sollenberger, por viabilizar minha estadia na Universidade da Flórida, pela acolhida calorosa em Gainesville e pela disponibilidade constante em discutir as dúvidas e em resolver os problemas.

Ao professor John E. Moore, pelo encorajamento, pelas sugestões e informações compartilhadas e pela disposição admirável em ajudar no entendimento e no desenvolvimento do modelo para estimar o consumo de animais em pastejo.

À minha “família” americana, Dean, Diane, Matthew and Scott Bradley, pela recepção na chegada em Gainesville e por mais uma vez me acolher em Michigan.

Ao professor Dilermando M. da Fonseca, pelo incentivo e pelos comentários e sugestões durante a defesa de tese.

À Dra. Valéria Pacheco Batista Euclides, pesquisadora da EMBRAPA - Gado de Corte, pelas informações disponibilizadas para construção do modelo e pelos comentários e sugestões durante a defesa de tese.

Aos amigos “viçosenses”, Rodrigo, Elisângela e Ana Luísa Lima; Alexandre Leite Pereira; Nelci Olszewski; Fábio, Luana e Vitor Gomes; e aos amigos “à distancia”, Orlando “Jacaré” Gomes, Paulo Carvalho, Lacir O. Mendes e Hercílio Netto, pela grande amizade e pelas risadas, sem o que é difícil viver.

Aos amigos, José Carlos, Georgia e Victor Dubeux; Márcio, Sílvia e Lucas Costa; Marcelo e Aline Carvalho; Graziela, Lucinda e Roberta Corrêa da Costa; João Vendramini; Edgar e Virna Schunk; Luís, Cláudia e Gabriel Rocha; e a todos que tornaram a vida em Gainesville muito mais alegre e brasileira, principalmente nas sextas-feiras.

À todos aqueles com os quais pude conviver, aprender, rir e chorar desde minha chegada a esta cidade: Viçosa.

BIOGRAFIA

HELDER QUADROS SANTOS, filho de Heron Rezende Santos e Marlove Quadros Santos, nasceu em Itabuna, Estado da Bahia, em 8 de março de 1973.

Em setembro de 1996, diplomou-se Engenheiro-Agrônomo pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em outubro de 1996, iniciou o curso de Mestrado em Zootecnia na UFV, com área de concentração em Forragicultura e Pastagens, mais especificamente Nutrição e Adubação de Plantas Forrageiras.

Em abril de 1999, iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas na UFV. Como parte integrante do treinamento de doutorado, estagiou durante o período de setembro de 2001 a setembro de 2002 no Departamento de Agronomia da Universidade da Florida, Gainesville (EUA).

Submeteu-se à defesa de tese em agosto de 2003.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTRUTURA DO SISTEMA.....	5
3. SUBMODELO ANIMAL.....	8
3.1. Introdução.....	8
3.2. Consumo de forragem e nutrientes por animais em pastejo.....	10
3.2.1. Valor energético da forragem.....	11
3.2.2. Requerimentos energético dos animais.....	12
a) Energia líquida para manutenção.....	13
b) Energia líquida para ganho.....	20
3.2.3. Consumo de forragem.....	21
3.2.4. Consumo de nutrientes.....	22
3.3. Retenção e excreção de nutrientes pelos animais.....	23
3.4. Distribuição das excretas na pastagem.....	25
3.5. Discussão.....	27
4. SUBMODELO PLANTA.....	35
4.1. Introdução.....	35
4.2. Concentração de nutrientes digestíveis totais na forragem.....	36
4.3. Produção de matéria seca do pasto.....	38

4.3.1. Produção de matéria seca de parte aérea.....	42
4.3.2. Produção de raízes.....	44
4.3.3. Produção de resíduos vegetais.....	45
4.4. Conteúdo de nutrientes.....	45
4.5. Demanda de nutrientes.....	50
4.5.1. Eficiência de recuperação pela planta dos nutrientes no solo.....	50
4.5.2. Remobilização dos nutrientes na planta.....	57
4.6. Discussão.....	59
5. SUBMODELO SOLO.....	65
5.1. Introdução.....	65
5.2. Suprimento dos nutrientes.....	66
5.2.1. Suprimento de nutrientes pelo solo.....	67
5.2.2. Suprimento de nutrientes provenientes da decomposição dos resíduos vegetais.....	72
5.2.2. Suprimento de nutrientes provenientes da deposição de fezes e urina.....	75
5.3. Doses recomendadas dos nutrientes.....	76
5.4. Recomendação de calagem.....	77
5.5. Discussão.....	79
6. SIMULAÇÕES COM O SISTEMA.....	83
5.1. Submodelo animal.....	85
5.2. Submodelo planta.....	87
5.2. Submodelo solo.....	92
7. RESUMO E CONCLUSÕES.....	107
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
APÊNDICE.....	128

RESUMO

SANTOS, Helder Quadros, D.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2003. **Sistema para cálculo do balanço de nutrientes e recomendação de calagem e adubação de pastagens para bovinos de corte.** Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti. Conselheiros: Victor Hugo Alvarez V., Roberto Ferreira de Novais e Dilermando Miranda da Fonseca.

A exploração pecuária brasileira fundamenta-se na alimentação dos animais em pasto. No entanto, a maioria das pastagens é cultivada com baixa ou nenhuma aplicação de fertilizantes, o que é apontado como uma das principais razões para sua baixa produtividade. Atualmente, as recomendações de adubação para pastagens, embora sejam fundamentadas em resultados experimentais, contam com algum subjetivismo. Com o objetivo de recomendar corretivos e fertilizantes para pastagens tropicais pastejadas por bovinos de corte com melhor fundamentação conceitual, desenvolveu-se um sistema (FERTICALC-Pastagem) cujo princípio básico é o balanço nutricional no sistema pecuário. Para tanto, procurou-se estabelecer uma estrutura modular considerando os componentes animal, planta e solo das pastagens. Esses módulos, denominados submodelos, foram desenvolvidos independentemente, mas se inter-relacionam por meio de variáveis de entrada e saída. A recomendação de fertilizante se faz a partir da diferença entre o suprimento dos nutrientes e a demanda nutricional pelo pasto. A demanda dos nutrientes é

calculada com base no conteúdo nutricional do pasto que se relaciona com a produtividade animal projetada, a intensidade de exploração da pastagem e a espécie forrageira e sua eficiência de recuperação do nutriente aplicado ao solo. O suprimento de nutrientes é estimado com base no teor dos nutrientes indicados pela análise química do solo e na reciclagem dos nutrientes adicionados ao solo na forma de resíduos vegetais e animais (excretas). Um fator de sustentabilidade foi incorporado à estimativa do suprimento dos nutrientes visando manter uma quantidade de nutrientes no solo proporcional a intensidade de exploração da pastagem. As simulações mostraram que por meio do FERTICALC-Pastagem recomenda-se, com exceção do fósforo, menor quantidade de nutrientes para estabelecer do que para a manutenção da pastagem. Para sistemas extensivos de produção as doses dos nutrientes estimadas pelo FERTICALC-Pastagem foram, em geral, compatíveis com as doses obtidas por outros sistemas de recomendação. Nesses sistemas de produção, as recomendações dependem, principalmente, da demanda nutricional e do suprimento pelo solo. Por outro lado, para sistemas intensivos as doses estimadas pelo FERTICALC-Pastagem foram maiores do que as atualmente recomendadas, sendo função da elevada demanda e da quantidade de nutrientes reciclados e recuperados pelas plantas. Dos sistemas de recomendação comparados, o FERTICALC-Pastagem foi o único em que as recomendações variaram de forma contínua com a disponibilidade de nutrientes e com a produtividade vegetal esperada.

ABSTRACT

SANTOS, Helder Quadros, D.S., Universidade Federal de Viçosa, August, 2003. **System for nutrient balance calculation, and liming and fertilizer recommendation for beef cattle pastures.** Adviser: Reinaldo Bertola Cantarutti. Committee Members: Victor Hugo Alvarez V., Roberto Ferreira de Novais, and Dilermando Miranda da Fonseca.

The Brazilian beef cattle production systems are essentially grazing systems. Most of the pastures, however, is cultivated with little or no fertilizer application, what is regarded as the main reason for its low productivity. Nowadays, the fertilizer recommendations for pastures are based in experimental results but still have some subjectivism in their development. A system for recommending liming and fertilizers for tropical pasture grazed by beef cattle (Pasture-FERTICALC) was developed based on the nutritional balance of the beef cattle production system. Thus it was arranged in a modular structure considering the animal, plant and soil components of the pasture. Those modules, denominated submodels, were developed independently, but they interrelate by means of input and output variables. The fertilizer recommendation is made by the difference between nutrient supply and pasture demand. The nutrient demand is estimated based on pasture nutritional content, which is related with an expected animal productivity, pasture utilization intensity and forage species, and its efficiency to recover the nutrient applied to

the soil. Nutrient supply is estimated based on nutrient concentration in soil chemical analysis, and the recycling of nutrients through plant litter and animal excreta. A sustainability factor was incorporated into the calculation procedure of nutrient supply in order to assure that a given amount of nutrients proportional to the pasture utilization intensity would be maintained in the soil. The simulations with Pasture-FERTICALC showed that, except for phosphorus, smaller amount of nutrients was recommended for pasture establishment than for maintenance. The nutrient doses estimated by Pasture-FERTICALC for extensive production systems were generally similar with those obtained with other recommendation systems. In those production systems the recommendations depend mainly on the nutritional demand and the soil supply. Conversely, the Pasture-FERTICALC estimated doses for intensive systems were higher than the usually recommended ones. Those doses are mainly the result of higher nutrient demand, and the amount of nutrients recycled and recovered by the plants. In comparison with other recommendation systems Pasture-FERTICALC was the only one in which the fertilizer recommendations varied continuously with nutrient soil availability and the expected animal productivity.

1. INTRODUÇÃO

A exploração pecuária brasileira fundamenta-se na alimentação dos animais em pasto. O Brasil possui, aproximadamente, 160 milhões de cabeças de bovinos distribuídos em 180 milhões de hectares de pastagens (IBGE, 2003), predominantemente estabelecidas em solos com problemas de toxidez por Al e por Mn e deficientes em P, N, Ca e Mg (Cantarutti et al., 2002) e outros nutrientes.

Como a maioria das pastagens é cultivada com baixa ou nenhuma aplicação de insumos, Zimmer e Euclides (2000) destacaram que a falta de adubação no estabelecimento e na manutenção contribui sobremaneira para acelerar a perda de produtividade e a degradação das pastagens. Estima-se que cerca de 50 a 60 % das pastagens brasileiras estejam degradadas ou em degradação (Macedo, 1995). Neste sentido, visando ao desenvolvimento de sistemas de produções sustentáveis, muitos pesquisadores têm estudado a fertilidade do solo, a nutrição de forrageiras e a reciclagem de nutrientes em pastagens. O conhecimento acumulado nesses estudos gerou recomendações de adubação para pastagens, que têm sido sistematizadas na forma de tabelas e reunidas em manuais. Embora essas tabelas sejam fundamentadas em resultados experimentais, sua elaboração conta com algum subjetivismo. Nem sempre há um vínculo claro entre doses e produtividade animal (Cantarutti et al., 2002). Além disso, não é possível incluir nessas recomendações todas as peculiaridades das pastagens, especialmente as alterações na fertilidade do

solo associadas ao manejo da pastagem devido à reciclagem de nutrientes via excreção animal e resíduos vegetais (Middleton e Smith, 1978; Oyanarte et al., 1997). Neste sentido, a utilização de modelos de balanço nutricional que incluem os componentes animal, planta e solo e suas inter-relações, desponta como possibilidade de estimar recomendações mais exatas.

Modelo é um termo ambíguo. É utilizado como sinônimo de funções estatísticas, como modelos de regressão, de esquemas e de diagramas para ilustrar um sistema. Por outro lado, do ponto de vista científico, modelo é um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico ou biológico, por meio do qual se procura explicar ou prever propriedades do sistema e simular respostas a estímulos externos e internos (Kneller, 1979; Landsberg, 1986).

Os modelos podem ser classificados como qualitativos ou quantitativos, determinísticos ou estocásticos, dinâmicos ou estáticos e mecanísticos ou empíricos. Modelos qualitativos são essencialmente conceituais, ao passo que modelos quantitativos são matemáticos. Um modelo determinístico presume que no sistema os fenômenos se achem ligados de modo tão rigoroso que a ocorrência de um conjunto de eventos leva a uma resposta única e inevitável. Não há, como nos modelos estocásticos, elementos aleatórios ou probabilísticos. Um modelo dinâmico prediz como as variáveis modificam-se com o tempo. Modelos estáticos não possuem o tempo como variável principal; usualmente apresentam resultados integrados em intervalos de tempo mais longos. Por outro lado, nos modelos mecanísticos todos os processos têm forte embasamento físico, químico e biológico. Nesses são descritos os processos pelos quais os fenômenos se expressam, ou seja, as relações de causa e efeito. Por fim, modelos empíricos ou funcionais consistem de funções, em geral escolhidas arbitrariamente para se ajustar aos dados que representam o fenômeno (Addiscott e Wagenet, 1985; Hoosbeek e Bryant, 1992; Thornley, 1998).

Há bastante controvérsia sobre a função da modelagem nas Ciências Agrárias e na Ecologia. Alguns advogam que modelos consistentes podem ser utilizados para formular e responder questões do tipo “e se?” para diversos cenários (Thornley, 1998). Para outros, como ferramenta de pesquisa, os modelos teriam apenas função heurística (Passioura, 1996). Todos, porém

parecem concordar que a modelagem pode aumentar a eficiência da pesquisa por meio da agregação do conhecimento científico disponível, otimizando a elaboração de novas hipóteses, a identificação de lacunas no conhecimento e o planejamento de experimentos (Passioura, 1996; Thornley, 1998; Mutsaers e Wang, 1999). Numa conotação prática, modelos podem ser considerados ferramentas de engenharia (Passioura, 1996), que auxiliam decisões governamentais (p. ex., zoneamento agroecológico) e o manejo de propriedades agropecuárias (p. ex., recomendação de adubação, balanço hídrico do solo e irrigação, previsão da produção de culturas).

A construção de modelos não é uma atividade fácil e rápida. Não é fácil pela quantidade de variáveis e suas interações que influenciam as respostas dos múltiplos componentes do sistema modelado. Neste sentido, a modelagem exige equipes de trabalho multidisciplinares e, preferencialmente, multiinstitucionais, o que facilita tanto sua adequação a diferentes ambientes e sistemas de produção quanto ao planejamento e à execução de pesquisas para parametrizá-lo e avaliá-lo (Mutsaers e Wang, 1999). Pelas mesmas razões a modelagem deve ser um empreendimento de longo prazo, sob o risco de se obter um modelo pouco consistente.

A maioria dos modelos de avaliação da sustentabilidade e de recomendação de adubação para pastagens tem como princípio o balanço nutricional, o que implica avaliar a reciclagem de nutrientes, ou seja, quantificar os nutrientes nos principais componentes do sistema e os fluxos entre estes, e os processos de perda e ganho no sistema (Wilkinson e Lowrey, 1973; Middleton e Smith, 1978; Cornforth e Sinclair, 1982; Campkin, 1985; Williams et al., 1990; Thomas, 1992; Cadisch et al., 1994; Oyanarte et al., 1997; Thornley, 1998). Esse balanço é geralmente negativo, pois as perdas, incluindo a exportação por meio dos produtos animais, superam o fornecimento de nutrientes ao sistema. Desta forma, as doses de nutrientes são estabelecidas a fim de manter a produção anual da forrageira e os teores dos nutrientes disponíveis no solo (Middleton e Smith, 1978; Oyanarte et al., 1997). Na maioria dos modelos, a capacidade de suprimento do solo e as interações entre o solo e os nutrientes adicionados via fertilizantes não estão bem estabelecidos. Novais e Smyth (1999) apresentaram funções que relacionam características do solo com a disponibilidade e a eficiência de recuperação

pelas plantas do P aplicado. Funções semelhantes ajustadas para os demais nutrientes podem ser utilizadas para o refinamento da modelagem do “componente solo” no sistema de pastagens e, conseqüentemente, da recomendação de adubação.

Desta forma, neste trabalho objetivou-se desenvolver um sistema de recomendação de calagem e de adubação de pastagens utilizadas por bovinos de corte, por meio da modelagem do balanço nutricional e da reciclagem de nutrientes entre os componentes animal, planta e solo.

2. ESTRUTURA DO SISTEMA

Na modelagem do sistema FERTICALC-Pastagem, procurou-se estabelecer, de acordo com Reynolds e Acock (1997), uma estrutura modular considerando os componentes: animal, planta e solo. Esses componentes, denominados submodelos, foram modelados independentemente, mas se inter-relacionam por meio de variáveis de entrada e saída. Segundo Reynolds e Acock (1997) esse tipo de estrutura facilita futuros aperfeiçoamentos dos módulos, sem que haja a necessidade de ser refazer todo o modelo. A estrutura geral do FERTICALC-Pastagem é apresentada neste capítulo e o detalhamento nos capítulos subseqüentes.

As recomendações geradas a partir do FERTICALC-Pastagem baseiam-se no balanço nutricional considerando-se perdas e ganhos no sistema. Em última análise, o balanço nutricional é obtido pela diferença entre a demanda do nutriente pelo pasto e seu suprimento pelo solo. Se esta diferença for positiva (demanda maior do que suprimento), recomenda-se a aplicação de fertilizantes; se for negativa ou nula (demanda menor ou igual ao suprimento), não se recomenda a aplicação de fertilizantes.

A demanda nutricional é calculada com base no conteúdo de nutrientes no pasto que está associado à projeção de uma determinada produtividade animal. Deste modo, tenta-se estabelecer relação entre as recomendações de adubação e a produtividade de bovinos de corte e, assim, a estimativa da demanda envolve os submodelos animal e planta.

O primeiro passo é a estimativa do consumo de matéria seca (MS) de forragem pelos animais em pastejo (Figura 2.1). Para tanto, o submodelo animal deve ser alimentado por informações sobre as características do sistema de produção e a produtividade animal desejada e o valor de nutrientes digestíveis totais, que é estimado pelo submodelo planta. O submodelo animal também estima a proporção da área da pastagem afetada por determinado número de excreções dos animais. O usuário tem a opção de utilizar os teores dos nutrientes nas forrageiras contidos no banco de dados do FERTICALC-Pastagem, ou fornecer valores que julgar pertinentes. A partir dos teores de nutrientes, no submodelo animal, são estimadas as quantidades de nutrientes consumidas, retidas no corpo dos animais e excretadas em fezes e urina.

O segundo passo é a estimativa da produção de MS que supriria o consumo demandado para se atingir a produtividade animal projetada (Figura 2.1). Para tanto se deve especificar, no submodelo planta, a espécie de gramínea forrageira e a eficiência de utilização de forragem que devem ser compatíveis com o sistema de produção. O conteúdo de nutrientes é estimado com base na produção e nos teores dos nutrientes na MS da forrageira. A demanda é função do conteúdo e da eficiência de recuperação do nutriente pela forrageira.

O suprimento de nutrientes pelo solo é estimado com base nos teores obtidos na análise química do solo (Figura 2.1), nos nutrientes reciclados com os resíduos vegetais e com as excretas. Para estimar a decomposição dos resíduos vegetais e liberação dos nutrientes, o submodelo solo requer a produção e os teores dos nutrientes nos resíduos vegetais, que são estimados no submodelo planta. Para estimar a quantidade dos nutrientes excretados que são recuperados pelas plantas considera-se a quantidade total excretada e a distribuição espacial das excreções na pastagem.

Tanto a demanda ($\delta_{i\ pl}$) quanto o suprimento ($\lambda_{i\ solo}$) do nutriente i são expressos em termos da dose, assim as doses recomendadas (DR_i) para fertilização são estimadas pela diferença: $DR_i = d_{i\ pl} - l_{i\ solo}$.

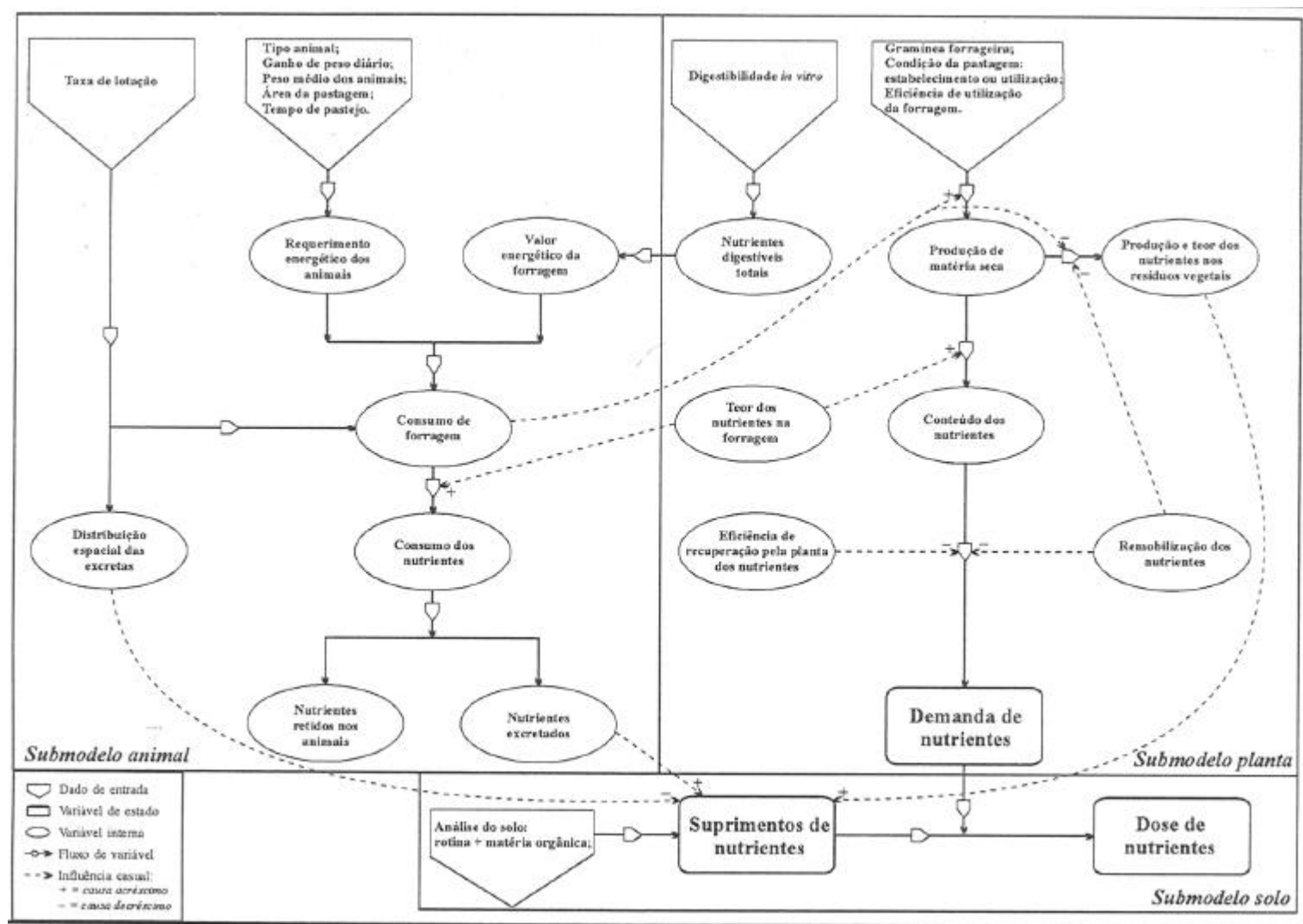


Figura 2.1. Fluxograma da estrutura do FERTICALC-Pastagem, indicando os principais passos dos submodelos animal, planta e solo para estimativa das doses recomendadas dos nutrientes.

3. SUBMODELO ANIMAL

3.1. Introdução

A maior proporção de perdas de nutrientes em pastagens está associada ao consumo de forragem, por meio da exportação de produtos animais e das perdas associadas às excreções (fezes e urina) (Humphreys, 1991; Thomas, 1992; Haynes e Williams, 1993).

A estimativa do consumo dos animais em pastejo é essencial para o balanço nutricional do sistema pecuário, pois o consumo de nutrientes é obtido por meio do produto entre a quantidade de MS consumida e os teores dos nutrientes na forragem (Moore, 1996; van Horn et al., 1996; Thornley, 1998). Esses autores argumentaram que os teores de nutrientes são facilmente obtidos por meio da análise química da forragem, porém as estimativas de consumo de MS são de difícil obtenção por serem dependentes da condição climática, dos animais, do pasto e das inter-relações entre estes. Algumas características do pasto que afetam o consumo são: (i) a massa de forragem disponível, (ii) a oferta de forragem, (iii) a composição química (teores de nutrientes minerais, energia digestível, água, lignina e polifenóis), (iv) a anatomia dos tecidos vegetais, (v) a estrutura do pasto (densidade, altura, relação folha/caule, composição botânica) (Humphreys, 1991; Minson e Wilson, 1994; Sollenberger e Burns, 2001; Zemmelink e 't Mannetje, 2002).

Os principais mecanismos por meio dos quais os animais têm o consumo de forragem regulado são de natureza metabólica ou fisiológica, física e comportamental. O mecanismo metabólico baseia-se na relação entre o requerimento energético do animal e a quantidade de energia do alimento. O consumo inicialmente aumenta e depois decresce com o aumento da energia da dieta, sendo que o ponto de inflexão ocorre quando os requerimentos energéticos máximos dos animais são satisfeitos (Conrad et al., 1964; Mertens, 1994). No entanto, é improvável que uma dieta composta somente de forragem seja suficiente para suprir os requerimentos máximos de ruminantes em lactação ou crescimento (Moore e Coleman, 2001), especialmente no caso de forrageiras tropicais que possuem, em geral, menor quantidade de energia digestível (Wilson e Minson, 1980).

Desta forma, aceita-se que os mecanismos físico e comportamental sejam os reguladores mais importantes do consumo em pastagens tropicais. O mecanismo físico relaciona-se ao enchimento e distensão ruminal e à taxa de passagem do alimento pelo rúmen. O mecanismo comportamental relaciona-se à capacidade do animal em obter do pasto uma determinada quantidade de alimento, sendo função do tamanho e do número de bocados em uma unidade de tempo que o animal é capaz de realizar. Esse é, na verdade, regulado não só pelo animal mas também por variáveis climáticas e por características do pasto, especialmente a estrutura e a oferta de forragem (Stoobs, 1975; Humphreys, 1991; Mertens, 1994; Minson e Wilson, 1994; Sollenberger e Burns, 2001).

O principal agente modificador da fertilidade do solo de pastagens são os animais, visto que 60 a 99 % dos minerais ingeridos pelos animais retornam ao solo via fezes e urina (Wilkinson e Lowrey, 1973; Henzell e Ross, 1973; Haynes e Williams, 1993; Whitehead, 2000). Além disso, os nutrientes reciclados não são distribuídos aleatoriamente na pastagem (Morton e Baird, 1990). As fezes e urina não são distribuídos uniformemente na pastagem, mas depositados em locais discretos. Isso cria uma heterogeneidade a curtas distâncias nas proximidades das excretas e uma heterogeneidade a grandes distâncias causada pela deposição de fezes e urina em áreas específicas das pastagens, principalmente nas proximidades de aguadas e de sombra (Petersen et al., 1956a; Wilkinson et al., 1989; West et al., 1989; CIAT, 1991;

Mathews et al., 1994a,b, 1999; Franzluebbers et al., 2000; Mathews et al., 2001). Na superfície do solo ocupada por um excremento bovino (0,05 a 0,5 m²) concentram-se os nutrientes colhidos durante o pastejo de uma área muito maior, o que eleva os teores de nutrientes naquele local e a probabilidade de perdas (Middleton e Smith, 1978; Barrow, 1987).

O submodelo animal foi desenvolvido para, de modo simples, calcular a quantidade dos macronutrientes consumida por animais em pastejo, removida da pastagem por meio dos produtos de origem animal e que retorna ao solo na forma de fezes e urina, além de estimar um índice de distribuição destas excreções na pastagem.

3.2. Consumo de forragem e nutrientes por animais em pastejo

O consumo de forragem é estimado pelo método dos requerimentos energéticos, que tem como base a relação entre os requerimentos de energia dos animais para determinada produtividade (ganho de peso, produção de leite, gestação) e a valor energético da forragem consumida, ambos expressos em termos de energia líquida de manutenção (EL_m) e de ganho (EL_g) (Moore, 1996; van Horn et al., 1996). Para utilização desse método, estabeleceu-se como pressuposição básica que os animais não perdem peso.

A quantidade total de energia de um alimento pode ser determinada pela produção de calor após a combustão de uma amostra em bomba calorimétrica, sendo denominada energia bruta (EB) e expressa em quilocaloria (kcal) ou megacaloria (Mcal) por kg de matéria seca (MS). No entanto, raramente a EB é integralmente utilizada pelos animais. A EB dos alimentos menos a energia perdida nas fezes constitui a energia digestível (ED). O conceito de nutrientes digestíveis totais (NDT) é semelhante ao de ED, mas expresso em dag kg⁻¹ de MS do alimento. A energia metabolizável (EM) é definida como sendo a energia digestível menos a energia perdida na urina e nos gases produzidos no rúmen (NRC, 1984, 1996). Para a maioria das forragens a razão EM/ED varia entre 0,81 e 0,86 (Rochinotti, 1998), sendo que o valor de 0,82 foi adotado pelo boletim *Nutrient requirements of beef cattle* (NRC, 1984, 1996).

A energia líquida (EL) é a energia disponível para os processos fisiológicos relacionados à manutenção e produção dos animais, sendo obtida a partir da energia metabolizável dos alimentos. No entanto, a eficiência de utilização da energia metabolizável pelos animais varia com as funções metabólicas – manutenção, crescimento, lactação e gestação – e com outros fatores como a própria quantidade de energia metabolizável dos alimentos. Em função das variações na eficiência de utilização da energia metabolizável, convencionou-se estimar dois valores de energia líquida dos alimentos: a energia líquida para manutenção (EL_m) e a energia líquida para ganho (EL_g). As eficiências de utilização da energia metabolizável para lactação e para gestação são semelhantes às de manutenção e, por isso, recomenda-se utilizar a EL_m para estimar as eficiências na utilização da energia metabolizável para essas funções fisiológicas (NRC, 1984, 1996).

3.2.1. Valor energético da forragem

Para a estimativa do consumo de forragem pelo submodelo animal, o primeiro passo é a determinação das quantidades de energia líquida de manutenção e de ganho da forragem ($EL_{m\ pl}$ e $EL_{g\ pl}$), em $Mcal\ kg^{-1}$ de MS. Essas estimativas são obtidas a partir de equações de regressão de terceiro grau nas quais a variável independente é a energia metabolizável (ME, em $Mcal\ kg^{-1}$).

Ferreira et al. (1999c) e Vêras et al. (2001b) ressaltaram que não há equações ajustadas para bovinos de raças zebuínas (*Bos indicus*), predominantes no Brasil, sendo normalmente utilizadas equações ajustadas para animais de raças taurinas (*Bos taurus*) (NRC, 1984, 1996). Ferreira et al. (1999c) obtiveram para animais meio-sangue taurino x zebuino estimativas da energia líquida de ganho nos alimentos muito próximas daquelas obtidas com equações estabelecidas do NRC (1984, 1996). Vêras et al. (2001b), no entanto, obtiveram estimativas de energia líquida de ganho nos alimentos ($EL_{g\ pl}$) para animais zebuínos e meio-sangue taurino x zebuino não castrados diferentes das do NRC (1984, 1996) e recomendaram para estes animais a utilização da equação: $EL_{g\ pl} = -635,31 + 776,79 EM - 316,65 EM^2 + 43,099 EM^3$ ($R^2 = 0,980$).

Constatou-se, entretanto, que essa equação não é apropriada para alimentos com valores de energia metabolizável (EM) menores do que 2,2 Mcal kg⁻¹, comuns em forrageiras tropicais, por resultar em valores negativos de energia líquida de ganho na forragem (EL_{g pl}). Isso, provavelmente, relaciona-se ao fato de EM menores do que 2,28 Mcal kg⁻¹ corresponderem a extrapolações do intervalo de valores da variável independente utilizado por Veras et al. (2001b). Desta forma, essa equação é mais indicada para situações em que a dieta é composta por forragem e algum alimento concentrado.

O valor dos nutrientes digestíveis totais (NDT) da forragem consumida é estimado no submodelo planta e transferido ao submodelo animal. O submodelo animal converte os valores de NDT (dag kg⁻¹) em energia metabolizável (EM, em Mcal kg⁻¹) utilizando a expressão $EM = (3,62 NDT)/100$. Os valores de EM são convertidos em energia líquida de manutenção (EL_{m pl}) e de ganho (EL_{g pl}) na forragem e por meio das equações (NRC, 1984, 1996):

$$EL_{m pl} = -112 + 1,37 EM - 0,138 EM^2 + 0,0105 EM^3 \quad (3.1)$$

$$EL_{g pl} = -1,65 + 1,42 EM - 0,174 EM^2 + 0,0122 EM^3 \quad (3.2)$$

Estas foram inicialmente recomendadas para valores de EM no intervalo de 2,00 a 3,00 Mcal kg⁻¹ (NRC, 1984), mas foram validadas utilizando-se feno de capim-bermuda (*Cynodon dactylon*) com EM variando de 1,66 a 2,13 Mcal kg⁻¹ (Moore et al., 1991). Deste modo, o submodelo animal estima a quantidade de energia líquida de manutenção na forragem (EL_{m pl}) utilizando a equação 3.1. Essa quantidade é utilizada tanto para estimar o consumo para manutenção quanto o consumo para lactação e gestação (NRC, 1996). Para estimar a quantidade de energia líquida de ganho na forragem (EL_{g pl}), o submodelo animal utiliza a equação 3.2.

3.2.2. Requerimentos energético dos animais

Semelhantemente à forragem, o submodelo animal estima os requerimentos de energia líquida para manutenção (EL_{m an}) e para ganho (EL_{g an}) de animais em pastejo.

a) Energia líquida para manutenção

A regulação da temperatura corpórea, os processos metabólicos essenciais e a atividade física são as principais funções fisiológicas de manutenção (NRC, 1996). A energia líquida para manutenção (EL_{man}) é definida como a quantidade de energia consumida que não resulta em ganho nem em perda de energia dos tecidos dos animais.

O requerimento de EL_{man} de bovinos de corte é genericamente estimado pela equação $EL_{man} = 0,077 \overline{PV}^{0,75}$ (Mcal animal⁻¹ dia⁻¹) (NRC, 1984), em que $\overline{PV}$ é o peso médio do animal em jejum por 16 horas (kg). Quando o peso em jejum não for disponível, o submodelo animal o estima a partir da equação $PV = 0,937^{***} PV_{cheio}$ (Moore¹), em que o PV_{cheio} é o peso médio do animal antes do jejum.

A equação $EL_{man} = 0,077 \overline{PV}^{0,75}$ foi estimada com dados de experimentos com novilhas e machos castrados de raças taurinas em confinamento. Desta forma, sua utilização para animais em pastejo requer ajustes (NRC, 1996). Os requerimentos de energia líquida para manutenção são variáveis com o peso do animal, raça, sexo, idade, estação do ano, temperatura ambiental, estado fisiológico e intensidade de atividade física exercida (CSIRO, 1990; NRC, 1996; Rochinotti, 1998). Apesar do NRC (1996) incluir quase todas essas fontes de variação no cálculo da energia líquida para manutenção, para o submodelo animal foram consideradas as variações quanto ao estado fisiológico (j_{lact}), ao sexo (j_{sexo}), à raça ($j_{raça}$) e à atividade física dos animais durante o pastejo (EL_{mpast}). Assim, aquela equação foi reescrita:

$$EL_{man} = \left[\left(0,077 \overline{PV}^{0,75} \right) j_{lact} j_{raça} j_{sexo} \right] + EL_{mpast} \quad (3.3)$$

¹ Moore, J.E. (Department of Animal Sciences, University of Florida, Gainesville, USA). Comunicação pessoal, 2002.

Essa equação foi obtida a partir de experimentos com animais alimentados em pasto ou com silagem ou feno, sendo utilizados 2.684 pares de dados de peso cheio e peso em jejum, com metade medidos no início e metade no final dos períodos experimentais. Estimou-se $b_1 = 0,937 \pm 0,00037$; $S_{erro} = 5,8$ kg. *** significativo a 0,1 %.

Adotaram-se correções para o estado fisiológico e o sexo sugeridas pelo NRC (1996). Os requerimentos de energia líquida para manutenção de vacas são maiores quando em estado fisiológico de lactação e o NRC (1996) sugeriu um aumento de 20 % ($j_{lact} = 1,20$). Do mesmo modo para sexo, o modificador j_{sexo} assume valor de 1,15 para bovinos não-castrados, pressupondo-se que estes têm uma energia líquida para manutenção 15 % maior. Para zebuínos em crescimento e em terminação, adotou-se o valor de 0,85 para o modificador $j_{raça}$, assumindo-se um requerimento de energia líquida para manutenção 15 % menor do que o dos taurinos. Decidiu-se pelo valor de 0,85 ao invés do valor de 0,90 sugerido pelo NRC (1996), devido a maioria das estimativas desse modificador situarem-se entre 80 e 90 % (CSIRO, 1990; Boin, 1995; NRC, 1996; Paulino et al., 1999b; Vêras et al., 2000). Para os cruzados taurinos x zebuínos, utiliza-se valor de $j_{raça}$ intermediário entre os das raças utilizadas no cruzamento (NRC, 1996).

Para o ajuste da energia líquida para manutenção de animais em pastejo ($EL_{m\ past}$), o método fatorial vem sendo normalmente empregado (CSIRO, 1990; NRC, 1996; Rochinotti, 1998). Para a utilização desse método é necessário o conhecimento das atividades físicas envolvidas no pastejo, do custo energético de cada atividade e do tempo gasto em cada uma delas. A locomoção (caminhamento horizontal e vertical) e a alimentação (preensão, mastigação e ruminação) são considerados os principais fatores neste cálculo (Rochinotti, 1998). A correção recomendada pelo CSIRO (1990) e adotada pelo NRC (1996) é obtida por:

$$EL_{m\ past} = \left\{ \left[0,006 C_{an} \left(0,9 - \left(NDT / 100 \right) \right) \right] + \left[0,05 r / (F_{disp} + 3) \right] \right\} PV / 4,184$$

em que, C_{an} é o consumo de MS ($kg\ animal^{-1}\ dia^{-1}$); NDT é a concentração de nutrientes digestíveis totais na forragem ($dag\ kg^{-1}$ de MS); r é um coeficiente relativo ao relevo, com valores de 1,0; 1,5 e 2,0 para terrenos planos, ondulados e montanhosos, respectivamente; F_{disp} é a quantidade de forragem (verde ou total) disponível ($t\ ha^{-1}$ de MS); e PV é o peso dos animais (kg). No entanto, Rochinotti (1998) considerou que essa equação tem baixa

aplicabilidade. Segundo esse autor, no primeiro termo aditivo da equação a maior dificuldade é estimar o consumo dos animais. No segundo termo, o autor ressaltou que a estrutura do pasto e a porcentagem de forragem verde não são considerados, embora sejam mais importantes do que a quantidade de forragem disponível.

Assim, para estimar o ajuste da energia líquida para manutenção de animais em pastejo ($EL_{m\ past}$, em Mcal animal⁻¹ dia⁻¹) adotou-se no submodelo animal a equação proposta por Rochinotti (1998), na qual as atividades de locomoção, preensão e mastigação são os principais fatores que determinam os requerimentos de energia líquida para manutenção:

$$EL_{m\ past} = \frac{(0,62\ dist_{hor}\ \overline{PV}) + (3,7\ dist_{vert}\ \overline{PV}) + (Tp\ E_{past}\ \overline{PV}^{0,75})}{1.000} \quad (3.4)$$

em que, $dist_{hor}$ é a distância em nível (horizontal) percorrida diariamente pelo animal (km dia⁻¹); $dist_{vert}$ é a distância vertical (ascendente e descendente) percorrida diariamente pelo animal (km dia⁻¹); Tp é o tempo de pastejo (h dia⁻¹); e E_{past} é o gasto energético da alimentação em pastejo (kcal h⁻¹ PV^{-0,75}). Nessa equação Rochinotti (1998) sugeriu valores de 0,62 e de 3,7 kcal km⁻¹ kg⁻¹ para os coeficientes de gasto energético com o caminhamento horizontal e vertical, respectivamente.

Com base em resultados de pesquisa, Rochinotti (1998) ajustou uma equação para estimar a distância horizontal percorrida diariamente por bovinos ($dist_{hor}$, em km dia⁻¹) em função da área da pastagem (S), em hectares:

$$dist_{hor} = 2,90 + 0,0111S - 0,00000441S^2 \quad R^2 = 0,699 \quad (3.5)$$

Apesar de reconhecer que vários fatores afetam a distância percorrida por bovinos, esse autor assumiu que essa equação pode ser usada como uma primeira aproximação para estimar a distância horizontal percorrida ($dist_{hor}$). Quanto à distância horizontal percorrida ($dist_{vert}$), Rochinotti (1998) não encontrou na literatura estimativas para bovinos, mas ressaltou que os animais evitam o pastejo de áreas com mais de 10 % de inclinação. Para situações

como essa, uma sugestão arbitrária para se estimar a $dist_{vert}$ seria assumir que a cada quatro dias os animais percorrem uma distância vertical equivalente à diferença de nível entre o ponto mais baixo e o mais alto da pastagem. Assim, o valor de $dist_{ver}$, em $km\ dia^{-1}$, foi considerado igual a um quarto da diferença de nível máxima em pastagens com mais de 10 % de inclinação.

A determinação do gasto energético da alimentação em pastejo (E_{past}), que se relaciona aos movimentos mandibulares associados à preensão, arrancamento, manipulação e mastigação da folhagem, é mais difícil por depender da quantidade e qualidade da forragem ofertada e da estrutura do pasto (Rochinotti, 1998; Sollenberger e Burns, 2001). Rochinotti (1998) adotou as estimativas feitas por Di Marco et al. (1996) que variaram de 0,55 a 1,85 $kcal\ h^{-1}\ PV^{-0,75}$ para pastos de clima temperado (aveia e azevém), em diferentes condições de qualidade e de quantidade disponível. No pasto de menor qualidade e menor disponibilidade, Di Marco et al. (1996) observaram uma taxa de 59 bocados mim^{-1} associada ao valor de 1,85 $kcal\ h^{-1}\ PV^{-0,75}$ para o gasto energético da alimentação em pastejo. Considerando que essa taxa de bocados aproxima-se do limite máximo teórico para bovinos (Minson, 1990), Rochinotti (1998) concluiu que aquela estimativa é semelhante ao limite superior do gasto energético da alimentação em pastejo. Esse autor ressaltou, no entanto, que em pastagens tropicais com baixo valor nutritivo, o gasto energético da alimentação em pastejo pode ser maior devido ao requerimento de energia para cortar a forragem lignificada; esta informação não foi encontrada.

O tempo de pastejo (T_p) varia, em geral, de 7 a 12 $h\ dia^{-1}$ (Stobbs, 1970; Chacon et al., 1978; Euclides, 1985; Euclides et al., 1999, 2000; Brâncio, 2000). Quando as características do pasto são menos favoráveis à seleção da forragem (menor relação folha:caule, maior proporção de material morto, menor densidade) os animais tendem a reduzir o tamanho de bocado. Geralmente, os animais procuram compensar as variações no tamanho de bocados com aumento ou redução da taxa de bocados e do tempo de pastejo, para manter o mesmo consumo (Chacon et al., 1978). Em pastagens de capim-pensacola (*Paspalum notatum*) e de capim-floralta (*Hemarthria altissima*), novilhos mantiveram o tempo de pastejo entre 8,9 a 11,0 $h\ dia^{-1}$, com tempo médio de 10,1 $h\ dia^{-1}$ (Euclides, 1985). Para vacas Jersey observou-se tempo de pastejo

médio de 7,6 e 8,3 h dia⁻¹ em pastagens de *Setaria sphacelata* e *Digitaria decumbens*, respectivamente (Stobbs, 1970). Em pastagens dessas gramíneas, Chacon et al. (1978) observaram que a diminuição da oferta de forragem devido ao aumento da taxa de lotação de 4,3 para 8,0 animais ha⁻¹ proporcionou aumento no tempo de pastejo de 8,9 para 11,4 h dia⁻¹. Semelhantemente, como reflexo da menor disponibilidade de forragem verde em pastagens de *B. decumbens* e *B. brizantha*, o tempo de pastejo de novilhos nelore foi, respectivamente, de 9,4 e 10,1 h dia⁻¹, durante a estação seca, e de 8,8 e 8,1 h dia⁻¹, durante a estação chuvosa (Euclides et al., 2000). Em pastagens de capim-colonião, capim-tobiatã e capim-tanzânia (*P. maximum*), o tempo de pastejo (Tp) de novilhos nelore variou de 7,5 a 10,6 h dia⁻¹, com valores médios de 8,5 e 9,9 h dia⁻¹ durante o verão e o inverno, respectivamente (Euclides et al., 1999). Em condições semelhantes, Brâncio (2000) observou Tp variando de 8,3 a 11,3 h dia⁻¹, porém sem diferenças significativas entre as pastagens de capim-tanzânia, capim-mombaça e capim-massai, cultivares de *P. maximum*, e entre as duas épocas do ano.

Com base nesses dados de gasto energético da alimentação em pastejo (E_{past}) e de tempo de pastejo (Tp), para o submodelo animal foram adotados os valores de 1,2 kcal h⁻¹ PV^{-0,75} para E_{past} e de 8,5 e 10,5 h dia⁻¹ para Tp durante a estação chuvosa e a seca, respectivamente. Porém, ressalta-se que esses valores podem ser modificados de acordo com a experiência do usuário dentro da amplitude compatível com pastagens tropicais ($0,9 < E_{\text{past}} < 1,85$ kcal h⁻¹ PV^{-0,75}; $8 < \text{Tp} < 13$ h dia⁻¹), considerando que maiores valores devem ser adotados para pastagens com menor disponibilidade de forragem.

No caso de vacas lactantes e vacas gestantes, os requerimentos de energia líquida são expressos em termos de energia líquida de manutenção para lactação ($EL_{\text{m lact}}$) e para gestação ($EL_{\text{m gest}}$), que devem ser adicionados à estimativa de energia líquida para manutenção ($EL_{\text{m an}}$) obtidos com a equação 3.3. Isso é válido por se considerar que a utilização da energia metabolizável dos alimentos para os processos de manutenção, lactação e gestação se dá com a mesma eficiência (NRC, 1996). Assim, para esses casos a $EL_{\text{m an}}$ pode ser calculada por:

$$EL_{man} = \left[\left(0,077 \overline{PV}^{0,75} \right) j_{lact} j_{raça} j_{sexo} \right] + NE_{mpast} + NE_{mgest} + NE_{mlact} \quad (3.6)$$

Os requerimentos de energia líquida para lactação (EL_{mlact} , em Mcal animal⁻¹ dia⁻¹) são normalmente estimados a partir da produção diária (p , em kg dia⁻¹) e do teor de gordura ($gord$, em %) do leite:

$$EL_{mlact} = (0,097 \text{ gord} + 0,361) p \quad (3.7)$$

No entanto, na prática essas variáveis não são conhecidas para vacas de corte e mesmo em condições experimentais são de difícil quantificação (NRC, 1996). O NRC (1996) considera o teor médio de gordura do leite igual a 4 %; assim, a estimativa de EL_{mlact} é dada por $EL_{mlact} = 0,749 p$.

A produção de leite é variável durante o período de lactação sendo descrita para vacas de corte pela equação (NRC, 1996):

$$p_7 = 7 \left(\frac{t_{lact}}{a e^{z t_{lact}}} \right) \quad (3.8)$$

em que p_7 é produção semanal de leite (kg semana⁻¹) na semana t_{lact} pós-parto da vaca. Para o coeficiente z , o NRC (1996) sugeriu o valor de 0,1176 considerando que o pico da lactação em vacas de corte ocorre 8,5 semanas após o parto. O coeficiente a depende da produção de leite no pico da lactação (pL_{pico}), de modo que: $a = 1/(z \cdot e \cdot pL_{pico})$. Assim, num intervalo de tempo durante a lactação (Δt_{lact} , em semanas) a produção média diária de leite ($p_{\Delta t}$, em kg vaca⁻¹ dia⁻¹) é obtida a partir da integração da equação 3.8:

$$p_{\Delta t} = \frac{7 \int_{t_{lact1}}^{t_{lact2}} \frac{t_{lact}}{a e^{z t_{lact}}} dt}{\Delta t_{lact}} \quad (3.9)$$

Essa estimativa é convertida em energia líquida para lactação (EL_{mlact} , em Mcal dia⁻¹) utilizando-se a equação 3.7.

Os requerimentos de energia líquida para gestação ($EL_{m\text{ gest}}$) também são variáveis com o período da gestação em que a vaca se encontra e com o peso do bezerro ao nascer. Segundo o NRC² (1996), a $EL_{m\text{ gest}}$ acumulada no útero de vacas gestantes entre o início e um determinado período durante a gestação pode ser estimada por:

$$EL_{m\text{ gest}} = \frac{k_m \overline{PV}_{bez} 13,931 e^{(0,03233 t_{gest} - 0,0000275 t_{gest}^2)}}{1.000} \quad (3.10)$$

em que k_m é a eficiência de utilização da energia metabolizável para a manutenção ($k_m = EL_{m\text{ pl}}/EM$); PV_{bez} é o peso dos bezerros ao nascer (kg) e; t_{gest} é o período da gestação da vaca (0 a 280-285 dias). Com os valores de k_m , calculado pelo submodelo animal e de PV_{bez} , fornecido pelo usuário ou assumindo-se um valor padrão para a raça, estimam-se os requerimentos de $EL_{m\text{ gest}}$ ($\text{Mcal animal}^{-1}\text{dia}^{-1}$) por:

$$EL_{m\text{ gest}} = \frac{(EL_{m\text{ gest } t_2} - EL_{m\text{ gest } t_1})}{\Delta t_{gest}} \quad (3.11)$$

ou seja, por meio da diferença entre a energia líquida para gestação acumulada até o último dia de pastejo ($EL_{m\text{ gest } t_2}$) e a acumulada antes do início do pastejo ($EL_{m\text{ gest } t_1}$) dividida pelo período de tempo (Δt_{gest}) que as vacas gestantes pastejaram determinado piquete. Essa estimativa deve ser adicionada à energia líquida para manutenção (Equação 3.6).

² A energia acumulada no útero de vacas de corte (Ye , em kcal) em função do período de gestação (t_{gest}) pode ser estimada por:

$$Ye = PV_{bez} 1811 e^{(0,03233 t_{gest} - 0,0000275 t_{gest}^2)}$$

A transformação de Ye em energia metabolizável (EM) é possível utilizando-se uma eficiência de 13%:

$$EM_{gest} = \left[PV_{bez} 1811 e^{(0,03233 t_{gest} - 0,0000275 t_{gest}^2)} \right] / 0,13$$

$$EM_{gest} = PV_{bez} 13,931 e^{(0,03233 t_{gest} - 0,0000275 t_{gest}^2)}$$

Por fim, para a conversão de EM em $EL_{m\text{ gest}}$, utiliza-se a eficiência de utilização da energia metabolizável para manutenção (k_m), como na equação 3.11. Essa mesma dedução é apresentada no NRC (1996), porém para a derivada da equação $Ye = f(PV_{bez}; t_{gest})$, no intuito de se obterem os requerimentos diários de $EL_{m\text{ gest}}$ (Mcal dia^{-1}).

b) Energia líquida para ganho

A energia líquida para ganho é a energia depositada nos tecidos dos animais durante o crescimento ou terminação, que é função da proporção de gordura e de proteína por unidade de ganho de peso. No entanto, essa proporção é bastante variável com o nível de ganho, com a composição da dieta, com o peso, idade, sexo e raça do animal (NRC, 1984).

No submodelo animal, estima-se o requerimento de energia líquida para ganho (EL_{gan} , em Mcal animal⁻¹ dia⁻¹) a partir do ganho de peso diário ($GPD = \frac{\overline{PV}_{final} - \overline{PV}_{inicial}}{T_{past}}$, em kg animal⁻¹ dia⁻¹) e do peso médio dos animais em jejum ($\overline{PV}$, em kg). Para tanto, utilizaram-se as equações sugeridas pelo NRC (1984) para vários tipos de machos castrados e fêmeas e a equação ajustada por Veras et al. (2001a) para machos não-castrados de raça zebuína ou cruzados zebuíno x taurino (Quadro 3.1).

Quadro 3.1. Equações utilizadas para o cálculo dos requerimentos de energia líquida de ganho para vários tipos de bovinos de corte

Equação	Categoria animal
$EL_{gan} = 0,0557 (\overline{PV})^{0,75} GPD^{1,097}$	Bezerros de porte médio castrados
$EL_{gan} = 0,0493 (\overline{PV})^{0,75} GDP^{1,097}$	Bezerros de porte grande castrados; novilhos de porte médio castrados e bezerros de porte médio não-castrados
$EL_{gan} = 0,0437 (\overline{PV})^{0,75} GDP^{1,097}$	Bezerros de porte grande não-castrados e novilhos de porte grande castrados
$EL_{gan} = 0,0383 (\overline{PV})^{0,75} GDP^{1,1578} \text{ (1)}$	Machos zebuínos e seus mestiços não-castrados
$EL_{gan} = 0,0686 (\overline{PV})^{0,75} GDP^{1,119}$	Bezerras de porte médio
$EL_{gan} = 0,0606 (\overline{PV})^{0,75} GDP^{1,119}$	Bezerras de porte grande e novilhas
$EL_{gan} = 6,2 GDP$	Vacas magras

Fonte: NRC, 1984; Vêras et al., 2001.

⁽¹⁾ Equação modificada a partir da apresentada por Veras et al. (2001) para estimativa da EL_{gan} a partir do peso dos animais em jejum. Foi utilizado o fator 0,891 para converter o peso vazio em peso dos animais em jejum e o fator 0,956 para converter o ganho de peso vazio em ganho de peso dos animais em jejum (NRC, 1984).

3.2.3. Consumo de forragem

Pelo método dos requerimentos energéticos, o consumo total de forragem (C_{an}) expresso em $\text{kg animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de matéria seca é obtido por:

$$C_{an} = C_{man} + C_{gan} \quad (3.12)$$

em que C_{man} representa o consumo de forragem para manutenção dos animais e C_{gan} é o consumo para ganho de peso. A lógica dessa compartimentalização do consumo baseia-se no fato de que a energia metabolizável nos alimentos é utilizada pelos animais com diferente eficiência de acordo com as funções metabólicas (manutenção, lactação, gestação e crescimento). Assim, o consumo para manutenção e para ganho é calculado por:

$$C_{man} = EL_{man} / EL_{mpl} \quad (3.13)$$

$$C_{gan} = EL_{gan} / EL_{gpl} \quad (3.14)$$

O consumo total de forragem por unidade de área (C_{ha} , em kg ha^{-1}), durante o período de utilização da pastagem (T_{past} , em dias) é obtido por:

$$C_{ha} = C_{an} \cdot T_{past} \cdot n \quad (3.15)$$

em que n é a taxa de lotação (animais ha^{-1}).

O valor de C_{ha} é utilizado no submodelo planta para estimar a produção de forragem, a quantidade de nutrientes remobilizados internamente nas plantas e depositados no solo na forma de liteira.

A estimativa do consumo de forragem é mais complexa no caso de animais que recebem alimentos suplementares em pasto e de bezerros entre o nascimento e a desmama (em geral, aos sete meses), por consumirem tanto leite materno quanto forragem. Devido a necessidade de maior conhecimento sobre a nutrição animal para entender e estimar com maior exatidão os efeitos da suplementação no consumo de forragem, optou-se por calcular apenas o consumo de animais alimentados exclusivamente em pasto. Semelhantemente,

não se considerou o efeito do consumo de leite sobre o consumo de forragem por bezerros. Isso implica, na maioria dos casos, superestimação do consumo pelo submodelo animal, pois, em geral, o ganho de peso de bezerros e o consumo de forragem são relacionados à quantidade de leite consumido (Baker e Barker, 1978; Le Du e Baker, 1979; Ansotegui et al., 1991). Na prática, os bezerros consomem forragem e leite, o que, conseqüentemente, implica uma maior produção e menor consumo de forragem do que o esperado em animais que não consomem leite. Somado a isso, a dieta exclusiva de forragem possui menor quantidade de energia o que leva à superestimação do consumo (Equações 3.13 e 3.14).

Destaca-se, no entanto, que a estrutura do submodelo animal permite a inclusão de procedimentos de cálculos que aprimorem a estimativa do consumo de forragem por bezerros não-apartados e para situações em que alimentos suplementares ao pasto são disponibilizados para os animais.

3.2.4. Consumo de nutrientes

O consumo do nutriente i (C_{iha} , em kg ha^{-1}) é obtido pela multiplicação do teor desse elemento na forragem (T_{ipl} , em dag kg^{-1}) pelo consumo de forragem de um animal (C_{an} , em $\text{kg animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), considerando ainda o consumo diário dos nutrientes via suplemento mineral. Assim:

$$C_{iha} = (n T_{past}) \left\{ C_{an} T_{ipl} + \left[\left(\frac{Q_{sm}}{T_{past} (n S)} \right) T_{ism} \right] \right\} / 100 \quad (3.16)$$

em que Q_{sm} é a quantidade total de suplemento mineral (kg) fornecido aos animais durante determinado período de utilização da pastagem (T_{past}), T_{ism} é o teor do nutriente i no suplemento mineral (dag kg^{-1}), S é área da pastagem (ha), n é a taxa de lotação (animais ha^{-1}) e demais variáveis conforme descrito anteriormente.

Para incluir o conteúdo de nutrientes do leite no modelo, assumiu-se que todo leite produzido é consumido pelos bezerros. Assim, para essa categoria animal o consumo de nutrientes pode ser dado por:

$$C_{i\ ha} = (n\ T_{past}) \left\{ (C_{an}\ T_{ipl}) + \left[\left(\frac{Q_{sm}}{T_{past}\ (n\ S)} \right) T_{ism} \right] + (p_{\Delta t}\ T_{ileite}) \right\} / 100 \quad (3.17)$$

em que $p_{\Delta t}$ é a produção média diária de leite ($\text{kg vaca}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) (Equação 3.9) e T_{ileite} é o teor do nutriente i no leite (dag kg^{-1}).

3.3. Retenção e excreção de nutrientes pelos animais

A quantidade de cada nutriente mineral excretada pelos animais pode ser calculada pela diferença entre a quantidade do nutriente consumida e a quantidade retida no animal na forma de ganho de peso e, ou, produção de leite (Van Horn et al., 1996). Desta forma, a quantidade do nutriente i retida no animal (R_{ian} , em kg ha^{-1}) pode ser calculada por:

$$R_{ian} = (n\ T_{past}) \left[GPD \cdot T_{ian} + \left(\frac{p_{\Delta t}}{\Delta t_{lact}} \right) T_{ileite} \right] / 100 \quad (3.18)$$

em que T_{ian} e T_{ileite} são os teores do nutriente i no corpo dos animais em jejum (Quadro 3.2) e no leite (dag kg^{-1}), respectivamente; GPD é o ganho de peso diário do animal ($\text{kg animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); demais variáveis conforme descrito anteriormente. Conseqüentemente, as quantidade dos nutrientes excretadas pelos animais (EX_{ian} , em kg ha^{-1}) podem ser obtidas por:

$$EX_{ian} = C_{iha} - R_{ian} \quad (3.19)$$

Para vacas gestantes, assumiu-se que a quantidade do nutriente retida no animal pode ser calculada pelo ganho de peso da vaca e do feto e com o teor dos nutrientes no corpo dos animais. As quantidades dos nutrientes retidas nos animais (R_{ian}) obtidas dessa forma não são exatas sob o ponto de vista da nutrição animal, porém como a proporção dos nutrientes retidos é pequena em relação às quantidades dos nutrientes excretadas, considerou-se que esta inexatidão não influencia significativamente as recomendações de adubação.

Quadro 3.2. Teor médio de nutrientes em bovinos, com base no peso dos animais em jejum

	N	P	K	Ca	Mg	S	Referência
	----- dag kg ⁻¹ -----						
	2,70	0,75	0,18	1,30	0,05	0,15	Whitehead (2000)
	2,40	0,74	0,18	1,60	0,03	---	Jorge et al. (1999) ^{/1}
	2,50	0,80	0,19	1,60	0,03	---	Paulino et al. (1999a, c) ^{/1}
	2,60	0,71	0,17	1,30	0,03	---	Ferreira et al. (1999 a,b) ^{/1}
Média	2,55	0,75	0,18	1,45	0,03	0,15	

^{/1} Os teores dos nutrientes foram convertidos da base peso de corpo vazio para peso dos animais em jejum, utilizando o fator 0,891 (NRC, 1984).

Além das quantidades dos nutrientes excretadas, a partição entre fezes e urina é importante quando se objetiva estimar os requerimentos dos nutrientes para manutenção da produtividade das pastagens. Isso se justifica pelas diferenças entre as formas químicas pelas quais os nutrientes são excretados nas fezes e na urina e as implicações na disponibilidade para as plantas e nas perdas dos nutrientes. Essa informação é importante especialmente para o N, que é excretado na urina predominantemente como uréia (70 a 90 % do N-urina), que devido a intensas perdas apresenta baixa taxa de recuperação pelas plantas (Haynes e Williams, 1993).

O P, Ca e Mg são excretados predominantemente nas fezes, enquanto o K é excretado principalmente na urina. O N e S são excretados em quantidades significativas tanto nas fezes quanto na urina, dependendo de seus teores na forragem consumida (Henzell e Ross, 1973; Wilkinson e Lowrey, 1973; Barrow, 1987; Haynes e Williams, 1993). No submodelo animal a partição do P, Ca, Mg e K excretados entre fezes e urina é feita utilizando-se valores médios apresentados no quadro 3.3. Devido às poucas informações disponíveis para o S estabeleceu-se que 60 % das excreções ocorrem nas fezes. Esse valor é compatível com baixos teores de S, esperados na maioria das pastagens tropicais (Barrow e Lambourne, 1962). No submodelo animal, a

Quadro 3.3. Porcentagem média da partição dos nutrientes excretados entre fezes e urina

Nutriente	Fezes	Urina
	----- % -----	
P	97	3
K	20	80
Ca	97	3
Mg	80	20
S	60	40

Fonte: Haynes e Williams, 1993; Whitehead, 2000.

partição do N excretado nas fezes e na urina é feita utilizando a equação³:

$$\hat{N}_{ur} = 27,00^{***} + 12,934^{***} T_{N\ pl} \quad R^2 = 0,922 \quad (3.20)$$

em que N_{ur} é a porcentagem do N excretado via urina e $T_{N\ pl}$ é o teor de N na forragem.

3.4. Distribuição das excretas na pastagem

Os nutrientes minerais que retornam ao solo nas excretas dos animais contribuem para elevar, localizadamente, o nível da fertilidade do solo e a produção forrageira. Porém, a eficiência dessa reciclagem depende não só das quantidades dos nutrientes excretados mas também da proporção da área da pastagem afetada pelas excretas (Richards e Wolton, 1976). No entanto, poucas pesquisas têm objetivado obter estatísticas que caracterizem a homogeneidade da distribuição das excretas. Essa tem sido, em geral, caracterizada a partir da distribuição binomial negativa (Petersen et al., 1956a; Richards e Karen, 1976; Morton e Baird, 1990; Braz, 2001), o que torna possível estimar a proporção da área da pastagem (E_j) afetada por j (0, 1, 2,... z) excreções durante um período de pastejo. Apesar dessa função levar a pequena superestimação da área da pastagem não coberta por excretas e

³ $\forall T_{N\ pl}$ entre 0,8 e 4,0 dag kg⁻¹; $b_0 = 27,00 \pm 3,23$; $b_1 = 12,934 \pm 1,138$; $s_{erro} = 4,23$ %. *** significativo a 0,1 %. **Fonte:** Barrow e Lambourne (1962); Henzell e Ross (1973); Jarvis et al (1995); White et al. (1997).

subestimar a área coberta por grande número fezes e, ou, urina, ela é considerada a que melhor descreve a distribuição espacial das excretas (Petersen et al., 1956a; Morton e Baird, 1990; Braz, 2001). Assim:

$$E_j = \frac{(k+j-1)!}{j!(k-1)!} \frac{(D/(k+D))^j}{((k+D)/k)^k} 100 \quad (3.21)$$

em que D é a frequência de área de excretas ($m^2 m^{-2}$), ou seja, o número médio de vezes que uma unidade de área da pastagem é coberta por uma unidade de área de excreta e k é um coeficiente que mede a não-uniformidade na distribuição das excretas dos animais em pastejo. O valor de D pode ser calculado por:

$$D = (h_{ur} a_{ur} + h_{fz} a_{fz}) / 10.000 \quad (3.22)$$

em que η_{ur} e η_{fz} são o número total de micções e defecações por hectare e a_{ur} e a_{fz} a área ocupada por uma deposição de urina e uma de fezes (m^2), respectivamente.

As variáveis η_{ur} e η_{fz} são dependentes da taxa de lotação expressa em animal dia ha^{-1} ($d_n = n T_{past}$) e da produção diária de excretas por animal (p_{ur} e p_{fz} , em micções e defecações animal $^{-1}$ dia $^{-1}$, respectivamente):

$$h_{ur} = d_n p_{ur} \quad (3.23)$$

$$h_{fz} = d_n p_{fz} \quad (3.24)$$

A produção diária de excretas por bovinos está normalmente no intervalo de oito a doze micções e de 11 a 16 defecações (Haynes e Williams, 1993). No submodelo animal, adotaram-se valores médios para p_{ur} de dez micções animal $^{-1}$ dia $^{-1}$ e para p_{fz} de 13,5 defecações animal $^{-1}$ dia $^{-1}$.

Quanto aos valores da área ocupada por uma deposição de urina (a_{ur}) e uma de fezes (a_{fz}) tem-se que uma micção cobre em média de 0,16 a 0,49 m^2 e uma defecação de 0,05 a 0,09 m^2 . As variações nos valores de a_{ur} são devidas às variações no volume de urina e dos efeitos do vento, inclinação do

terreno, umidade do solo, movimentação do animal (Haynes e Williams, 1993). No submodelo animal, adotaram-se valores para a_{ur} de $0,33 \text{ m}^2$ e para a_{fz} de $0,07 \text{ m}^2$.

A uniformidade na distribuição espacial dos excrementos dos bovinos é variável com a taxa e o sistema de lotação (contínuo e rotativo), a duração da ocupação do pasto no sistema rotativo (Peterson e Gerrish, 1995) e as condições climáticas que, segundo Sollenberger et al. (2002), é o fator mais importante. No entanto, as estimativas do coeficiente relativo à não-uniformidade na distribuição das excretas (k) disponíveis na literatura foram obtidas variando apenas a taxa de lotação. Os valores variam entre 0,5 e 17, sendo que distribuições menor heterogênea das excretas, expressas por maiores valores de k , associam-se a maiores taxas de lotação (Petersen et al., 1956a; Richards e Karen, 1976; Morton e Baird, 1990; Braz, 2001). Com base nas informações encontradas na literatura, pode-se aceitar $k = 2$ para sistemas de produção extensivos e $k = 7$ para sistemas intensivos. Porém, a frequência de área de excretas mostrou-se, por meio de simulações, mais importante do que o coeficiente k para caracterizar a heterogeneidade da distribuição das excretas (Figura 3.1), o que levou a adoção de $k = 5$ no submodelo animal.

As estimativas da proporção da área da pastagem afetada por 0, 1, 2,... 5 excreções são utilizadas no submodelo solo para modelar a reciclagem dos nutrientes por meio das excreções.

3.5. Discussão

A dificuldade em se estimar o consumo de forragem por animais em pastejo reflete-se na variação dos métodos utilizados em trabalhos de balanço de nutrientes (Cornforth e Sinclair, 1982; Campkin, 1984; Williams et al., 1990; Thomas, 1992; Oyanarte et al., 1997).

Para quantificar o balanço do N em pastagens tropicais, Thomas (1992) utilizou a eficiência de utilização de forragem (U_t) como estimador do consumo, sugerindo valores empíricos de 10 a 40 % da forragem disponível. Apesar disso, simulação como a proposta por Thomas (1992), gera relações entre doses de N e produção de forragem dentro de magnitude previsível de magnitude previsível experimentalmente (Figura 3.2). Em modelos

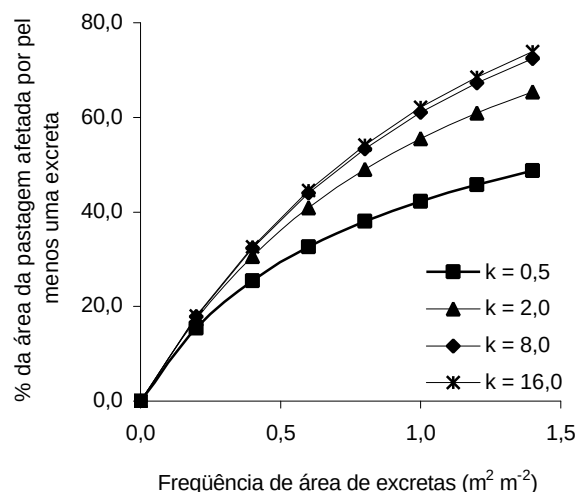


Figura 3.1. Simulação da porcentagem da área da pastagem afetada por pelo menos uma placa de excreta, de acordo com a frequência de área de excretas e o coeficiente relativo à não-uniformidade na distribuição das excretas (k) da distribuição binomial negativa.

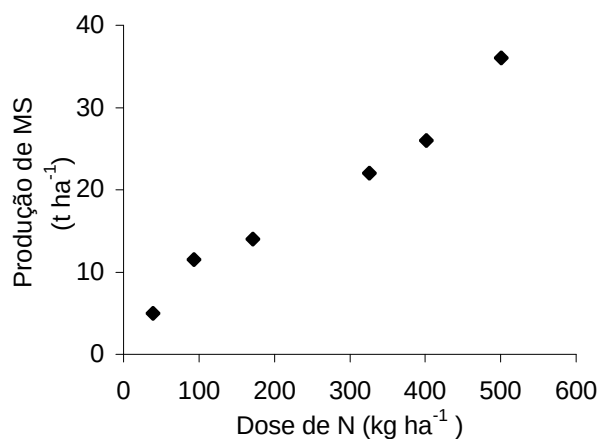


Figura 3.2. Doses de nitrogênio obtidas a partir de simulações com modelo de balanço nutricional proposto por Thomas (1992) necessárias para manutenção de diversas produtividades de uma pastagem tropical (eficiência de recuperação pelas plantas do N aplicado = 50 %).

neozelandeses para a recomendação de adubação, a reciclagem é baseada no consumo teórico por unidade de lotação, constante para todas as situações (Conrnforth e Sinclair, 1982; Campkin, 1985; Williams et al., 1990). No entanto, a utilização do consumo teórico fornece apenas uma estimativa do consumo potencial, pois desconsidera os efeitos da oferta de forragem, do valor nutritivo,

da estrutura do pasto, da capacidade de seleção dos animais e das condições ambientais importantes em condições de pastejo. Nesse sentido, esse método tem pouco valor para a predição do consumo a não ser que combinado, em modelos de simulação, com outros fatores que afetam o pastejo (Moore, 1996).

Alguns desses fatores foram incorporados no modelo mecanístico de Johnson e Parsons (1985), no qual o consumo de animais em pastejo apresenta uma relação sigmóide⁴ em função do índice de área foliar (L) do pasto. Os autores argumentaram que os animais consomem preferencialmente folhas e que a relação sigmóide entre altura do pasto e o consumo é observada em estudos comportamentais em pastagens de clima temperado. Esse modelo também simula a capacidade dos animais selecionarem folhas novas em relação às folhas senescentes. Modelos mecanísticos apresentam a vantagem de levar em consideração as principais variáveis do processo, permitindo explorar os relacionamentos de causa e efeito envolvidos, devendo, portanto, ser preferidos sempre que possível, em pesquisas que envolvem modelagem.

Em pastagens de clima temperado, a aplicação do modelo de Johnson e Parsons (1985) é facilitada por haver estreita relação entre a altura do pasto e o índice de área foliar. Em pastagens tropicais a altura do pasto não é uma variável independente confiável para a massa e a área foliar ou mesmo para a forragem disponível (Stoobs, 1975; Humphreys, 1991; Holderbaum et al., 1992; Busque e Herrero, 2001). Além disso, existem poucos trabalhos sobre as relações entre as características do pasto e o comportamento animal, bem como seus efeitos no consumo e na produção animal. Isso pode ser atribuído à diversidade morfológica entre as numerosas espécies forrageiras utilizadas nos trópicos (Sollenberger e Burns, 2001) e a maior variabilidade quanto ao valor nutritivo e à qualidade entre as partes das plantas (folhas, bainhas, caules) dentro de uma espécie (Zemmelink e 't Mannetje, 2002).

Quando o objetivo é estimar a quantidade de forragem consumida por um grupo de animais em pastejo é, provavelmente, mais simples a utilização

⁴ $C = C_{\max} \frac{(L/k)^q}{1 + (L/k)^q}$, em que C e $C_{\max}$ são o consumo e o consumo máximo de animais em pastejo (kg m⁻² MS ou carbono), L é o índice de área foliar e k e q são parâmetros do modelo.

de equações que relacionam os requerimentos energéticos dos animais para determinado nível de produção e a quantidade de energia da forragem consumida (Minson e Wilson, 1994; Moore, 1996; Reeves et al., 1996; van Horn et al., 1996). Esse método, denominado método “do cálculo reverso” ou “dos requerimentos energéticos”, é mais exato do que extrapolações do consumo potencial baseado exclusivamente no peso corporal ou do consumo estimado a partir do valor nutritivo (Moore, 1996).

Por esse método, as estimativas do consumo refletem as mudanças na quantidade e na qualidade da forragem integradas no tempo e independem do sistema de pastejo adotado. A exatidão das estimativas é função da confiabilidade dos valores para a digestibilidade da forragem e para a produção animal (Moore, 1996; Reeves et al., 1996; van Horn et al., 1996). A precisão da medida da produção animal (ganho de peso) é obtida, em condições experimentais, com a pesagem do maior número possível de animais em intervalos de tempo de no mínimo 28 dias (Moore, 1996). Porém, o ponto crítico do método dos requerimentos energéticos, é a determinação da digestibilidade *in vitro* da forragem, pois essa reflete não só a quantidade de energia disponível, mas também determina a eficiência da utilização dessa energia para manutenção e para ganho (NRC, 1984, 1996; Moore, 1996).

Os resultados da produção animal incorporam às estimativas de consumo a capacidade dos animais em selecionar a forragem disponível para obter uma dieta de melhor qualidade. No entanto, essa seletividade no pastejo coloca uma dificuldade na estimativa do consumo, pois a digestibilidade da dieta selecionada difere, na maioria dos casos, da digestibilidade da forragem disponível (Forbes et al., 1963; Euclides et al., 1992; Pereira et al., 1992a; Euclides et al., 1999, 2000; Brâncio, 2000; Zemmeling e 't Mannetje, 2002). Essa divergência se acentua no período da seca, quando a diminuição da digestibilidade da forragem disponível é mais acentuada do que a da forragem efetivamente consumida (Euclides et al., 1999, 2000). Euclides et al. (1992) recomendaram a amostragem da forragem disponível baseada na simulação da seleção feita pelos animais, após cuidadosa observação do pastejo.

Em pastagens de *Brachiaria decumbens*, *B. humidicola*, *B. brizantha*, *Andropogon gayanus* e três cultivares de *Panicum maximum*, os animais pastejaram, preferencialmente, material verde (90 a 97 %) e folhas (80 a 95 %

da dieta) (Euclides et al., 1992; Euclides et al., 1999, 2000), o que proporcionou maior valor nutritivo da dieta em relação à forragem disponível (Euclides et al., 1992; Pereira et al., 1992a). Nessas mesmas pastagens, o consumo e o ganho de peso diário dos animais durante a época da seca diminuíram mais em função da redução na disponibilidade de forragem verde e de folhas do que devido à redução no valor nutritivo da forragem consumida (Euclides et al., 1999, 2000). Zemelink e 't Mannetje (2002) argumentaram que com o aumento da disponibilidade de forragem, cresce o nível de seleção pelos animais e o valor nutritivo da dieta, o que se reflete em maior consumo e maior produção. O submodelo animal, aqui proposto, é sensível à redução no consumo durante o período de menor disponibilidade de forragem verde como resposta da interação dos menores valores de ganho de peso e de digestibilidade da forragem nos cálculos do consumo. Neste trabalho considerou-se apenas o consumo durante a estação de crescimento das plantas por se considerar que a maior proporção da produção anual de forragem e o consumo desta ocorrerem nesta época do ano.

Em pastagens de *B. humidicola*, Pereira et al. (1992a,b) determinaram a digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS) da forragem disponível e da dieta e o consumo de MS por animais (370 kg de PV) pelo método do óxido crômico ($7,05 \text{ kg animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Utilizando-se a DIVMS da forragem disponível, o consumo estimado pelo submodelo animal foi de $15,0 \text{ kg animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, que é irreal. Utilizando-se, no entanto, a DIVMS da dieta o consumo estimado foi de $7,8 \text{ kg animal}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, que é pouco maior do que o obtido experimentalmente por Pereira et al. (1992b).

De fato, por meio de análise de sensibilidade observou-se que a subestimação da digestibilidade da forragem consumida leva a superestimação do consumo pelo método do requerimentos energéticos (Figura 3.3). Mantendo-se todas as variáveis constantes, a diminuição da digestibilidade em 30 % (de 60 para 42 %), por exemplo, levou ao aumento da estimativa do consumo em 79 %. Por outro lado, a superestimação da digestibilidade da forragem implicou menor erro. A sensibilidade do modelo às variações no ganho de peso foi sempre menor do que às variações na digestibilidade. No entanto, essa análise de sensibilidade deve ser examinada cuidadosamente, pois o relacionamento negativo entre digestibilidade (ou energia digestível) e o

consumo somente se aplica quando se mantém constante o ganho de peso (Moore⁵). Para Conrad et al. (1964), o consumo de alimentos por ruminantes aumenta com o aumento da digestibilidade ou valor nutritivo até que o consumo de energia digestível torna-se constante. Na prática, para uma ampla faixa de digestibilidade de forragens, existe correlação positiva ($r = 0,75$) entre o consumo de MS e a quantidade de energia digestível (Moore e Coleman, 2001).

Valores de consumo de forragem estimados pelo submodelo animal foram obtidos para pastagens de *B. humidicola*, *B. decumbens*, *B. brizantha*, *P. maximum* e *Paspalum notatum* e comparados com os valores estimados pelo método do óxido crômico (Figura 3.4) (Moore et al., 1969; Pereira et al., 1992; Euclides et al., 1999, 2000). Verificou-se que os métodos foram estatisticamente diferentes de acordo com o método proposto por Leite e Oliveira (2002), com tendência do submodelo animal subestimar o consumo.

As diferenças nas estimativas do consumo são esperadas devido aos erros associados a cada método (Moore, 1996; Reeves et al., 1996) e ao fato de tanto o consumo de forragem quanto a produção animal serem dependentes

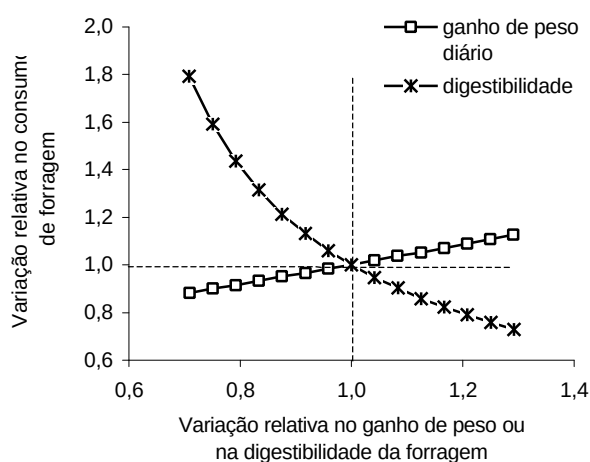


Figura 3.3. Sensibilidade das estimativas do consumo de forragem pelo submodelo animal em função das variações no ganho de peso diário dos animais e no valor da digestibilidade da forragem.

⁵ MOORE, J.E. (Animal Sciences Department, University of Florida, Gainesville, USA). Comunicação pessoal, 2002.

de outros componentes do valor nutritivo da forragem (proteína bruta, fibra em detergente neutro e fatores antinutricionais) além do teor de energia digestível (Roston e Andrade, 1992a,b; Minson e Wilson, 1994; NRC, 1996; Moore et al., 1998). Moore (1996) destacou que antes de serem utilizadas, as estimativas obtidas por qualquer método devem ser examinadas criticamente quanto à coerência dos valores em relação às características dos animais e às da pastagem. Para esse autor, o método adotado no submodelo animal é o mais apropriado para grupos de animais.

Ao uso do método de marcadores, como o óxido crômico, estão associados erros relativos às estimativas de produção fecal, devido à recuperação incompleta do marcador e à variação na sua concentração durante o dia (Moore, 1996). Às estimativas da digestibilidade, normalmente obtidas pelos métodos *in vitro* ou *in situ*, associam-se erros devido à variabilidade entre animais quanto à composição da dieta selecionada, ao nível de consumo e ao estado fisiológico dos animais (Reeves et al., 1996).

No método dos requerimentos energéticos, as estimativas de consumo são obtidas por equações gerais que não representam os animais, as condições ambientais e as forrageiras em todas as situações (Reeves et al., 1996). Espera-se, por exemplo, que o consumo por vacas gestantes e em

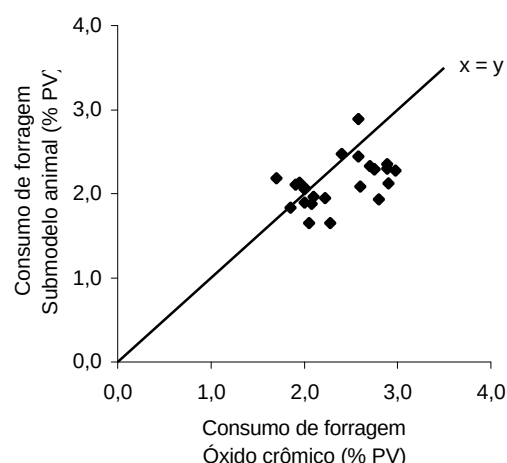


Figura 3.4. Estimativa do consumo de forragem, em porcentagem do peso dos animais em pastagens tropicais, pelo submodelo animal e pelo método de marcação com óxido crômico.

lactação seja superestimado se estes animais mobilizarem reservas corporais para o desenvolvimento do concepto ou produção de leite, ao invés de obterem toda a energia requerida da forragem consumida. Temperaturas acima da zona de conforto, comuns na região tropical, influenciam, negativamente, a capacidade de consumo e a eficiência de conversão da energia metabólica em energia líquida para ganho na forragem e, positivamente, os requerimentos de energia líquida para ganho dos animais (NRC, 1984; Moore, 1996).

Sob o ponto de vista da fertilidade do solo, de nada adianta grande exatidão das estimativas da produção vegetal, do consumo e da excreção de nutrientes por bovinos, se o padrão de distribuição das excretas não for levado em consideração, aspecto não considerado em nenhum dos modelos de reciclagem de nutrientes em pastagens revisados (Cornforth e Sinclair, 1982; Campkin, 1984; Williams et al., 1990; Thomas, 1992; Oyanarte et al., 1997). Utilizando-se a distribuição binomial negativa, a taxa de lotação acumulada durante determinado período de pastejo, expressa em animais dia ha⁻¹, é a principal variável que influencia a frequência de área de excretas e, conseqüentemente, a heterogeneidade da distribuição das fezes e urina (Figura 3.1). A taxa de lotação cumulativa é aceitável por causa do longo tempo (três meses a dois anos) em que as excretas afetam a disponibilidade de nutrientes no solo (Morton e Baird, 1990; Haynes e Williams, 1993). Com base nessa distribuição parece ser possível estimar um índice ou modulador para eficiência da reciclagem de nutrientes via fezes e urina. No entanto, para Sollenberger et al. (2002) o grau de heterogeneidade na distribuição das excretas em função da taxa de lotação deve variar principalmente com as condições ambientais, pois a temperatura e a radiação solar afetam o comportamento animal. Macoon (1999) verificou que essas duas variáveis em conjunto apresentaram-se estreitamente relacionadas ($r = 0,99$) com o tempo em que vacas holandesas em pastejo permaneceram em locais sombreados. Conseqüentemente, espera-se que quanto mais tempo sob sombra, maior a quantidade de excretas depositadas neste local (Sollenberger et al., 2002). Essa é uma linha de pesquisa essencial para o refinamento de modelos de recomendação de adubação.

4. SUBMODELO PLANTA

4.1. Introdução

No FERTICALC-Pastagem definiu-se o conteúdo dos nutrientes como a quantidade de nutrientes nas plantas associada a uma determinada produtividade e a demanda nutricional foi definida como a quantidade dos nutrientes que o solo deve ter para permitir um acúmulo de nutrientes nas plantas equivalente ao conteúdo nutricional.

A demanda nutricional é, pois, dependente de características da planta, da produtividade, do manejo da pastagem e do solo. A espécie forrageira influi na demanda dos nutrientes por meio do conteúdo nutricional, da remobilização dos nutrientes nas plantas não consumidas pelos animais (Aerts, 1996) e da eficiência de aquisição de nutrientes pela planta (Rao et al., 1999), que reflete na eficiência de recuperação dos nutrientes do solo. O manejo da pastagem influencia a demanda nutricional na medida que determina a eficiência de utilização da forragem produzida. É essa variável que modula, no submodelo planta, a produção e a quantidade dos nutrientes remobilizados nas plantas.

Os equilíbrios entre o solo e os nutrientes a este adicionados influenciam a disponibilidade dos nutrientes para as plantas (Bray, 1954) e o conteúdo nutricional das plantas (Novais e Smyth, 1999). Segundo esses autores, para uma mesma produtividade, os conteúdos de P, S e Zn apresentam relação inversa com o fator capacidade de fósforo (FCP), ou seja,

as plantas apresentam maior eficiência de utilização¹ desses nutrientes em solos com maior FCP. A mobilidade dos nutrientes no solo é, por sua vez, uma das variáveis mais importantes para o entendimento da fertilidade do solo (Bray, 1954). Segundo esse autor, com a diminuição da mobilidade dos nutrientes há um aumento progressivo nas demandas em relação aos conteúdos, de modo que as demandas tendem a valores elevados e independentes da produtividade. Assim, elementos pouco móveis, como o P, apresentam demandas bem maiores do que os conteúdos e tendem para valores constantes, ao passo que elementos bastante móveis como o N apresentam demanda e conteúdo mais próximos (Bray, 1954).

A estimativa do conteúdo nutricional depende das estimativas da produção primária líquida e dos teores dos nutrientes nesta biomassa. A produção primária líquida do pasto é constituída pela biomassa da parte aérea consumida pelos animais em pastejo, pela biomassa de parte aérea não consumida, que senesce e é depositada no solo como resíduo vegetal, e pela biomassa de raízes (Lemaire e Chapman, 1996; Rezende et al., 1999).

No submodelo planta são estimados: a concentração de nutrientes digestíveis totais na forragem (NDT); a produção de matéria seca de parte aérea e de raízes para suprir determinado consumo animal; e o conteúdo e a demanda de macronutrientes.

4.2. Concentração de nutrientes digestíveis totais na forragem

Para que se possa determinar o consumo de forragem no submodelo animal é essencial uma estimativa da quantidade de energia disponível na forragem, expressa como nutrientes digestíveis totais (NDT, em dag kg^{-1} de MS).

Os valores tabulados de NDT não são apropriados para todos os casos, devido à variabilidade das forragens e dos animais utilizados para sua determinação (Moore et al., 1998). Valores inadequados de NDT são importante fonte de erro na estimativa do consumo animal (Figura 3.1). A alternativa é utilizar equações de predição para estimar o NDT a partir de

¹ A eficiência de utilização do nutriente *i* é definida como a relação entre a quantidade de matéria seca produzida e a quantidade do nutriente *i* acumulado na planta.

componentes do valor nutritivo da forragem. A avaliação dessas regressões demonstra, no entanto, que a maioria delas não é estatisticamente aceitável e, em geral, são muito específicas para cada forragem ou grupo de forragens (Moore et al., 1998).

Moore e Undersander (2002) consideraram que o caminho mais promissor para estimar o NDT em forragens é a utilização de equações somatórias, que se constituem na soma das estimativas da digestibilidade dos componentes do valor nutritivo. Neste sentido, Moore² sugeriu três equações somatórias baseadas na digestão *in vitro* da MS e da fibra em detergente neutro³ (FDN), que foram validadas para 40 fenos de gramíneas de regiões temperadas e tropicais do sudeste dos Estados Unidos. O autor ressaltou, entretanto, que é necessário avaliá-las ou reparametrizá-las para gramíneas cultivadas no Brasil, principalmente com dados de digestibilidade *in vitro* menores que 55 %. Para o submodelo planta decidiu-se pela equação mais simples:

$$NDT = 0,95 (20,1 + 0,63 \text{ DIVMS}) \quad (4.1)$$

em que, DIVMS é a digestibilidade *in vitro* da MS (%).

Essa equação converte, pelo termo entre parênteses, a DIVMS em matéria seca digestível (dMSp) e, então, estima o NDT por meio da constante 0,95 obtida da equação de regressão entre valores de NDT determinados *in vivo* e de matéria seca digestível *in vivo* ($b_0 = 0$; $R^2 = 0,96$). Os valores de NDT estimados dessa forma foram comparados com valores determinados *in vivo*. Segundo Moore, as médias dos valores de NDT estimados pela equação 4.1 e *in vivo* foram de $53,9 \pm 4,9$ e de $53,9 \pm 5,2$, respectivamente. A equação de regressão entre NDT estimado e NDT *in vivo* apresentou $b_0 = 0$; $b_1 = 1$ e $R^2 = 0,70$.

² MOORE, J.E. (Department of Animal Sciences, University of Florida, Gainesville, USA). Comunicação pessoal, 2002.

Todas as equações sugeridas estão nos apêndices.

³ A fração fibra em detergente neutro é obtida após extração do conteúdo celular com uma solução detergente neutro e é constituída, basicamente, por celulose, hemicelulose e lignina (van Soest et al., 1991).

4.3. Produção de matéria seca do pasto

O ponto inicial para o desenvolvimento do submodelo planta foi a estimativa da quantidade de forragem consumida por animais em pastejo (Equação 3.15), durante a estação de crescimento das plantas, necessária para obtenção de determinado desempenho animal. Assim, definiu-se a produção anual de forragem como a quantidade de matéria seca (MS) capaz de permitir aos animais um consumo de forragem, estimado pelo submodelo animal, compatível com a espécie forrageira e o sistema de manejo.

As gramíneas forrageiras mais cultivadas no Brasil são as espécies *Brachiaria humidicola*, *B. decumbens*, *B. brizantha* cv. Maradu e *Panicum maximum* (Macedo, 1995; Pereira et al., 1995; Simão Neto & Dias Filho, 1995), que na região dos cerrados ocupam cerca de 93 % da área de pastagens cultivadas (Macedo, 1995).

Essas espécies possuem produtividades elevadas e equivalentes, dependendo das condições ambientais, principalmente da fertilidade do solo. Os cultivares Colônia, Tanzânia e Mombaça de *P. maximum* podem ser, no entanto, considerados mais produtivos, sendo comuns produtividades anuais entre 25 e 50 t ha⁻¹ de MS (Jank et al., 1994; Jank, 1995), ao passo que para *Brachiaria* sp. reportam-se produtividades entre 1 e 36 t ha⁻¹ (Leite e Euclides, 1994).

A quantidade de matéria seca por hectare acima do nível do solo ou de uma altura de referência (FGTC, 1992), não pode ser utilizada por si só para definir o potencial produtivo de um sistema pastoril e as estratégias de manejo, incluindo a adubação. Sob pastejo, a intensidade e a frequência de desfolha são diferentes, além de não ser possível simular com exatidão os efeitos do pastejo seletivo e do pisoteio sobre a produção das plantas (Euclides e Euclides Filho, 1998).

Outro aspecto tão importante quanto a quantidade de forragem é a sua qualidade. A qualidade da forragem é definida como sinônimo de produção animal (ganho de peso ou produção de leite diários) quando: (i) o potencial do animal não limita a produção; (ii) a disponibilidade de forragem não é limitante (consumo *ad libitum*), e (iii) a forragem é a única fonte de energia e proteína para os animais. Assim, a qualidade da forragem é definida pela produção por

animal e os fatores que a afetam incluem seu valor nutritivo⁴ e o consumo animal (Mott, 1959). Nesse sentido, como a produtividade e a qualidade dos cultivares de *P. maximum* são superiores a das gramíneas do gênero *Brachiaria* (Euclides et al., 1993a,b; Euclides, 1995; Lascano e Euclides, 1996; Euclides et al., 1999, 2000), espera-se maior retorno por unidade de adubo aplicado em pastagens de *P. maximum*. Dentre as espécies de *Brachiaria*, destaca-se *B. brizantha* cv. Marandu por maior qualidade e produtividade, especialmente quando adubada (Leite e Euclides, 1994).

Essas considerações levaram à classificação dessas gramíneas quanto à adaptação a sistemas de alta, média e baixa tecnologia de exploração (Quadro 4.1), relacionando a combinação do potencial produtivo e a qualidade da forrageira com o potencial produtivo do sistema pastoril. Vale ressaltar que a obtenção de alta produção animal com viabilidade econômica não está relacionada apenas com a espécie forrageira e a qualidade do animal. Tão importante quanto isso é a organização da propriedade para manter a oferta de alimentos durante todo o ano (Euclides, 2000).

Essa classificação também é importante para definir a eficiência de utilização da forragem (U_{t_f}) no submodelo planta, por haver relação entre a U_{t_f} e o manejo da pastagem (Lemaire e Chapman, 1996; Lemaire e Agnusdei, 2000) e por se pressupor haver relação positiva entre o nível tecnológico do sistema e o manejo da pastagem. A eficiência de utilização da forragem em sistemas sob pastejo pode ser definida como a proporção de tecidos foliares produzidos que são removidos pelo animal antes de entrarem em senescência (Lemaire e Chapman, 1996). A restrição às folhas deve-se ao consumo preferencial ($\pm 90\%$ da dieta) desse órgão pelos animais em pastejo, mesmo durante o período de menor crescimento da forrageira (Ruiz et al., 1981; Euclides et al., 1992, 1999, 2000; Brâncio, 2000).

A eficiência de utilização da forragem pode ser estimada por meio de variáveis morfo-genéticas das forrageiras (duração de vida das folhas) e da intensidade e da frequência do pastejo (Lemaire e Chapman, 1996; Lemaire e Agnusdei, 2000). A intensidade de desfolha, obtida pela razão entre o

⁴ O valor nutritivo da forragem é a composição química, a digestibilidade e a natureza dos produtos da sua digestão (Sollenberger e Cherney, 1995).

Quadro 4.1. Agrupamento de gramíneas quanto à adaptação a sistemas de exploração de diferentes níveis tecnológicos e ao ganho de peso diário (GPD) de animais em pastejo

Nível tecnológico	Gramínea	GPD kg
Intensivo	<i>Panicum maximum</i> cv. Colonião; Tobiatã; Tanzânia; Mombaça; <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu.	0,40 - 0,90
Médio	<i>Panicum maximum</i> cv. Colonião; Tobiatã; Tanzânia; Mombaça; <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu; <i>Brachiaria decumbens</i>	0,30 - 0,70
Extensivo	<i>Brachiaria decumbens</i> ; <i>Brachiaria humidicola</i>	0,20 - 0,55

comprimento foliar após e antes um evento de desfolha (pastejo), é considerada relativamente constante (0,50-0,55). Por outro lado, a frequência de desfolha, ou seja, o intervalo médio entre dois eventos de desfolha, é diretamente proporcional à taxa de lotação em sistemas de lotação contínua.

Assim, considerando a intensidade de desfolha constante e a duração da vida das folhas de cada espécie, a eficiência de utilização da forragem é função da frequência de pastejo e, conseqüentemente, da taxa de lotação desde que se objetive, por meio do manejo, a manutenção de um índice de área foliar, biomassa, ou altura que assegure a recuperação da área fotossintética (Lemaire e Chapman, 1996; Lemaire e Agnusdei, 2000). Ressalta-se, entretanto, que a eficiência de utilização da forragem deve ser considerada visando atingir não apenas a maximização da relação forragem consumida/forragem produzida a curto prazo, mas também a manutenção do recurso forrageiro a longo prazo (Lemaire e Agnusdei, 2000).

Por esse raciocínio, se a produção de forragem aumenta em função de qualquer fator de produção, por exemplo, adubação ou irrigação, deve-se aumentar a taxa de lotação para manter determinada biomassa disponível e, desta forma, maior proporção de tecido foliar é removido (Lemaire e Agnusdei, 2000). Esse autores relataram, para pastagens de clima temperado manejadas com diversas taxas de lotação e níveis de adubação nitrogenada, valores de eficiência de utilização da forragem de 28 a 80 %. Segundo Thomas (1992), para pastagens de clima tropical extensivamente manejadas, a eficiência de

utilização da forragem varia, geralmente, entre 10 e 40 %. Corroborando com esses valores, estimaram-se valores de eficiência de utilização da forragem de 13 a 28 % em pastagens de *B. humidicola* manejadas com lotação contínua (2, 3 e 4 animal ha⁻¹) a partir da produção primária líquida e do consumo animal (Rezende et al., 1999).

Os menores valores de eficiência de utilização da forragem em pastagens tropicais extensivamente manejadas com lotação contínua são creditados à baixa lotação e, conseqüentemente, à menor freqüência de desfolha (Lemaire e Agnusdei, 2000). Segundo esses autores, a freqüência de desfolha apresenta elevada variabilidade no pasto, a qual tende a aumentar com o decréscimo da taxa de lotação. Nessas circunstâncias, há locais pastejados freqüentemente e, conseqüentemente, com perfilhos de baixa produtividade, alternados com áreas menos pastejadas (ou evitadas), onde a maior produção de forragem está associada com colheita ineficiente e maior senescência foliar, o que aumenta a heterogeneidade do pasto.

Entretanto, em sistemas de pastejo com lotação intermitente (rotativa) é possível evitar o aumento da heterogeneidade espacial do pastejo, pois o intervalo de desfolha independe da taxa de lotação. Nesse caso, a freqüência de pastejo é determinada pelo período de descanso da pastagem. Assim, sistemas extensivos com baixa produção de forragem e baixa lotação tendem a ter menor eficiência de utilização da forragem se utilizado o sistema de lotação contínua em relação ao de lotação intermitente. Com a intensificação da produção forrageira, a tendência é se elevar a eficiência de utilização da forragem para valores semelhantes tanto em sistemas de lotação contínua quanto intermitente (Lemaire e Agnusdei, 2000).

Com base nessas considerações, no submodelo planta, estabeleceram-se valores empíricos para eficiência de utilização da forragem (U_t) em função da intensidade de exploração e do manejo geralmente adotados:

- Extensivo/lotação contínua: 10 – 25 % (17 %);
- Médio/ lotação contínua: 20 – 40 % (30 %);
- Médio/ lotação rotativa: 35 – 55 % (45 %);
- Intensivo/ lotação contínua ou rotativa: 50 – 80 % (65 %);

em que os valores entre parênteses são médias sugeridas como padrão.

4.3.1. Produção de matéria seca de parte aérea

O submodelo planta estima valores de produção anual de matéria seca de parte aérea ($M_{pa\ pl}$, kg ha⁻¹ de MS) para as fases de estabelecimento e de utilização da pastagem.

O ponto de partida para essa estimativa é o consumo de forragem por unidade de área, obtida no submodelo animal (C_{ha} , em kg ha⁻¹ de MS; equação 3.15), para satisfazer metas de produção por animal e por área compatíveis com o sistema de exploração (Quadro 4.1).

Para o ano de estabelecimento da pastagem, sugere-se estimar o consumo de forragem durante três meses, o que se deve à pressuposição de uma estação de crescimento das plantas de 180 dias e uma fase de estabelecimento, do plantio ou semeadura até o primeiro pastejo, de aproximadamente 90 dias (Yost et al., 1982; Zimmer et al., 1994; Vieira e Kichel, 1995). Esses valores são variáveis, mas podem ser ajustados, pois é possível estimar o consumo para qualquer período de utilização da pastagem (Equação 3.15). Espera-se, por exemplo, que o estabelecimento de *B. humidicola* seja mais lento, por ser uma característica desta espécie e por ser recomendada para sistemas de produção extensivos. Mesmo seguindo recomendações técnicas para a semeadura, Zimmer et al. (1994) verificaram que o estabelecimento de *B. humidicola* foi lento, só alcançando condições de pastejo no início do segundo ano. Na fase de utilização da pastagem, o consumo deve ser estimado para toda estação de crescimento das plantas.

Em seguida, com base na eficiência de utilização da forragem (U_{tr}) compatível com o sistema produtivo estima-se a produção de MS de parte aérea durante a estação de crescimento das plantas ($M_{pa\ pl\ v}$, em kg ha⁻¹).

Para o ano de estabelecimento tem-se que:

$$M_{pa\ pl\ v} = M_{pa\ pl\ est} + \left[C_{ha} / \left(\frac{U_{tr}}{100} \right) \right] \quad (4.2)$$

em que $M_{pa\ pl\ est}$ (kg ha⁻¹) é a produção de MS de parte aérea durante a fase de estabelecimento. Essa produção deve variar entre 2.500 e 5.000 kg ha⁻¹ para todas as gramíneas, sendo o tempo de estabelecimento o diferencial entre

espécies e sistemas de produção. Zimmer et al. (1994) consideraram produtividades de 3.000 a 3.500 kg ha⁻¹ de MS, aos 90 dias após a semeadura, condizentes com um bom estabelecimento de *B. decumbens*, valores esses, semelhantes aos adotados em experimentos de pastejo para manutenção de boa oferta de forragem de *Brachiaria* sp. (3.000 a 3.500 kg ha⁻¹) e de *Panicum maximum* (2.500 a 3.000 kg ha⁻¹) (Euclides et al., 1997, 1999, 2000).

Para a fase de utilização da pastagem, a produção de MS durante a estação de crescimento das plantas ($M_{pa\ pl\ v}$) é dada por:

$$M_{pa\ pl\ v} = C_{ha} / \left(\frac{U_{t_f}}{100} \right) \quad (4.3)$$

Vale ressaltar que os limites superiores de produção por animal (Quadro 4.1) devem estar associados a menores valores de eficiência de utilização da forragem (U_{t_f}) dentro da faixa proposta para cada sistema de exploração e de manejo. O que se deseja simular é o maior desempenho animal associado à maior disponibilidade de forragem e, conseqüentemente, à maior capacidade dos animais em selecionar forragem de melhor qualidade.

A produção anual de MS de parte aérea ($M_{pa\ pl}$) é obtida a partir da produção durante a estação de crescimento das plantas ($M_{pa\ pl\ v}$) corrigida por um modificador de estacionalidade da produção forrageira (j_{est}), assim:

$$M_{pa\ pl} = M_{pa\ pl\ v} / (1 - j_{est}) \quad (4.4)$$

Para as gramíneas forrageiras sugeridas no submodelo animal o valor de j_{est} varia de 0,10 a 0,35; que representam a porcentagem da produção que ocorre durante a estação de menor crescimento forrageiro (Valle e Miles, 1994; Jank et al., 1994; Jank, 1995; Fisher e Kerridge, 1996). Para pastagens não adubadas e adubadas sugerem-se, respectivamente, valores de 0,10 e 0,20 para *B. humidicola* e de 0,15 e 0,25 para *B. decumbens*. No caso de *B. brizantha* e de *P. maximum*, sugerem-se valores de 0,10; 0,25 e 0,35 para pastagens não adubadas, adubadas e adubadas e irrigadas.

4.3.2. Produção de raízes

No submodelo planta, a produção de raízes e o conteúdo nutricional para formação do sistema radicular foram considerados apenas para o ano de estabelecimento da pastagem. Essa decisão deveu-se às poucas informações encontradas sobre a produção de raízes em pastagens de regiões tropicais, além de serem, na maioria das vezes, desvinculadas de informações sobre a produção da parte aérea (Gama R. e Cadima Z., 1991; Rao, 1998; Kanno et al., 1999a,b), o que dificultou a estimativa de relações alométricas.

Com base no trabalho de Rao (1998) pôde-se inferir que, no ano de estabelecimento de pastagem de *B. dictyoneura* manejada extensivamente, a produção anual de parte aérea e a de raízes foram, aproximadamente, iguais. Após o ano de estabelecimento a produção de parte aérea foi maior do que a de raízes, com diminuição progressiva da relação raiz/parte aérea até o estabelecimento de um equilíbrio cujo valor foi, aproximadamente, igual a 0,40. Em pastagens de *B. decumbens*, *B. brizantha*, *P. maximum* cv. Tanzânia estabelecidas e sob pastejo, Kanno et al. (1999b) verificaram que a biomassa de raízes até 40 cm de profundidade representou de 55 a 76 % da biomassa do pasto (2.500 a 3.500 kg ha⁻¹ de MS) necessária para manutenção boa oferta de forragem. Apesar daqueles autores considerarem que essa proporção tende aumentar com maiores profundidades de amostragem do sistema radicular, a relação raiz/parte aérea deve ser menor quando se considera a produção de parte aérea e não apenas a disponibilidade momentânea do pasto. Em outra pesquisa, Kanno et al. (1999a) verificaram que a relação raiz/parte aérea de *B. decumbens* e *B. brizantha* cultivadas em vasos foi, em média, de 0,32.

Desta forma, pressupôs-se que na fase de utilização da pastagem a reciclagem de nutrientes durante os processos de senescência e decomposição de raízes sejam suficientes para suprir o conteúdo nutricional da nova biomassa formada, ou seja, uma vez formado um sistema radicular a reciclagem dos nutrientes seria suficiente para mantê-lo.

A biomassa de raízes ($M_{rz\ pl}$, em kg ha⁻¹ de MS) produzidas durante o ano de estabelecimento da pastagem é estimada por:

$$M_{rz\ pl} = j_{rz} M_{pa\ pl} \quad (4.5)$$

em que, ϕ_{rz} é um modificador alométrico para o qual propõem-se valores de 0,75, 0,625 e 0,50 para pastagens sob sistema de exploração extensivo, médio e intensivo, respectivamente. Em geral, espera-se que em sistemas menos intensivos com menor disponibilidade de nutrientes no solo, as plantas aumentem a proporção do sistema radicular em relação à biomassa total (Rao et al., 1999; Rao, 2001; Dawson et al., 2000).

4.3.3. Produção de resíduos vegetais

A produção anual de resíduos vegetais ($M_{r\ pl}$, em kg ha^{-1} de MS) é estimada considerando que em pastagens a biomassa de parte aérea pode ser dividida em biomassa consumida e não consumida que senesce e é depositada no solo (Lemaire e Chapman, 1996; Rezende et al., 1999). Assim, considerando que a eficiência de utilização da forragem (Ut_f) adotada para a estação de crescimento é válida para todo o ano, a $M_{r\ pl}$ é dada por:

$$M_{r\ pl} = \left(1 - \frac{Ut_f}{100}\right) M_{pa\ pl} \quad (4.6)$$

4.4. Conteúdo de nutrientes

O conteúdo nutricional é a quantidade de nutrientes acumulada pelas plantas durante seu ciclo de vida e é estimada a partir da biomassa e dos teores de cada nutriente. Para estimar o conteúdo de nutrientes para o ano de estabelecimento da pastagem considerou-se não apenas a produção anual de MS de parte aérea ($M_{pa\ pl}$) mas também a do sistema radicular ($M_{rz\ pl}$). Assim:

$$CN_{i\ pl} = (M_{pa\ pl} T_{i\ pl} / 100) + (M_{rz\ pl} T_{i\ rz} / 100) \quad (4.7)$$

em que $CN_{i\ pl}$ é o conteúdo do nutriente i (kg ha^{-1}), $T_{i\ pl}$ e $T_{i\ rz}$ são os teores do elemento i (dag kg^{-1}) na forragem e nas raízes, respectivamente.

Apenas a produção de parte aérea é considerada no cálculo do conteúdo para a fase de utilização:

$$CN_{i\ pl} = (M_{pa\ pl} \ T_{i\ pl} / 100) \quad (4.8)$$

Disto resulta que a exatidão na estimativa do conteúdo nutricional depende, diretamente, da utilização de teores que sejam compatíveis com a produtividade. No entanto, o teor é influenciado pelo genótipo, idade, órgão e produtividade da planta, condições ambientais, disponibilidade de água e nutrientes, entre outros (Jarrell e Beverly, 1981; Black, 1993; Marschner, 1995), o que se reflete na variabilidade dos valores observados (Quadro 4.2 e Figura 4.1).

Para o submodelo planta, buscaram-se, na literatura, dados de teores de nutrientes na parte aérea das plantas cortada entre 0 e 20 cm do solo e com intervalos de 30 a 45 dias durante a estação de crescimento, numa tentativa de diminuir a variabilidade dos valores. Ao relacioná-los com a produtividade, verificou-se que não houve estreita correlação devido à variabilidade dos dados, conforme ilustrado para N e P e duas forrageiras (Figura 4.1). Isso pode ser atribuído, em parte, às expressivas respostas das gramíneas à adição de nutrientes, especialmente N e P (Whitehead, 2000), e à multiplicidade de fatores e interações que afetam o acúmulo de MS e de nutrientes nas plantas (Jarrell e Beverly, 1981). Rao et al. (1995) verificaram que o aumento da fertilidade do solo não resultou em aumento dos teores de P, N e Ca em sete gramíneas de clima tropical.

Para Tinker e Nye (2000), não se espera aumento de teores dos nutrientes nas plantas quando o aumento no suprimento dos nutrientes e, em última análise, na taxa de absorção destes é acompanhado de aumento proporcional na taxa de crescimento. A taxa de crescimento de uma cultura é máxima quando os teores dos nutrientes nas plantas estão dentro da faixa de suficiência, que tem como limite inferior o nível crítico (Marschner, 1995; Gastal e Durand, 2000).

Diante dessas observações, adotaram-se teores médios (Quadro 4.2) apesar da ampla faixa de produtividade, mesmo considerando que desta forma

Quadro 4.2. Produção de matéria seca e teores médios de nutrientes na parte aérea de gramíneas forrageiras utilizadas pelo submodelo planta

Produção	Teores					
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
kg ha ⁻¹	dag kg ⁻¹					
	Brachiaria humidicola					
7.336 (3.538)	1,24 (0,28)	0,18 (0,06)	0,94 (0,28)	0,27 (0,15)	0,17 (0,04)	0,14 (0,01)
	Brachiaria decumbens					
11.458 (4.886)	1,43 (0,32)	0,18 (0,05)	0,97 (0,19)	0,38 (0,12)	0,35 (0,12)	0,18 (0,03)
	Brachiaria brizantha					
14.927 (8.545)	1,49 (0,28)	0,16 (0,02)	1,36 (0,40)	0,35 (0,16)	0,30 (0,06)	0,15 (0,02)
	Panicum maximum					
17.392 (11.498)	1,48 (0,35)	0,21 (0,05)	1,58 (0,53)	0,56 (0,19)	0,34 (0,11)	0,16 (0,03)

Valores entre parênteses são os desvios-padrão para os dados.

Fonte: Vicente-Chandler et al., 1959; Abruña et al., 1964; Gerardo e Oliva, 1979a,b; CIAT, 1980, 1981; CEPEC, 1982; CIAT, 1982; Gerardo et al., 1982; Costa et al., 1983; Gomide et al., 1984; Hernández e Hernández, 1984; Alvim et al., 1986; Oquendo e Gerardo, 1986; Pérez e Acosta, 1986; Monteiro e Carriel, 1987; Ayarza, 1988; Carrer et al., 1988; Guss, 1988; Alvim et al., 1990; Botrel et al., 1990; Andrade et al., 1991; Carvalho et al., 1991; Machado e Núñez, 1991; Carvalho et al., 1992; Souza Filho et al., 1992; Corrêa e Haag, 1993a,b; Costa e Oliveira, 1994; Faquin et al., 1994; Ferrari Jr. et al., 1994; Jank et al., 1994; Lira et al., 1994; Pastrana, 1994; Paulino et al., 1994; Carriel et al., 1995; Couto et al., 1995; Faquin et al., 1995; Hoffmann et al., 1995; Faquin et al., 1997a,b; Couto et al., 1999; Santos et al., 1999; Costa et al., 2000a,b; Guedes et al., 2000; Kanno et al., 2000; Costa et al., 2001; Luz et al., 2002; Paulino et al., 2002; Pinto et al., 2002a,b.

algumas estimativas do conteúdo podem ser sub ou superestimadas. Se o teor médio for menor do que o nível crítico o conteúdo do nutriente para sistemas de alta produtividade será subestimada; por outro lado, se for igual ou maior do que o nível crítico, o conteúdo para sistemas menos produtivos será superestimada. Esse problema poderia ser contornado com a utilização de modelos mecanísticos para estimar a taxa de crescimento e a de absorção, e conseqüentemente, o conteúdo nutricional (Tinker e Nye, 2000). Esses autores ressaltaram, no entanto, que isso não é tão simples devido a falta de modelos que simulem eficientemente a regulação imposta pelo estado nutricional das plantas ao crescimento e à absorção de nutrientes.

No caso específico do P, os teores sugeridos neste submodelo (Quadro 4.2) parecem elevados quando se considera a fase de utilização da pastagem (CIAT, 1982; Macedo et al., 1993; Malavolta et al., 1997; Santos et al., 2002). Santos et al. (2002) verificaram que os níveis críticos de P na parte aérea das plantas aos 30 dias de rebrota foram 40 a 50 % menores do que aos

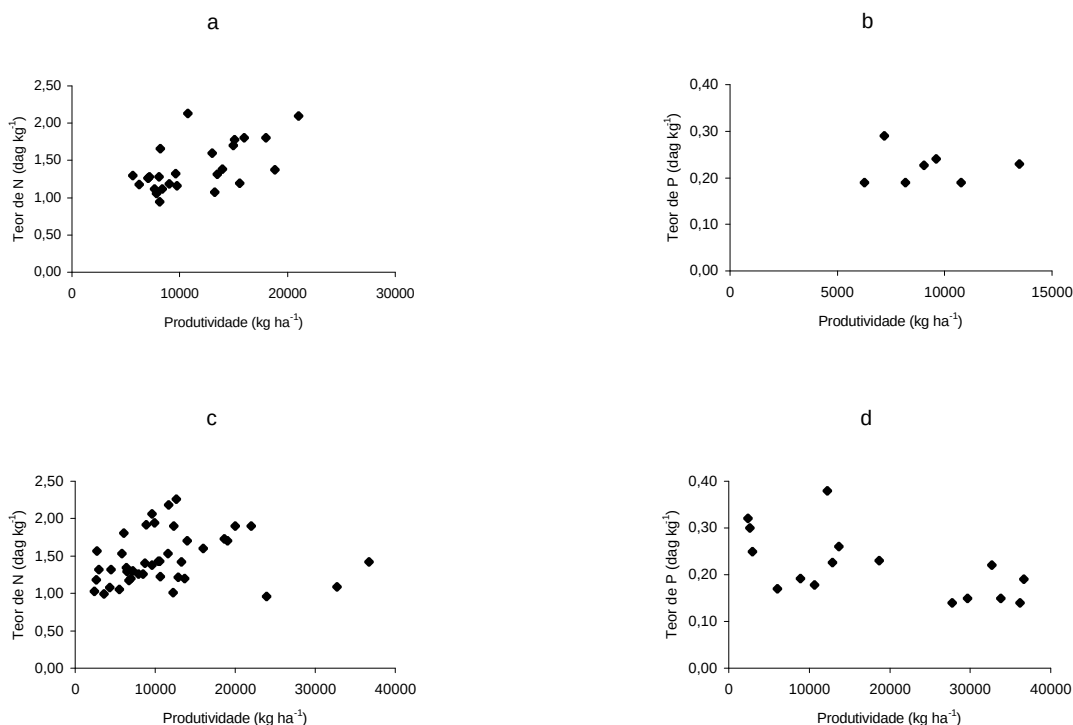


Figura 4.1. Dispersão dos teores de nitrogênio e fósforo na parte aérea de plantas de *Brachiaria decumbens* (a, b) e *Panicum maximum* (c, d) em função da produtividade.

Fonte: Vicente-Chandler et al., 1959; Abruña et al., 1964; Gerardo e Oliva, 1979a,b; CIAT, 1980, 1981; CEPEC, 1982; CIAT, 1982; Gerardo et al., 1982; Gomide et al., 1984; Hernández e Hernández, 1984; Oquendo e Gerardo, 1986; Pérez e Acosta, 1986; Carrer et al., 1988; Alvim et al., 1990; Botrel et al., 1990; Andrade et al., 1991; Carvalho et al., 1991; Machado e Núñez, 1991; Ferrari Jr. et al., 1994; Costa et al., 2000; Guedes et al., 2000.

30 dias após a emergência das plantas. Semelhantemente, Macedo et al. (1993) observaram diminuição progressiva dos teores de P com a idade das plantas de *B. decumbens* e *B. brizantha* cv. Marandu e três cultivares de *P. maximum*. Os teores de P nas braquiárias foram sempre menores do que 0,145 dag kg⁻¹. Nos cultivares de *P. maximum* o teor de P foi de 0,183 dag kg⁻¹ após o estabelecimento, mas após três anos esse valor diminuiu progressivamente até 0,093 dag kg⁻¹. Desta forma, para a fase de utilização da pastagem, os teores de P foram estabelecidos como a diferença entre a média e o desvio padrão apresentado para cada espécie (Quadro 4.2).

As informações sobre teores de nutrientes em raízes de gramíneas tropicais são escassas. Os nutrientes apresentam diferentes concentrações

nas raízes e na parte aérea, o que, segundo Whitehead (2000), depende da função do nutriente, da sua susceptibilidade em ser retido nos tecidos radiculares, da sua disponibilidade no solo, da idade das raízes, entre outros. Em gramíneas, esperam-se maiores teores de N, P e S na parte aérea. Para os macronutrientes catiônicos a tendência é a mesma, porém menos consistente (Whitehead, 2000). Em revisão sobre gramíneas de regiões temperadas, esse autor considerou que o teor de N nas raízes é, em geral, 50 % menor do que o da parte aérea. Para o S, a diferença foi de 70 %, com teores entre 0,13 a 0,22 dag kg⁻¹. Os teores de K nas raízes foram de 50 a 80 % menores e os de Ca e Mg foram iguais ou menores (35 a 50 %) aos da parte aérea.

Em *B. decumbens* e *Andropogon gayanus*, Urquiaga et al. (1998) relataram teores radiculares de 0,33 e 0,61 dag kg⁻¹ de N, respectivamente. Em raízes de *B. decumbens* e *B. brizantha* cv. Marandu, os teores de P variaram entre 0,03 a 0,06 dag kg⁻¹ (Kanno et al., 1999a). Teores de N e P de 0,37 e 0,03 dag kg⁻¹ foram observados em raízes de *B. humidicola* (Gijsman et al., 1997). Rao (1998) determinou teores de nutrientes (dag kg⁻¹) bastante baixos em raízes de *B. dictyoneura*: N, 0,20; P, 0,02; K, 0,15 K; Ca, 0,07; Mg, 0,04 Mg; S, 0,08.

No presente submodelo, estimam-se os teores dos nutrientes nas raízes ($T_{i\text{ rz}}$, dag kg⁻¹) por:

$$T_{i\text{ rz}} = T_{i\text{ pl}} j_{i\text{ rz}} \quad (4.9)$$

em que $\phi_{i\text{ rz}}$ é um modificador de proporcionalidade entre o teor do nutriente i na parte aérea ($T_{i\text{ pl}}$) e nas raízes. Estabeleceram-se valores de $\phi_{N\text{ rz}} = 0,50$; $\phi_{P\text{ rz}} = 0,25$; $\phi_{K\text{ rz}} = 0,35$; $\phi_{Ca\text{ rz}} = 0,30$; $\phi_{Mg\text{ rz}} = 0,30$; e $\phi_{S\text{ rz}} = 0,50$. Destaca-se, no entanto, que os valores de $\phi_{i\text{ rz}}$ e do modificador alométrico (Equação 4.5.) são uma primeira aproximação, o que ressalta a importância de pesquisas para avaliação da produção, composição química e reciclagem de raízes em pastagens de regiões tropicais.

4.5. Demanda de nutrientes

Definida como a quantidade de nutrientes que o solo deve ter para permitir o acúmulo de nutrientes nas plantas equivalente ao conteúdo nutricional, a demanda de nutrientes depende de características da espécie, do manejo da cultura, do solo e do nutriente. A demanda tem sido estimada por meio da correção do conteúdo nutricional da planta ($CN_{i\ pl}$) pelo modificador denominado “taxa de recuperação pela planta do nutriente aplicado” (Novais e Smyth, 1999; Freire, 2001; Santos, 2002; Oliveira, 2002). A diferença entre o conteúdo e a demanda deve-se às perdas de parte dos nutrientes adicionados ao solo por lixiviação, volatilização e, ou, adsorção e à eficiência de aquisição dos nutrientes pela planta.

Para a estimativa da demanda do elemento i ($\delta_{i\ pl}$, em kg ha^{-1}) no submodelo planta, consideraram-se a eficiência de recuperação ($\phi_{i\ rec}$) e a quantidade do nutriente i remobilizada na planta ($?_{i\ pl}$, em kg ha^{-1}). Assim:

$$d_{i\ pl} = \frac{(CN_{i\ pl} - ?_{i\ pl})}{j_{i\ rec}} \quad (4.10)$$

4.5.1. Eficiência de recuperação pela planta dos nutrientes no solo

A eficiência de recuperação pelas plantas dos nutrientes aplicados ao solo ($f_{i\ rec}$) é definida como a quantidade de nutriente absorvido por unidade de nutriente aplicado, sendo estimada pela equação (Baligar e Fageria, 1997):

$$j_{i\ rec} = \frac{\left(\text{Quantidade de nutriente absorvido pela planta na parcela fertilizada} \right) - \left(\text{Quantidade de nutriente absorvido pela planta na parcela não-fertilizada} \right)}{\left(\text{Quantidade de nutriente aplicado} \right)} \quad (4.11)$$

Essa equação baseia-se na pressuposição de que a diferença de conteúdo de nutrientes entre plantas adubadas e não adubadas deve-se, exclusivamente, à adição de nutrientes via fertilizantes. Essa pressuposição, no entanto, não é exata, mas permite uma estimativa aproximada, daí ser denominada recuperação aparente (Baligar e Fageria, 1997; Martha Jr., 1999).

Com a adubação espera-se, de fato, maior recuperação de nutrientes do solo ou valores superestimados de eficiência de recuperação (Santos, 2002). Isso se deve ao maior crescimento radicular decorrente do aumento da disponibilidade de nutrientes, principalmente, N, P e Ca (Marschner, 1995), ao aumento da mineralização de nutrientes em compostos orgânicos e da biomassa microbiana do solo, e à modificação dos equilíbrios químicos entre os nutrientes e o solo.

Santos (2002) destacou que a eficiência de recuperação sofre influência de fatores edáficos, climáticos e relativos à planta e ao manejo. Dos fatores edáficos destacam-se: a relação inversa entre o fator capacidade e a recuperação de P, S e Zn e a mobilidade e a concentração dos nutrientes na solução do solo que se relacionam ao suprimento dos nutrientes para as raízes (Bray, 1954; Barber, 1995; Novais e Smyth, 1999). Segundo Bray (1954), com a diminuição da mobilidade dos nutrientes há um aumento progressivo na demanda em relação ao conteúdo nutricional, ou seja, a eficiência de recuperação diminui.

As gramíneas forrageiras são consideradas plantas bem adaptadas aos solos tropicais, ou seja, eficientes na recuperação dos nutrientes do solo ou aplicados via fertilizantes (Rao et al., 1995). Dos fatores relativos à planta, ressalta-se a menor eficiência de aquisição dos nutrientes durante a fase de estabelecimento, especialmente daqueles pouco móveis como o P (Santos et al., 2002). Existem, evidentemente, diferenças inter e intraespecíficas quanto à eficiência de recuperação. Espera-se, por exemplo, maior eficiência de recuperação do P ($f_{P\text{ rec}}$) por *B. humidicola* e *B. decumbens* do que por *B. brizantha* e *P. maximum*, o que se relaciona às características morfológicas e fisiológicas do sistema radicular dessas plantas (Rao et al., 1995; Kanno et al., 1999a; Rao et al., 1999).

Quanto aos fatores relativos ao manejo, sobressaem-se o método de aplicação e as fontes dos nutrientes, especialmente as de N (sulfato de amônio ou uréia) e de P (fontes solúveis, fosfatos naturais). De modo geral, espera-se maior recuperação do N quando adicionado na forma de sulfato de amônio (Vicente-Chandler, 1973; Martha Jr., 1999). A aplicação de fosfatos naturais (FN) pouco reativos implica menor recuperação pelas plantas do P em comparação com fontes solúveis e com FN de maior reatividade, mesmo a

longo prazo (Yost et al., 1982; Léon et al., 1986; Sanzonowicz et al., 1987; Novais e Smyth, 1999).

Na tentativa de estimar valores de eficiência de recuperação do P, foi considerada sua variação com o FCP do solo por meio de método semelhante ao utilizado por Santos (2002). Para tanto, tomaram-se como base os dados de Fonseca (1987), que trabalhou com *B. decumbens* cultivada em casa de vegetação e aplicação de fonte solúvel de P incorporada ao solo, por abranger solos com ampla variação de P remanescente (P-rem) (Figura 4.2). Com base em trabalhos de campo (Yost et al., 1982; Sanzonowicz et al., 1987; Corrêa e Haag, 1993b; Fonseca, 1995) foram propostas correções na equação da eficiência de recuperação do P ($f_{P\text{ rec}}$) em função do P-rem para estimar a recuperação durante a fase de estabelecimento ($f_{P\text{ rec est}}$) e durante a fase de utilização da pastagem ($f_{P\text{ rec util}}$). No primeiro caso, modificou-se apenas o valor do intercepto (b_0) da equação original de 0,0670 para 0,130 (Figura 4.2). No segundo caso, optou-se por dobrar os valores do b_0 e da declividade da reta (b_1) em relação aos da equação para o estabelecimento.

Os FNs são bastante utilizados como fonte de P para a fase de utilização de pastagens, o que se justifica pelo seu menor custo; pela adaptação das forrageiras as condições ácidas; pelo menor conteúdo após a fase de estabelecimento devido à perenidade (maior ciclo) das plantas; e pela grande densidade radicular, favorecendo a competitividade das plantas pelo P solubilizado (Léon et al., 1986; Friesen et al., 1997; Novais e Smyth, 1999; Rao et al., 1999; Rao, 2001).

Para corrigir a eficiência de recuperação do P estimada para fontes solúveis (Figura 4.2), para fosfatos naturais (FN) utilizou-se a eficiência agrônômica⁵ ($EA_{\%}$) de FN estimada com base no conteúdo de P em plantas de *P. maximum* (Quadro 4.3), por relacionar a recuperação do P adicionado por fonte solúvel com aquela por FN. Desta forma, estima-se a eficiência de recuperação do P adicionado via FN ($f_{P\text{ rec FN}}$) por:

⁵ A eficiência agrônômica de FN é estimada com base na resposta das plantas quanto à produção de matéria seca ou à quantidade de fósforo absorvida em relação ao tratamento com super triplo (ST) (Novais e Smyth, 1999):

$$EA_{\%} = \left(\frac{MS \text{ obtida com FN} - MS \text{ testemunha}}{MS \text{ obtida com ST} - MS \text{ testemunha}} \right) 100$$

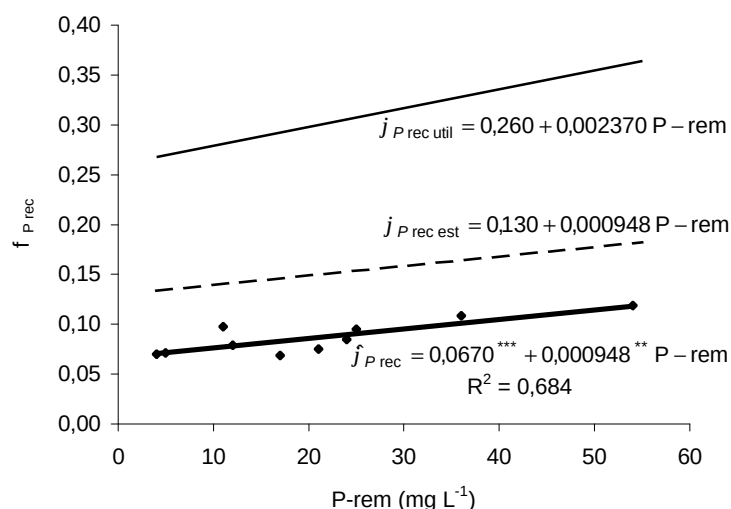


Figura 4.2. Eficiência de recuperação do fósforo ($f_{P\text{ rec}}$) por *B. decumbens* em função do fósforo remanescente (P-rem) estimada a partir dos dados (♦) de Fonseca (1987); e eficiência de recuperação do fósforo, adotadas no submodelo planta, para a fase de estabelecimento ($f_{P\text{ rec est}}$) e a de utilização ($f_{P\text{ rec util}}$) da pastagem. *** e ** significativo a 0,1 e 1 %, respectivamente.

Quadro 4.3. Eficiência agrônômica (EA) de fosfatos naturais calculada por meio da absorção de fósforo por *Panicum maximum*

Fonte de fósforo	Reatividade	EA _% ^{1/}
	Alta	
Superfosfato Triplo		100
Gafsa		85
Arad		72
	Média	
Central Florida		57
Tennessee		52
	Baixa	
Patos de Minas		41
Araxá		34
Abaeté		32
	Muito baixa	
Jacupiranga		22
Catalão		17
Tapira		9

Fonte: Léon et al. (1986)

^{1/} As EA_% baseadas na produção apresentaram valores maiores do que as estimadas com base no conteúdo de P, com valores próximos de 100 % para FN de reatividade alta, semelhantemente ao relatado em outros trabalhos (Yost et al., 1982; Sanzonowicz et al., 1987; Novais e Smyth, 1999).

$$j_{P\text{ rec FN}} = j_{P\text{ rec}} \frac{EA_{\%}}{100} \quad (4.12)$$

Ressalta-se que os FNs de baixa reatividade não são fontes eficientes de P para o estabelecimento de pastagens e para a fase de utilização em sistemas com altas produtividades, mesmo quando se aplicam doses elevadas (Yost et al., 1982; Novais e Smyth, 1999). Para Novais e Smyth (1999), devido às diferenças entre os produtos de solubilidade dos fosfatos solúveis e dos FNs de baixa reatividade, não se conseguem produtividades tão altas como as obtidas com os fosfatos solúveis, por maior que seja a dose dos FNs. O crescimento máximo de uma planta pode requerer uma concentração de P na solução do solo maior do que o produto de solubilidade do FN permite. Assim, considerando ainda que o valor de $EA_{\%}$ é dependente da dose (Novais e Smyth, 1999), inferiu-se que os dados de Léon et al. (1986) (Quadro 4.3) são válidos para doses de P entre 0 e 500 kg ha⁻¹ para FNs de reatividade alta e média, entre 0 e 350 kg ha⁻¹ para FNs de reatividade baixa e entre 0 e 150 kg ha⁻¹ para os de reatividades muito baixa.

Para o N, são comumente observadas eficiências de recuperação de 0,40 a 0,60, embora variem de 0,20 a 0,80 (Vicente-Chandler, 1973; CIAT, 1980, 1981; Alvim et al. 1990; Botrel et al., 1990; Carvalho et al. 1991; Corsi e Nussio, 1993; Martha Jr., 1999). A eficiência de recuperação de N ($f_{N\text{ rec}}$) e dos demais nutrientes depende do estado nutricional das plantas. A eficiência de recuperação de N por plantas de *B. decumbens* e *P. maximum* estimada no CIAT (1980, 1981), por exemplo, foi de 0,50 a 0,80 no primeiro ano de avaliação e de 0,20 a 0,50, no segundo ano. Essa diminuição na eficiência de recuperação do N foi creditada à diminuição na disponibilidade de P e, especialmente, de K (CIAT, 1980, 1981). A partir dos resultados apresentados por Carvalho et al. (1991), estimou-se que a eficiência de recuperação de N por *B. decumbens* foi, em média, de 0,36, porém nos tratamentos com aplicação de K essa média foi de 0,44. Como neste modelo pressupõe-se que o conteúdo de todos nutrientes será suprido, pode-se considerar que a eficiência de recuperação de N deve se situar entre os valores mais elevados.

Com respeito à influência da fonte de N, Martha Jr. (1999), utilizando traçador isotópico (¹⁵N), determinou que a eficiência de recuperação de N por

capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) foi 18 % maior quando se aplicou sulfato de amônio em relação a uréia, provavelmente, em razão da menor perda por volatilização de NH_3 . Porém esse autor destacou que as estimativas da eficiência de recuperação de N em função da fonte de N são variáveis e não apresentam um comportamento definido.

Vicente-Chandler (1973) relatou que em pastagens tropicais intensivamente manejadas, a eficiência de recuperação do K variou de 0,65 a 0,77 até doses de 448 kg ha^{-1} de K. Em pastagens de *B. decumbens*, a eficiência de recuperação do K durante o primeiro ano de avaliações variou entre 0,70 e 0,92 (Carvalho et al., 1992). Em pastagens de *B. humidicola* e *Desmodium ovalifolium* cultivadas durante 15 meses (8 cortes) em um Ultisol, a eficiência de recuperação do K variou entre 0,76 a 1,57 (Ayarza, 1988). Para esse autor, valores elevados de eficiência de recuperação do K devem-se à grande densidade de raízes, produção de MS e consumo de luxo de K apresentados pelas forrageiras. Somado a isso, eficiência de recuperação do K $> 1,00$ sugere que essas plantas são capazes de absorver K não trocável do solo. Raij e Quaggio (1984) verificaram que a extração de K por *B. decumbens* em 24 amostras de solo foi maior do que a diminuição na quantidade de K trocável entre o início e o fim do experimento.

A equação 4.11 seria imprópria para o cálculo da eficiência de recuperação de Ca e Mg, pois a aplicação de calcário além de fornecer esses nutrientes, tem a função de corrigir a acidez do solo. Assim, em geral, as doses desses elementos são bem maiores do que o conteúdo deles nas plantas, especialmente considerando que as gramíneas forrageiras tropicais têm baixos teores de Ca e são adaptadas à alta saturação por Al ($m > 70 \%$) (CIAT, 1982; Rao et al., 1999; Rao, 2001). Tanto para a produção de $43,5 \text{ sc ha}^{-1}$ de grão de soja (8.536 kg ha^{-1} de MS total) (Santos, 2002) quanto para produção de $18.150 \text{ kg ha}^{-1}$ de MS de *B. brizantha*, o conteúdo de Ca é de $63,5 \text{ kg ha}^{-1}$.

Quando a dose aplicada é muito maior do que a necessária, a utilização da equação 4.11 dificulta a obtenção de eficiência de recuperação do nutriente compatível com o comportamento do nutriente no solo e a eficiência de sua aquisição pela planta. Isso parece estabelecer um paradoxo quando se estima a eficiência de recuperação de Ca, pois se espera que as plantas sejam tão eficientes na aquisição desse elemento quanto na de Mg e K. Todavia, o

pequeno conteúdo de Ca em relação ao suprimento⁶, usualmente disponibilizado pela aplicação de corretivos da acidez do solo, impede a expressão dessa eficiência.

Neste sentido, tentou-se contornar parcialmente esse problema estimando a eficiência de recuperação do Ca e a do Mg a partir da divisão dos conteúdos desses nutrientes nas plantas pela quantidade de nutriente no solo antes do cultivo. Para tanto, utilizaram-se dados de experimento em casa de vegetação em que foram adicionadas doses de calcário ($4 \text{ CaCO}_3 : 1 \text{ MgCO}_3$) para elevar a saturação por bases (V) para 20, 40, 60 e 80 % (Cantarutti⁷). Como não houve resposta de produção à $V > 20 \%$, estimaram-se as eficiências de recuperação nos tratamentos com $V = 20 \%$. Os valores de eficiência de recuperação obtidos foram de $f_{\text{Ca rec}} = 0,20 \pm 0,12$ e de $f_{\text{Mg rec}} = 0,78 \pm 0,24$ por *B. decumbens* e por *P. maximum* cv. Mombaça cultivadas por 70 dias (dois períodos de 35 dias). Considerando que, em condições de campo, o período de crescimento é maior do que 70 dias e que o Ca não é remobilizado nas plantas, pode-se esperar maiores valores de eficiência de recuperação de Ca. Aquelas duas espécies foram mais eficientes na absorção do Mg do que do Ca. As quantidades absorvidas de Mg foram maiores do que as de Ca (Ca/Mg nas plantas $< 1,00$), mesmo no segundo cultivo quando a disponibilidade de Mg diminuiu mais do que a de Ca ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 6$ no primeiro cultivo e $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 20$ no segundo).

Com base nessas considerações, são sugeridos valores de eficiência de recuperação para o submodelo planta (Quadro 4.4). Ressalta-se, contudo, que todos os valores adotados devem ser aperfeiçoados. Quanto ao Ca e Mg isso se deve à dificuldade de se estabelecer uma recuperação que reflita a relação entre conteúdo e demanda em razão da dupla função da calagem. Ao mesmo tempo, ficou evidente o número reduzido de pesquisas sobre o S e

⁶ Assumido que plantas de metabolismo fotossintético C_4 , como as gramíneas forrageiras tropicais, apresentam uma eficiência de uso de água da produtividade de 200 a 350 L de água por kg de MS (Larcher, 2000), concentrações de Ca na solução do solo de 8,6 a 30 mg L^{-1} seriam suficientes para que toda a demanda de Ca das forrageiras fossem atendidas por meio do mecanismo de fluxo de massa. Vargas et al. (1983) verificaram, em dois Latossolos e um Podzólico distróficos, concentrações de Ca na solução do solo entre 26 e 53 mg L^{-1} , sem adição de calcário, e entre 79 e 393 mg L^{-1} com calagem para elevar o pH do solo a 6,0.

⁷ Cantarutti, R.B. (Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG). Dados não publicados, 2003.

Quadro 4.4. Valores de eficiência de recuperação pela planta ($f_{i\text{ rec}}$) de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre aplicados como fertilizantes

Nutriente	$f_{i\text{ rec}}$
Nitrogênio	0,50 (uréia) 0,60 (sulfato de amônio)
Fósforo	$j_{P\text{ rec est}} = 0,0953 + 0,000948 P\text{-rem}$ $j_{P\text{ rec manut}} = 0,1906 + 0,001896 P\text{-rem}$
Potássio	0,75
Cálcio	0,50
Magnésio	0,75
Enxofre	0,50

sobre a recuperação do P aplicado em cobertura durante a fase de utilização da pastagem em solos com diferentes valores de fator capacidade de P.

4.5.2. Remobilização dos nutrientes na planta

Os termos ciclagem e reciclagem têm sido empregados para caracterizar os processo de retranslocação dos nutrientes internamente nas plantas durante a deficiência de nutrientes, o estágio reprodutivo e a senescência foliar, quando ocorre transporte dos nutrientes para drenos metabólicos preferenciais (folhas e raízes mais jovens e estruturas reprodutivas) (Aerts, 1996; Millard, 1996; Wright e Westoby, 2003). No entanto, de acordo com Aerts (1996), adotou-se o termo remobilização para não confundir com o conceito de reciclagem no sistema solo-planta-animal.

Evidentemente, a premissa básica para a remobilização de um nutriente é que este seja móvel no tecido floemático. Com exceção do Ca, todos os macronutrientes são remobilizados (Marschner et al., 1997).

Para espécies perenes, Aerts (1996) verificou que, em média, cerca de 50 % do N e do P são remobilizados durante a senescência das folhas. No entanto, a taxa de remobilização varia de <5 a 80 % para o N e de 0 a 95 % para o P (Aerts e Chapin, 2000, citados por Wright e Westoby, 2003). Para Rao et al. (1999), em média, de 50 a 75 % do conteúdo de P é remobilizado das folhas antes de sua abscisão. Hunt (1983), utilizando a diferença de teor de N

entre folhas verdes e folhas senescentes de azevém (*Lolium perenne*), estimou remobilização de 40 a 60 % e de 25 a 35 % para pastagens com baixa e alta disponibilidade de N, respectivamente. No entanto, segundo Millard (1996), a remobilização baseada na diferença de teores tendem a ser subestimadas. Neste sentido, Lemaire e Chapman (1996) consideraram que a remobilização deve se aproximar de 75 % do N foliar quando se considera a perda de massa das folhas durante a senescência (remobilização e consumo de C no processo de respiração).

A remobilização de todos os nutrientes parece interligada. O K atuando como contra-íon (*counterion*) é fundamental para o transporte de aminoácidos e sacarose. Fósforo e Mg são requeridos para o funcionamento dos mecanismos de carregamento do floema com aminoácidos e sacarose e são transportados com estes (Marschner et al., 1997). Aerts (1996) verificou que as remobilizações de N e de P se correlacionaram ($r = 0,67$), considerando que o S é remobilizado tanto na forma de sulfato quanto na forma de aminoácidos (Marschner, 1995), isso deve ser verdadeiro também para S e N.

A fertilidade do solo promove diferentes respostas na eficiência de remobilização; porém, em geral, esta eficiência tem se mostrado independente da disponibilidade de nutrientes (Millard, 1996; Aerts, 1996; Wright e Westoby, 2003). Para Wright e Westoby (2003) a melhor forma de entender esse controle é por meio do balanço entre o custo energético para aquisição de nutrientes do solo e para remobilização. Por esse modelo, a remobilização se estende até que o seu custo energético se torne maior do que o de aquisição de nutrientes do solo. Porém eles afirmaram que os custos de remobilização e de aquisição dos nutrientes tendem a ser menores para plantas em sítios com maior disponibilidade de nutrientes, o que ocasiona eficiências de remobilização semelhantes independente da fertilidade do solo.

Além da eficiência de remobilização, as quantidades de nutrientes remobilizadas ($\gamma_{i\ pl}$, em kg ha^{-1}) em pastagens são dependentes das quantidades de nutrientes consumidas pelos animais ($C_{i\ an}$; equação 3.16) em relação ao conteúdo total ($CN_{i\ pl}$):

$$\gamma_{i\ pl} = (CN_{i\ pl} - C_{i\ pl}) \cdot j_{i\ rem} \quad (4.13)$$

em que $\phi_{i \text{ rem}}$ é um modificador da eficiência de remobilização do nutriente i . Para o balanço nutricional na fase de utilização da pastagem, foram atribuídos os valores de 0,60 para N, P, Mg e S, de 0,70 para K e de zero para Ca. Em anos de estabelecimento, pressupondo que há uma fase de estabelecimento em que há menor taxa de senescência e uma fase de utilização da pastagem, consideraram-se valores de eficiência de remobilização iguais a dois terços em relação à fase de utilização.

Com os teores dos nutrientes nas plantas ($T_{i \text{ pl}}$, em dag kg^{-1}) e o modificador da eficiência de remobilização ($\phi_{i \text{ rem}}$) é possível estimar também os teores de nutrientes nos resíduos vegetais (Aerts, 1996):

$$T_{i \text{ r pl}} = T_{i \text{ pl}} \cdot (1 - \phi_{i \text{ rem}}) \quad (4.14)$$

em que $T_{i \text{ r pl}}$ é o teor do nutriente i (dag kg^{-1}) nos resíduos da parte aérea das plantas.

4.6. Discussão

A decisão de se estimar a produção anual de forragem e o conteúdo nutricional em função do consumo animal apenas durante a estação de crescimento das plantas baseou-se em algumas pressuposições. Uma delas é que o crescimento das gramíneas forrageiras é estacional. No período de menor crescimento das plantas, o desempenho animal pode ser negativo em sistemas extensivos, inviabilizando a utilização do submodelo animal, e em sistemas intensivos o desempenho animal pode estar associado à utilização de suplementos alimentares e do pasto diferido durante o verão. Outra pressuposição é de que a fase de menor crescimento vegetal está normalmente associada à menor disponibilidade hídrica no solo e, conseqüentemente, menor eficiência de recuperação pelas plantas dos nutrientes aplicados ao solo. Por último, há de se considerar que a estimativa da produção das forrageiras *per si* não é objetivo do submodelo planta.

O objetivo do submodelo planta é a estimativa do conteúdo nutricional, ponto de partida para a recomendação de adubação. Destaca-se, no entanto,

que o submodelo planta estima a produção de forragem consumível pelos animais, normalmente composta por cerca de 90 % de folhas verdes e 10 % de colmos e tecidos senescentes (Ruiz et al., 1981; Euclides et al., 1992, 1999; Brâncio, 2000; Euclides et al., 2000), pois é o consumo destas frações vegetais que é estimado no submodelo animal. Isso representa uma tentativa de estabelecer uma relação entre o componente econômico da pastagem, os animais, e o conteúdo nutricional das plantas e, em última análise, a adubação.

Em culturas agrícolas, essa relação é mais perceptível por haver um produto vegetal de interesse econômico, por exemplo, grãos, frutos, colmos. Na modelagem para recomendação de adubação em culturas, têm-se utilizado proporções alométricas para separar o produto de interesse dos resíduos vegetais e, conseqüentemente, o conteúdo de nutrientes associado a cada um deles (Novais e Smith, 1999; Freire, 2001; Santos, 2002; Oliveira, 2002). Em pastagem não há uma única resposta para questões como: qual é a fração exportável das plantas? Qual é a proporção dessa fração efetivamente exportada (consumida)? Qual é o teor de nutrientes nessa fração? Qual é a produção comercial (produto animal) que essa fração pode proporcionar?

A pastagem parece, de fato, comportar-se como um sistema emergente, no qual as respostas a estímulos não são previsíveis pela soma das respostas de suas partes: planta, animal e ambiente. Isso, segundo Addiscott (1998), põe em dúvida a natureza determinística do sistema modelado. Para esse autor, no entanto, a distinção entre modelos determinísticos e estocásticos não é tão óbvia, sendo função do nível do conhecimento e do nível hierárquico (escala) em que se descreve o sistema de interesse. Em geral, ao se adotar um nível hierárquico mais elevado, o sistema pode ser descrito por regras mais simples e suas respostas tendem a um comportamento determinístico (Addiscott, 1998). Nesse sentido, espera-se que a descrição matemática proposta para o componente planta das pastagens esteja num nível hierárquico compatível com a estimativa do balanço nutricional.

Isso, em parte, justifica a utilização, no submodelo planta, de constantes como a eficiência de utilização da forragem, a eficiência de recuperação dos nutrientes pelas plantas, a eficiência de remobilização dos nutrientes, entre outras. Reconhece-se que a utilização dessas constantes dá

ao modelo um caráter empírico e permite o questionamento de sua validade. No entanto, com o objetivo de remediar essa característica do modelo procurou-se: (i) destacar que os valores sugeridos foram propostos e não medidos, o que implicitamente suscita a necessidade de pesquisas que os comprovem (um dos objetivos da modelagem); (ii) utilizar valores com algum embasamento de literatura; e (iii) construir equações que exprimissem conceitos consagrados na literatura e que permitissem a correção dos valores sugeridos para tais constantes.

É importante destacar que a estimativa do conteúdo nutricional como proposta não resulta, necessariamente, em balanço ótimo entre nutrientes. Certamente, a utilização de relações entre nutrientes, tomados dois a dois, estabelecidas para uma população de plantas com produtividade referencial, como são as normas do *Diagnosis and Recommendation Integrated System* (DRIS), podem melhorar a estimativa do conteúdo nutricional em relação a dos teores considerados separadamente. Para o submodelo planta, uma vantagem adicional da utilização dessas relações seria a menor variabilidade devido à idade fisiológica das plantas (Black, 1993).

O estabelecimento de relações ótimas com base em dados disponíveis na literatura é difícil devido à grande variação nos métodos para avaliação de forrageiras e de suas respostas à adição de fertilizantes. Algumas falhas constantes são: a não adição de todos os macronutrientes, aplicação de uma única dose e a não inclusão da “dose zero”. Além disso, nem todos nutrientes têm seus teores determinados, em especial os de pouca importância para a nutrição animal. Outra limitação é que não se avalia a produção em toda a estação de crescimento, mas apenas em um ou dois cortes, mesmo em trabalhos de casa de vegetação.

Black (1993) ressaltou que as relações entre dois nutrientes por si só não permitem inferir se os nutrientes estão deficientes, adequados ou em excesso, mas este problema pode ser contornado tomando-se um nutriente como referência. Pela importância das proteínas no protoplasma, Black (1993) sugeriu o N como nutriente de referência. Assumindo-se os teores de N sugeridos para este submodelo (Quadro 4.2) como adequados, pode-se comparar relações N/P, N/K, N/Ca, N/Mg e N/S estimadas com os teores adotados no submodelo planta com normas DRIS para gramíneas forrageiras

tropicais (C₄) (Tarpley et al., 1985; Payne et al., 1990) e temperadas (C₃) (Bailey et al., 1997) (Quadro 4.5).

Tomando as relações do quadro 4.5 e os teores do quadro 4.2. e com o conhecimento sobre as exigências nutricionais dessas forrageiras (Rao et al., 1996, 1999; Rao, 2001; Cantarutti et al., 2002), admite-se que alguns dos teores utilizados necessitam ser ajustados para aprimorar o FERTICALC-Pastagem. Os teores de P para *B. decumbens* e, principalmente, para *B. humidicola* parecem elevados em comparação com os teores de P para *B. brizantha* cv. Marandu e *P. maximum*, espécies mais exigentes em fertilidade do solo (Quadro 4.2), apesar da relação N/P ser compatível com as normas DRIS (Quadro 4.5). Os teores de S parecem adequados (Malavolta et al., 1997), apesar da relação N/S ser menor do que 12 a 15, que é considerada ótima para gramíneas (Gallo et al., 1974, citados por Costa et al., 2001). Apesar dos baixos teores de K para *B. humidicola* e *B. decumbens*, as relações N/K parecem aceitáveis se comparadas com as normas DRIS das outras gramíneas. A relação N/Ca está dentro do aceitável, refletindo, inclusive, a maior adaptação de *B. humidicola* à menor disponibilidade de Ca, conforme demonstram os teores. No entanto, deve-se levar em consideração que os teores dos nutrientes considerados neste submodelo foram obtidos em plantas com 30 a 45 dias de crescimento ou rebrota após corte, o que pode explicar, em parte, teores elevados.

Durante a construção deste submodelo, questionou-se se a estimativa da demanda nutricional pela diferença entre o conteúdo e a quantidade dos nutrientes remobilizados (Equação 4.10) não representaria uma fonte de erro para o modelo. Os nutrientes remobilizados estão prontamente metabolizáveis para atender o crescimento da planta, tornando-a menos dependente da aquisição de nutrientes do solo (Aerts, 1996; Lemaire e Chapman, 1996; Wright e Westoby, 2003), e aumentam a eficiência de uso dos nutrientes, por permitir que uma mesma unidade de nutriente seja utilizada para a produção de sucessivas unidades de biomassa ao longo do ciclo da planta (Vitousek, 1982). Essa sucessiva utilização dos nutrientes é significativa em pastagem, pois neste sistema a biomassa produzida num determinado período é composta por frações desta biomassa produzidas entre cortes ou pastejos em que toda a biomassa não colhida. Isso, conseqüentemente, permite a remobilização de

Quadro 4.5. Relações entre os teores de nitrogênio e dos demais macronutrientes adotados como referência no submodelo planta e normas DRIS para gramíneas forrageiras

Relação	Relações entre nutrientes ¹				Normas DRIS		
	<i>P. maximum</i>	<i>B. brizantha</i>	<i>B. decumbens</i>	<i>B. humidicola</i>	<i>P. notatum</i> ²	<i>C. dactylon</i> ³	<i>L. perenne</i> ⁴
N/P	7,05	9,31	7,94	6,89	5,00	10,11	8,99
N/K	0,94	1,07	1,47	1,32	1,94	1,40	1,18
N/Ca	2,62	4,26	3,76	4,60	3,86	7,61	2,06
N/Mg	4,35	4,97	4,09	7,30	6,18	14,94	7,26
N/S	9,25	9,93	7,94	8,86	----	11,85	8,56

¹Relações estimadas a partir dos teores apresentados no quadro 4.2. ²Payne et al. (1990). ³Tarpley et al. (1985).

⁴Bailey et al. (1997).

significativas quantidades dos nutrientes, especialmente em sistemas com menor eficiência de utilização da forragem (U_{tr}). Foi com base nessas considerações que se concluiu ser correto subtrair do conteúdo nutricional os nutrientes remobilizados.

As outras formas de reciclagem resultam em maiores perdas de nutrientes do sistema solo-planta-animal, ressaltando-se que as relacionadas à decomposição dos resíduos vegetais são menores do que as relacionadas às excretas (Thomas, 1992; Haynes e Williams, 1993). Desta forma, a eficiência de utilização dos nutrientes no sistema produtivo⁸ é menor quando se maximiza a eficiência de utilização da forragem, não só pela menor quantidade de nutrientes remobilizada mas também pela maior reciclagem via excretas. Para determinada eficiência de utilização da forragem e de remobilização ($\phi_{i\text{ rem}}$), a eficiência de utilização dos nutrientes no sistema produtivo depende do equilíbrio entre a decomposição dos resíduos vegetais e das excretas, o conteúdo nutricional e a eficiência de aquisição dos nutrientes pelas plantas, de modo a possibilitar eficiente e rápida (re)absorção destes pelas plantas (Vitousek, 1984).

A liberação de nutrientes dos resíduos vegetais pode ser estimada a partir da sua produção, da taxa de decomposição e de seus teores de

⁸ A eficiência de utilização dos nutrientes no ecossistema relaciona-se com a magnitude com que os nutrientes reciclados por meio dos resíduos vegetais e, no caso das pastagens, das excretas se tornam indisponíveis para as plantas. Vitousek (1984) afirmou, neste sentido, que um sistema eficiente é aquele em que os nutrientes reciclados são rapidamente (re)absorvidos pelas raízes das plantas, pelas micorrizas e pelos decompositores, permanecendo no ecossistema.

nutrientes (Thomas e Asakawa, 1993). Nesse sentido, o teor dos nutrientes nos resíduos vegetais ($T_{i\text{ r pl}}$) (Equação 4.14) é importante para estimar as taxas de decomposição da matéria orgânica e de liberação de nutrientes dos resíduos vegetais no submodelo solo. Essas taxas, em geral, relacionam-se positivamente com os teores de N e P e negativamente com as relações C/N e C/P (Vitousek, 1982; Aerts, 1996; Seneviratne, 2000), apesar das relações lignina/N e (lignina+polifenóis)/N serem melhores indicadores da decomposição dos resíduos vegetais (Thomas e Asakawa, 1993; Heal et al., 1997).

A mineralização líquida é, em geral, positiva quando a relação C/N = 20:1 a 30:1 (Seneviratne, 2000; Heal et al., 1997). Quanto a relação C/P, em valores abaixo de 200:1 predomina a mineralização e, acima de 300:1, a imobilização (Novais e Smith, 1999). Nesse sentido, ao simular os valores de C/N e C/P a partir de ampla faixa de teores de N e P na planta e de $\phi_{i\text{ rem}}$ (Figura 4.3) percebe-se que, nas pastagens, os resíduos vegetais dificilmente deve apresentar relações C/N e C/P que promovam rápida mineralização líquida. Com base nos teores de N e P e na $\phi_{i\text{ rem}}$ sugeridos no submodelo planta e com teores de C de 43,3 e 53,1 dag kg⁻¹ (Thomas e Asakawa, 1993; Schunke, 1998; Monteiro et al., 2002) estimaram-se valores de 75 e 107 para a relação C/N e de 570 e 740 para a relação C/P.

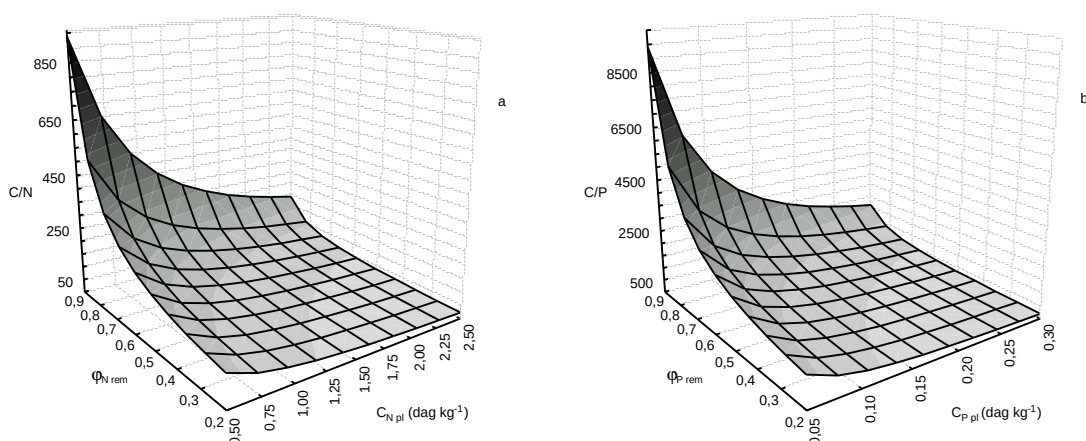


Figura 4.3. Relações C/N (a) e C/P (b) determinadas a partir do teor de nitrogênio e fósforo nos resíduos vegetais estimados pelo submodelo planta em função da eficiência de remobilização ($\phi_{i\text{ rem}}$) e do teor ($T_{i\text{ pl}}$) destes nutrientes nas plantas. Teor de C igual a 47,0 dag kg⁻¹.

5. SUBMODELO SOLO

5.1. Introdução

Com a avaliação da fertilidade, estima-se a quantidade dos nutrientes em formas disponíveis para as plantas. Para tanto, o método mais utilizado, pela capacidade preditiva, rapidez e economicidade, é a análise química do solo. Com base nos resultados realiza-se a recomendação de corretivos e fertilizantes (Black, 1993; Alvarez V., 1996).

Para Alvarez V. (1996), a disponibilidade é definida como a quantidade do nutriente no solo que pode ser absorvida pela cultura durante o seu ciclo de vida. Quando se estima a fertilidade por meio de análise química do solo, a disponibilidade é definida como o teor do nutriente do solo recuperado por um método de extração, que se correlaciona estreitamente com o conteúdo do nutriente na planta. No entanto, o “disponível” por um extrator não pode ser interpretado em termos absolutos, pois é um valor empírico, relativo, que pode ou não refletir a disponibilidade exata (Black, 1993; Alvarez V., 1996).

Isso representa uma dificuldade para o desenvolvimento de sistemas para recomendação de adubação que utilizam informações da análise de solo. Neste caso, a quantidade do nutriente no solo, “disponível” por um extrator, deve ser transformada em disponível de fato, correspondente a uma quantidade absorvida pela planta (Novais e Smyth, 1999).

Nas pastagens, além dos nutrientes disponíveis do solo, as plantas podem absorver também os elementos que reciclam no sistema por meio da deposição no solo de excreta animal e de resíduo vegetal. Os nutrientes dos resíduos vegetais são distribuídos na pastagem muito mais uniformemente do que os das excretas (Haynes e Williams, 1993). Deve-se considerar, entretanto, que alguns nutrientes, especialmente N e P, podem ser imobilizados na biomassa microbiana do solo devido à baixa qualidade dos resíduos de gramíneas forrageiras de regiões tropicais (Myers et al., 1986). Os nutrientes em excretas, ao contrário, apresentam-se de forma mais prontamente disponível para as plantas (Barrow, 1987; CIAT, 1991; Whitehead, 2000), mas, por outro lado, estão mais susceptíveis a serem perdidos do sistema devido às elevadas concentrações em fezes e urina e à tendência de deposição localizada destas nas pastagens (Petersen et al., 1956; West et al., 1989; Wilkinson et al., 1989; CIAT, 1991; Mathews et al., 1994a,b, 1999; Franzluebbers et al., 2000; Mathews et al., 2001).

O submodelo solo foi desenvolvido para ser um método simples da estimativa da quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas, considerando as quantidade estimadas a partir dos teores da análise do solo e as quantidade depositadas no solo na forma de resíduos orgânicos de origem vegetal e animal (fezes e urina); e da estimativa das doses de nutrientes e de calcário recomendadas.

5.2. Suprimento dos nutrientes

Nos sistemas de pastagem, a fertilidade depende não apenas dos nutrientes do solo, mas também daqueles que são adicionados ao solo com as excretas e os resíduos vegetais (Middleton e Smith, 1978; Thomas, 1992; Oyanarte et al., 1997). Assim, tem-se que o suprimento do nutriente i (ρ_i solo, em kg ha^{-1}) pode ser calculado por:

$$l_{i \text{ solo}} = (l_{i \text{ extr}} + l_{i \text{ ex}} + l_{i \text{ lt}}) - r_i \quad (5.1)$$

em que ρ_i extr, ρ_i ex, ρ_i lt, são os suprimentos do nutriente i (kg ha^{-1}) provenientes do solo, das excretas e dos resíduos vegetais, respectivamente, e ρ_i é a

quantidade (kg ha^{-1}) necessária à manutenção de uma reserva do nutriente i no solo.

Na fase de estabelecimento da pastagem o solo é o único responsável pelo suprimento dos nutrientes. Desta forma, assumiu-se que a contribuição das excretas e dos resíduos da cultura anterior (pastagem ou não) é desprezível ou já está contida no teor encontrado na análise do solo. Isso ressalta a importância de uma correta amostragem e da prática da análise do solo antes do estabelecimento da pastagem.

5.2.1. Suprimento de nutrientes pelo solo

O método adotado para estimar o suprimento de nutrientes do solo foi o descrito por Novais e Smyth (1999) e utilizado em modelos para recomendação de adubação (Freire, 2001; Oliveira, 2002; Santos, 2002). Nesse caso, parte-se dos resultados de teor do nutriente na análise de solo ($T_{i \text{ solo}}$, em mg dm^{-3})⁽¹⁾. Como esse teor não pode ser interpretado como disponibilidade absoluta (Black, 1993; Alvarez V., 1996), a quantidade do nutriente suprida por unidade de volume de solo é estimada dividindo-se o teor do nutriente pela respectiva taxa de recuperação do extrator ($f_{i \text{ extr}}$), quando o nutriente é aplicado ao solo (Oliveira, 2002).

Os extratores mais utilizados no país para análise química dos nutrientes considerados no submodelo solo são o Mehlich-1 (P e K), resina (P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), KCl (Ca^{2+} e Mg^{2+}), $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 500 mg L^{-1} de P, em HAOc 2 mol L^{-1} ou em H_2O (S). Verifica-se que os valores da taxa de recuperação do extrator para K, Ca e Mg foram considerados constantes (Quadro 5.1). Por outro lado, a taxa de recuperação do extrator para o P e o S varia com a fator capacidade do solo (FC), o que torna necessário considerá-lo para uma adequada estimativa da disponibilidade desses nutrientes (Novais e Smyth,

⁽¹⁾ Frequentemente os resultados das análises de solo para os cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) são expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ou $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, devendo ser convenientemente convertidos.

Quadro 5.1. Taxa de recuperação pelo extrator do nutriente aplicado ao solo ($f_{i\text{ extr}}$, em $\text{mg dm}^{-3} / \text{mg dm}^{-3}$), variável, ou não, com o fósforo remanescente (P-rem, em mg L^{-1})

Nutriente	Extrator	Equação	R ²
P	Mehlich-1	$\hat{f}_{P\text{ ext}} = 0,06728 + 0,01216^{**} P\text{-rem}$	0,681
	Resina	$\hat{f}_{P\text{ ext}} = 0,419^{**} P\text{-rem}^{0,128099}$	0,694
K	Mehlich-1	$\hat{f}_{K\text{ ext}} = \bar{f}_{K\text{ ext}} = 0,8020$	-
	Resina	$\hat{f}_{K\text{ ext}} = \bar{f}_{K\text{ ext}} = 0,7559$	-
Ca	KCl	$\hat{f}_{Ca\text{ ext}} = \bar{f}_{Ca\text{ ext}} = 0,7661$	-
	Resina	$\hat{f}_{Ca\text{ ext}} = \bar{f}_{Ca\text{ ext}} = 0,7661$	-
Mg	KCl	$\hat{f}_{Mg\text{ ext}} = \bar{f}_{Mg\text{ ext}} = 0,7989$	-
	Resina	$\hat{f}_{Mg\text{ ext}} = \bar{f}_{Mg\text{ ext}} = 0,7989$	-
S	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{HOAc}$	$\hat{f}_{S\text{ ext}} = 0,0410 + 0,01700^{**} P\text{-rem}$	0,836
	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\hat{f}_{S\text{ ext}} = 0,2233 + 0,01712^{**} P\text{-rem}$	0,834

Fonte: Freire (2001); Oliveira (2002); Santos (2002).

Em virtude da falta de dados para Ca e Mg extraídos pela resina, utilizaram-se os mesmos valores de taxa de recuperação encontrados para o KCl.

** significativo a 1 %.

1999). Utilizou-se o P-remanescente² (P-rem) como indicador do fator capacidade e para avaliar o seu efeito sobre a taxa de recuperação do extrator para P e para S.

Santos (2002) verificou haver influência do fator capacidade de P, mesmo para o P extraído pela resina. Esse autor relatou que a razão entre o teor de P obtido em uma extração com resina de troca aniônica, segundo Raij e Quaggio (1983), e o teor de P de extrações sucessivas com resina (P lábil) correlacionou-se significativamente com o P-rem. Ressalta-se que a disponibilidade e a taxa de recuperação do extrator dos nutrientes variam,

² Fósforo remanescente é a concentração de P da solução de equilíbrio, após agitar, durante uma hora, 5 cm^3 de TFSA com 50 mL de solução de CaCl_2 10 mmol L^{-1} com 60 mg L^{-1} de P (Alvarez V. et al., 2000).

É possível estimar o valor de P-rem (mg L^{-1}) a partir do teor de argila do solo (arg, em dag kg^{-1}) por meio da seguinte equação (Freire, 2001):

$$\hat{P} - \text{rem} = 52,44 - 0,9646^{**} \text{arg} + 0,0050^{**} \text{arg}^2 \quad R^2 = 0,747$$

$\forall$ arg entre 5 e 75 dag kg^{-1} . ** significativo a 1 %.

também, com a dose, fonte e forma de aplicação do fertilizante (Santos, 2002) e o método de amostragem do solo (Alvarez V., 1996), mas ainda é difícil modelar a influência destes fatores.

Desta forma, o suprimento do nutriente i proveniente do solo ($I_{i\text{ extr}}$, em kg ha^{-1}) pode ser estimado pela equação:

$$I_{i\text{ extr}} = \frac{T_{i\text{ solo}}}{j_{i\text{ extr}}} PE_{rz} 10 \quad (5.2)$$

em que PE_{rz} é a profundidade efetiva do sistema radicular das plantas, expressa em metros e 10 é um fator para obtenção do suprimento em kg ha^{-1} . Assumiu-se PE_{rz} igual a 0,20 m, para a fase de estabelecimento, e igual a 0,15 m para a fase de utilização, devido à maior concentração radicular das gramíneas forrageiras na camada de 0 a 15 cm do solo (Gama R. e Cadima Z., 1991; Friesen et al., 1997; Rao et al., 1998; Kanno et al., 1999a; Bono et al., 2000).

Para o N, a equação 5.2 não se aplica devido à inexistência de análise química do solo para fim da adubação. A alternativa é estimar a quantidade de N mineralizado a partir do N ligado a compostos orgânicos do solo (N-org). A estimativa mais precisa do suprimento de N é dada por meio da própria produção vegetal (conteúdo de N) em cultivos sem a adição de fertilizante nitrogenado (Johnson, 1991; Osmond et al., 2002). No entanto, é mais comum a predição da mineralização por meio de modelos empíricos, destacando-se o de cinética exponencial de primeira ordem (Black, 1993; Benbi e Richter, 2002):

$$N_m = \left[N_o \left(1 - e^{-k_{MO} t} \right) \right] d \quad (5.3)$$

em que N_m é a quantidade de N mineralizado (mg dm^{-3}) em t dias; N_o é o N potencialmente mineralizável (mg kg^{-1}); k_{MO} é a constante de mineralização da matéria orgânica do solo (dia^{-1}) e d a densidade do solo³ (kg dm^{-3}). Assumiu-se $d = 1 \text{ kg dm}^{-3}$ para facilitar os cálculos. Utilizando as equações 5.2 e 5.3, o suprimento de N pode ser estimado por:

³ Os valores de N_m e N_o são normalmente expressos em mg kg^{-1} e o de N total do solo em dag (ou g) kg^{-1} . Para a conversão para unidades com base em volume é necessária a densidade do solo.

$$I_{N_{extr}} = \left[N_o \left(1 - e^{-k_{MO} t} \right) \right] PE 10 \quad (5.4)$$

Como sugerido por Freire (2001), estimou-se o N potencialmente mineralizável (N_o) a partir do teor de N total (N_t , mg kg⁻¹) empregando-se valores médios para a razão N_o/N_t . O N_t pode ser estimado a partir da matéria orgânica do solo (MO_{solo} , dag kg⁻¹) pela equação⁴:

$$\hat{N}_t = 666,54^{***} + 191,692^{***} MO_{solo} \quad R^2 = 0,791 \quad (5.5)$$

Em princípio, tentou-se estimar o N potencialmente mineralizável e a constante de mineralização (k_{MO}) a partir de relações com os teores de MO_{solo} e de argila. No entanto, as correlações significativas apresentaram $r < 0,50$. Assim, optou-se, inicialmente, por valores médios: $N_o/N_t = 0,0911 \pm 0,0595$ e $k_{MO} = 0,0165 \pm 0,0141$ dia⁻¹ (Oliveira, 1987; Camargo et al., 1997; Santos, 2001). A amplitude dos valores de N_o/N_t e de k_{MO} demonstra que os solos variam em relação à quantidade de N-org lábil ou potencialmente mineralizável e em relação à atividade microbiana (Benbi e Richter, 2002). No entanto, utilizando apenas os dados obtidos por Santos (2001), foi possível relacionar os valores da constante de mineralização (k_{MO} , em dia⁻¹) com o P-remanescente (P-rem, em mg L⁻¹)⁵:

$$\hat{k}_{MO} = 0,00046 + 0,000308^{***} P - rem \quad R^2 = 0,614 \quad (5.6)$$

O P-rem é utilizado como índice relacionado à textura e à mineralogia da fração argila e estes fatores afetam a mineralização da matéria orgânica. A argila participa na formação de complexos organo-minerais e na adsorção de enzimas que podem resultar em proteção da MO_{solo} ao ataque microbiano, diminuindo sua mineralização (Camargo et al., 1997).

⁴ $\forall$ MO entre 0,72 e 20,21 dag kg⁻¹; $b_0 = 666,54 \pm 82,71$; $b_1 = 191,692 \pm 15,382$; $s_{erro} = 326,76$ mg kg⁻¹. *** significativo a 1 %. **Fonte:** Oliveira (1987); Camargo et al. (1997); Santos (2001).

⁵ $\forall$ P-rem entre 18,5 e 55,4 mg L⁻¹; $b_0 = 0,000461 \pm 0,002705$; $b_1 = 0,000308 \pm 0,000074$; $s_{erro} = 0,00333$ dia⁻¹. *** significativo a 0,1 %. **Fonte:** Santos (2001).

A equação 5.6 foi adotada para os cálculos no submodelo solo; entretanto, ressalta-se que a amplitude do P-rem dos solos utilizados para esse ajuste compromete a confiabilidade das estimativas da constante de mineralização (k_{MO}) em solos com P-rem < 18,5 mg L⁻¹. Desta forma, assumiu-se, em solos com P-rem < 18,5 mg L⁻¹, um valor fixo para a constante de mineralização ($k_{MO} = 0,0062 \text{ dia}^{-1}$) correspondente ao P-rem = 18,5 mg L⁻¹ (Figura 5.1). Observou-se também que o P-rem = 30 mg L⁻¹ define dois grupos de solos quanto à constante de mineralização. Para o grupo de solos que apresentam P-rem < 30 mg L⁻¹ tem-se $k_{MO} = 0,0075 \pm 0,0030 \text{ dia}^{-1}$ enquanto que para P-rem = 30 mg L⁻¹ tem-se $k_{MO} = 0,0153 \pm 0,0036 \text{ dia}^{-1}$.

Diferentemente dos demais nutrientes, considerou-se para a fase de utilização da pastagem que a capacidade do solo em suprir N é três vezes menor do que a estimada pela equação 5.4, assumido-se que: a mineralização do N ligado a compostos orgânicos é estimulada pelo preparo do solo, calagem e adubação; em solos de pastagem de gramínea C₄ as taxas de mineralização são reduzidas após o estabelecimento (Myers et al., 1986; Robbins et al., 1987, 1989); e há uma tendência de acúmulo líquido de C e N em solos de pastagem (Bernoux et al., 1999; Koutika et al., 1999).

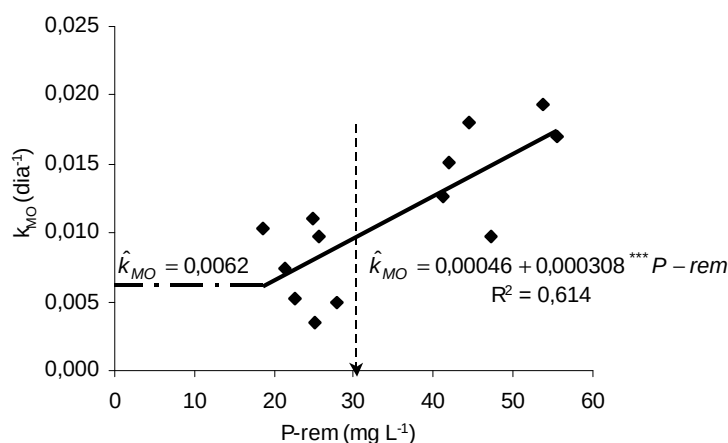


Figura 5.1. Relação entre a constante de mineralização da matéria orgânica do solo (k_{MO}) e o fósforo remanescente (P-rem) estabelecida por meio de equação de regressão.

5.2.2. Suprimento de nutrientes provenientes da decomposição dos resíduos vegetais

A liberação dos nutrientes dos resíduos vegetais pode ser estimada a partir da decomposição de sua matéria orgânica (MO_r), que semelhantemente a da matéria orgânica do solo pode ser estimada pelo modelo exponencial de primeira ordem. No entanto, há diferenças entre a constante de decomposição da MO_r (k_r) e as constantes de liberação dos nutrientes. Geralmente, a constante de decomposição da matéria orgânica dos resíduos é maior do que a constante de liberação do N e do P e menor do que a constante do K (Thomas e Asakawa, 1993; Robbins et al., 1989). Thomas e Asakawa (1993) verificaram tendência de imobilização de Ca durante o processo de decomposição dos resíduos de gramíneas, mas consideraram que, de modo geral, a liberação de Ca e Mg é proporcional à decomposição da MO_r .

Assim, a estimativa do suprimento do nutriente i proveniente dos resíduos vegetais ($?_{i\ r}$, em $kg\ ha^{-1}$), em determinado período (t , em dias), é obtida por:

$$l_{i\ t} = \left(\frac{T_{i\ r\ pl} M_{r\ pl}}{100} \right) (1 - e^{-k_{i\ r} t}) \quad (5.7)$$

em que $T_{i\ r\ pl}$ é o teor do nutriente i ($dag\ kg^{-1}$) nos resíduos vegetais (Equação 4.13), $M_{r\ pl}$ é a produção anual de MS de resíduos ($kg\ ha^{-1}$) da parte aérea das plantas (Equação 4.6), $k_{i\ r}$ é a constante de liberação do nutriente i desses resíduos ($dias^{-1}$). Com base nos trabalhos de Robbins et al. (1989) e Thomas e Asakawa (1993), adotaram-se constantes de liberação de N, P e S 10 % menores do que a constante de decomposição da matéria orgânica dos resíduos (k_r). Estabeleceu-se constante de liberação do K 70 % maior do que k_r ; e valores iguais a k_r para as constantes de liberação de Ca e Mg. Ressalta-se que a liberação de nutrientes dos resíduos de gramíneas ocorre em taxas menores ou iguais à capacidade de absorção pelas raízes, o que implica pequena lixiviação de nutrientes durante a decomposição (Ayarza, 1988; Thomas e Asakawa, 1993; Friesen et al., 1997).

A partir da composição química dos resíduos tem-se buscado prever a constante de decomposição de sua matéria orgânica ou, o que é mais importante, a liberação dos nutrientes. A maioria das equações propostas utiliza relações entre C, N, lignina e polifenóis. A relação C/N é considerada um índice geral de qualidade de resíduos de origem animal e vegetal (Heal et al., 1997; Seneviratne, 2000); no entanto, diferenças na biodegradabilidade dos compostos orgânicos diminuem a capacidade preditiva dessa relação (Heal et al., 1997). Esses autores consideraram que para resíduos de cereais com teores de lignina menores do que 10 a 15 dag kg⁻¹, a relação C/N entre 50 a 100 possui razoável capacidade de prever a constante de decomposição dos resíduos. Nesse caso, maior relação C/N é reflexo de menores teores de N e não de variações na proporção dos compostos orgânicos. Em resíduos com relações C/N maiores do que 75 a 100, a relação lignina/N tende a ser um melhor estimador para predição da constante de decomposição dos resíduos (Heal et al., 1997).

Considerando que os teores de lignina e a relação C/N de gramíneas forrageiras de regiões tropicais (Robbins et al., 1989; Thomas e Asakawa, 1993; Schunke, 1998; Monteiro et al., 2002) são comparáveis aos relatados para cereais (Heal et al., 1997), estimou-se a constante de decomposição da matéria orgânica dos resíduos (k_r) em função da relação C/N por meio da equação⁶:

$$\hat{k}_r = -0,00187 + 0,512785^{**} \frac{1}{C/N} \quad R^2 = 0,752 \quad (5.8)$$

Desta forma, considerando um teor de C médio de $48,1 \pm 3,6$ dag kg⁻¹ (Thomas e Asakawa, 1993; Schunke, 1998; Monteiro et al., 2002) e a estimativa do teor de N nos resíduos (Equação 4.14; Figura 4.3) é possível estimar a relação C/N e, conseqüentemente, os valores de constante de decomposição da MO (k_r) e de liberação dos nutrientes dos resíduos ($k_{i\ r}$).

⁶ $\forall$ C/N entre 34,3 e 130,1; $b_0 = -0,00187 \pm 0,00199$; $b_1 = 0,512785 \pm 0,111304$; $s_{\text{erro}} = 0,00264$ dia⁻¹. ** significativo a 1 %. **Fonte:** Robbins et al. (1989); Thomas e Asakawa (1993); Schunke (1998).

Considerou-se a produção anual de resíduos vegetais ($M_{r\ pl}$), mas sugeriu-se que a estimativa do suprimento dos nutrientes provenientes dos resíduos vegetais (ρ_i) fosse feita apenas para a estação de crescimento das plantas, quando as condições climáticas favorecem a decomposição. Além disso, optou-se por não computar no balanço a fração dos resíduos decomposta e dos nutrientes liberados no restante do ano e nos anos subseqüentes ao estabelecimento. Essas quantidades de nutrientes foram consideradas uma reserva de sustentabilidade para garantir que não se esgotem as reservas dos nutrientes do solo. Considerando resíduos com relação C/N entre 50 e 100 e uma estação de crescimento de 180 dias, a fração não decomposta varia entre 22 a 55 %, sendo ainda maior quando se considera a liberação de N, P e S. A reciclagem de nutrientes via resíduos diminui com o aumento da eficiência de utilização da forragem (U_{t_f}), uma vez que a relação entre a produção de parte aérea ($M_{pa\ pl}$) e dos resíduos ($M_{r\ pl}$) aumenta (Equação 4.5). Assim, para garantir uma reserva de sustentabilidade, adotou-se o seguinte critério:

- Se a $U_{t_f} = 35\%$, então $\rho_i = 0$;
- Se a $U_{t_f} > 35\%$, então ρ_i é calculada por:

$$\rho_i = \left[\frac{C_{ilt} \cdot M_{lt\ pl}}{100} - I_{ilt} \right]_{U_{t_f}=35\%} - \left[\frac{C_{ilt} \cdot M_{lt\ pl}}{100} - I_{ilt} \right]_{U_{t_f}=\text{sistema produtivo}} \quad (5.9)$$

Deste modo, a quantidade do nutriente i estimada para manutenção de uma reserva de nutrientes no solo (ρ_i , em kg ha^{-1}) pode ser subtraída do suprimento do nutriente (Equação 5.1) e, conseqüentemente, será adicionada via fertilizantes. Assim como no modelo de Santos (2002), neste não se considerou a aplicação adicional de P para sustentabilidade, por ser um nutriente que se acumula no solo com as aplicações de fertilizantes.

5.2.3. Suprimento de nutrientes provenientes da deposição de fezes e urina

A contribuição das excretas ($\rho_{i\ ex}$) para o suprimento de nutrientes (Equação 5.1) depende da proporção da área da pastagem afetada por excretas, da taxa de liberação dos nutrientes das excreções e da taxa de recuperação dos nutrientes pelo pasto (Morton e Baird, 1990; CIAT, 1991; Haynes e Williams, 1993).

Os nutrientes excretados na urina (Quadro 3.3; Equação 3.21) são prontamente disponíveis para as plantas ou formam compostos rapidamente mineralizáveis (uréia, aminoácidos). No entanto, isso não significa que esses nutrientes são totalmente recuperados pelas plantas. As perdas de N e K por lixiviação e, ou, por emissão de gases (NH_3 ; N_2O ; N_2) são relevantes (> 40 %) devido às elevadas doses, que podem atingir 1000 kg ha^{-1} de N e 900 kg ha^{-1} de K, adicionadas na área coberta pela urina (Barrow, 1987; Ayarza, 1988; Haynes e Williams, 1993; Ferreira, 1995; Williams e Haynes, 2000).

A liberação dos nutrientes das fezes está associada ao processo de quebra física, pelo impacto das gotas de chuva e pelo pisoteio dos animais, e pela ação da mesofauna e dos microrganismos (Haynes e Williams, 1993). A liberação do P, presente principalmente em forma inorgânica, depende da quebra física das fezes e da lixiviação do P para o solo. O P em compostos orgânicos nas fezes apresenta mineralização bastante lenta (Barrow, 1987). A degradação microbiana é essencial à liberação de N e S e, em geral, a mineralização desses nutrientes é mais lenta nas fezes do que nos resíduos das plantas. Para Ca e Mg, aceita-se que a liberação é proporcional à decomposição da matéria orgânica das fezes (Barrow, 1987; Haynes e Williams, 1993).

Os nutrientes provenientes da deposição de fezes e urina ($\rho_{i\ ex}$, em kg ha^{-1}) que se tornam disponíveis às plantas foi estimado por:

$$I_{i\ ex} = EX_{i\ an} \left(\frac{E_1 + E_2}{100} \right) j_{i\ ex} \quad (5.10)$$

em que $EX_{i\ an}$ é quantidade de nutrientes excretada pelos animais (kg ha^{-1}) (Equação 3.19), E_1 e E_2 são as proporções da área da pastagem (%) afetadas

por uma e duas excreções durante o período de pastejo (Equação 3.21) e $f_{i\text{ ex}}$ é a recuperação pela plantas dos nutrientes das excretas.

Com a equação 5.10 pressupõe-se que a área da pastagem afetada por mais de duas excreções é menos produtiva devido ao maior pisoteio pelo animais (Haynes e Williams, 1993) e que a quantidade de nutrientes depositada é proporcional à área afetada por uma e duas excreções. Além disso, assumiu-se, hipoteticamente, que esses nutrientes são distribuídos em toda a pastagem, ou seja, que ficariam igualmente disponíveis para todas as plantas, por não ser possível identificar os locais exatos de deposição das excretas.

Os valores adotados para recuperação pela plantas dos nutrientes das excretas ($f_{i\text{ ex}}$) são aproximativos devido à grande variabilidade das estimativas encontradas em um pequeno número de pesquisas que avaliaram tanto a liberação de nutrientes das excretas quanto a posterior absorção pelas plantas. Assim, assumiram-se os valores de 0,40 N; 0,45 P; 0,45 K; 0,70 Ca; 0,70 Mg e 0,35 S (Barrow, 1987; Ayarza, 1988; Thomas, 1992; Haynes e Williams, 1993; Ferreira, 1995; Williams e Haynes, 2000; Braz, 2001).

5.3. Doses recomendadas dos nutrientes

Expressou-se em termos de dose (kg ha^{-1}) tanto a demanda (Equação 4.10) quanto o suprimento dos nutrientes (Equação 5.1), assim a dose recomendada do nutriente i (DR_i) foi estimada por:

$$DR_i = d_{i\text{ pl}} - l_{i\text{ solo}} \quad (5.11)$$

Se essa diferença for positiva recomenda-se a aplicação do fertilizante; se for negativa ou nula (suprimento maior ou igual à demanda) não se recomenda a aplicação de fertilizantes.

Essa equação estima a dose dos nutrientes considerando que o fertilizante será incorporado na camada de 0 a 20 cm, quando do estabelecimento da pastagem, ou aplicado a lanço em toda a área da pastagem em adubações de cobertura.

Na fase de estabelecimento da pastagem, tem-se um aumento da eficiência da adubação e redução da dose de fertilizante quando a adubação fosfatada é feita em sulcos juntamente com as sementes das forrageiras. Black (1993) destacou que o aumento na eficiência da adubação depende do balanço entre dois fatores contrários: o volume de solo e o volume de raízes em contato com o fertilizante. Por um lado, reduzindo-se o volume de solo em contato com uma dose de P há um aumento localizado na concentração do nutriente e, conseqüentemente, maior disponibilidade para as plantas, porém uma menor área radicular teria condição para absorver o P neste volume de solo (Black, 1993). Em solos de regiões tropicais com elevada capacidade de adsorção de P, no entanto, espera-se que a absorção deste nutriente relacione-se estreitamente com a concentração do sistema radicular no volume de solo em contato com o fertilizante fosfatado aplicado localizadamente (Novais e Smyth, 1999).

A dificuldade é estabelecer a equivalência entre a dose a ser aplicada no sulco de plantio e a dose para aplicação a lanço e incorporada na camada de 0 a 20. A partir do trabalho de Fonseca (1995), estimaram-se⁷ doses localizadas de quatro a seis vezes menores do que as doses não-localizadas para equivalentes produção de MS e absorção de P no estabelecimento de gramíneas forrageiras em campo. Neste sentido, adotou-se cinco como fator de redução da dose aplicada a lanço para a dose localizada (sulco ou cova).

5.4. Recomendação de calagem

A elevada acidez pode limitar a produtividade na agricultura na maioria dos solos tropicais. A toxidez por Al^{3+} e a deficiência de Ca^{2+} e Mg^{2+} , principalmente, podem restringir o crescimento radicular, prejudicando a nutrição das plantas e a absorção de água. No entanto, muitas gramíneas forrageiras de regiões tropicais toleram saturação por alumínio (m) superior a 50 %. Assim, a resposta dessas plantas à calagem deve-se, principalmente, ao fornecimento de Mg e, de modo particular, de Ca (CIAT, 1980, 1981, 1982;

⁷ Em campo, as doses não-localizadas foram aplicadas a lanço e incorporadas na camada de 0 a 10 cm. As doses localizadas foram aplicadas no fundo de sulcos de 4 cm de profundidade espaçados de 20 cm. Para o cálculo do volume de sulcos, adotou-se a largura de 6 cm.

Rao, 2001). De fato, há constatações de que doses de apenas 0,5 e 1,0 t ha⁻¹ de calcário que condicionaram valores de m de 85 e 75 %, respectivamente, proporcionaram produções de *Brachiaria humidicola* e *B. decumbens* semelhantes àsquelas obtidas com a aplicação de P e sem a aplicação de calcário (m = 92%) (CIAT, 1980; 1981).

Para estimar a necessidade de calagem, ou seja, a dose de calcário recomendada, foi adotado o método da neutralização da acidez trocável e elevação dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ (Alvarez V. e Ribeiro, 1999). Dessa forma, no submodelo solo, a necessidade de calagem (NC, em t ha⁻¹) é estimada por:

$$NC = Y \left[Al^{3+} - (m_t t / 100) \right] + \left[X - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \right] \quad (5.12)$$

em que Y é um valor variável em função da capacidade tampão da acidez do solo; Al³⁺ é a acidez trocável (cmol_c dm⁻³); m_t é a saturação por Al³⁺ máxima tolerada pela cultura (%); t é a CTC efetiva (cmol_c dm⁻³); X é o valor da soma dos teores críticos de Ca²⁺ e Mg²⁺ no solo (cmol_c dm⁻³), variável em função da demanda destes nutrientes pela cultura; e Ca²⁺ e Mg²⁺ são os teores de Ca e de Mg trocáveis do solo (cmol_c dm⁻³).

O valor de Y, relativo a capacidade tampão da acidez, pode ser estimado em função do teor de argila do solo (arg, em %):

$$\hat{Y} = 0,0302 + 0,06532 \text{ arg} - 0,000257 \text{ arg}^2 \quad R^2 = 0,999 \quad (5.13)$$

ou do valor do P-remanescente (P-rem, em mg L⁻¹):

$$\hat{Y} = 4,002 - 0,125901P - \text{rem} + 0,001205P - \text{rem}^2 - 0,00000362P - \text{rem}^3 \quad R^2 = 0,999 \quad (5.14)$$

O valor da saturação por Al³⁺ máxima tolerada pela cultura (m_t) é variável com a espécie forrageira. Deste modo, adotou-se, no FERTICALC-Pastagem, m_t = 25 % para *Panicum maximum*; m_t = 30 % para *Brachiaria brizantha* cv. Marandu; e m_t = 40 % para *B. decumbens* e *B. humidicola*.

Ressalta-se que esse método para estimativa da necessidade de calagem apresenta dois componente: $Y \left[Al^{3+} - (m_t t / 100) \right]$, relativo à

neutralização da acidez trocável até a saturação por Al^{+3} máxima tolerada pela cultura, considerando a capacidade tampão de acidez do solo; e $\left[X - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \right]$, relativo às exigências da cultura por Ca^{2+} e Mg^{2+} (Alvarez V. e Ribeiro, 1999). Isso permitiu, utilizando o componente relativo às exigências nutricionais da cultura, tornar a recomendação de calagem variável com a demanda de Ca e Mg estimada com o balanço nutricional. Para tanto, é necessário estimar o valor crítico de X, o que é feito com base na transformação das demandas de Ca e Mg ($\delta_{i\ pl}$, em $kg\ ha^{-1}$; Equação 4.10) em teores destes nutrientes no solo, em $cmol_c\ dm^{-3}$:

$$X = \left(\frac{d_{Mg\ pl} \cdot j_{Mg\ extr}}{243} \right) + \left(\frac{d_{Ca\ pl} \cdot j_{Ca\ extr}}{400} \right) \quad (5.15)$$

em que $\varphi_{Ca\ ext}$ e $\varphi_{Mg\ ext}$ são as taxas de recuperação pelo extrator para Ca e Mg (Quadro 5.1) e 400 e 243 são fatores que incluem a correção para a camada de solo de 0 a 0,2 m de profundidade e para obter o valor de X em $cmol_c\ dm^{-3}$ de Ca^{2+} e de Mg^{2+} , respectivamente.

5.5. Discussão

O submodelo solo é baseado na análise química do solo que é um procedimento empírico para avaliar a disponibilidade dos nutrientes. O princípio deste submodelo é converter teores dos nutrientes extraídos por soluções químicas e indicadores da disponibilidade em quantidades dos nutrientes efetivamente disponíveis. Para tanto, utilizaram-se taxas de recuperação dos extratores obtidas por equações que relacionam quantidades de nutrientes adicionados ao solo com os teores extraídos (Quadro 5.1). Assim, a partir dos resultados da análise de solo estimam-se as doses equivalentes aos teores dos nutrientes. Pressupõe-se que essas doses correspondam à disponibilidade efetiva dos nutrientes. No entanto, não se transforma o disponível por extratores em disponível de fato, mas sim parte-se da estreita correlação que deve existir entre essas grandezas.

Modelos mecânicos baseiam-se na “teoria do suprimento de nutrientes”, que depende dos fatores: intensidade, quantidade e fator capacidade (Black, 1993), além dos mecanismos de transporte dos nutrientes no solo e de absorção (Barber, 1995; Tinker e Nye, 2000). Modelos, como o submodelo solo, que ligam diretamente a demanda das plantas e a disponibilidade dos nutrientes do solo, omitindo a atividade do sistema radicular, foram denominados por Tinker e Nye (2000) como “*models without roots*”. Esses autores destacaram que apesar de ignorarem mecanismos importantes para a nutrição de plantas, isso não descredencia, necessariamente, tais modelos, que são de grande praticidade.

A amostragem de solo é a primeira etapa para a eficiência deste submodelo, pois o solo propicia a maior contribuição ($\rho_{i \text{ extr}}$) para o suprimento dos nutrientes estimado pela equação 5.1. A precisão e exatidão com que a amostra representa o solo de uma gleba dependem da sua variabilidade e da forma pela qual a amostra é obtida. Em solos sob pastagem há elevada variabilidade em suas características, inclusive com tendência para dependência espacial, sendo, portanto, georeferenciáveis (West et al., 1989). Isso ressalta a importância de linhas de pesquisa que objetivem estimar a variabilidade da disponibilidade dos nutrientes no solo e a evolução dessa variabilidade após o estabelecimento e desenvolver ou validar métodos de amostragem apropriados para pastagens tropicais. Atualmente, como alternativas mais eficientes em relação ao tradicional caminhar em zig-zag, em toda a área, tem-se sugerido a amostragem em dois estágios (*cluster*) (Friesen e Blair, 1984) e em zonas estabelecidas em função da distância a partir de áreas de descanso dos animais (Wilkinson et al., 1989; Matthews et al., 1994b).

Além da análise do solo, a estimativa do suprimento de nutrientes ($\rho_{i \text{ solo}}$) depende da liberação dos nutrientes dos resíduos ($\rho_{i \text{ r}}$), estimada com base na decomposição de sua matéria orgânica (MO_r). A constante de decomposição dos resíduos vegetais (k_r) foi estimada em função da sua relação C/N (Equação 5.8) e esta equação, à semelhança da obtida por Seneviratne (2000), apresentou bom ajuste. No entanto, ressalta-se que a estimativa da decomposição da MO_r em função apenas da relação C/N deve ser analisada com cuidado, devido às mudanças nos fatores climáticos,

edáficos, biológicos e de qualidade dos resíduos vegetais que afetam essa decomposição em intervalos de tempo maiores do que os normalmente utilizados para caracterizar a constante de decomposição (k_r) (Heal et al., 1997). Neste sentido, a inclusão dos fatores climáticos, temperatura e pluviosidade, em modelos preditivos da decomposição é, muitas vezes, mais importante do que a inclusão de variáveis da qualidade dos resíduos vegetais (Robbins et al., 1989; Heal et al., 1997). Thomas e Asakawa (1993), por exemplo, verificaram que a decomposição de forrageiras (gramíneas e leguminosas) correlacionou-se com a relação lignina/N, mas o melhor modelo foi obtido com a inclusão da precipitação em uma regressão múltipla.

No submodelo solo, a fração dos resíduos vegetais não decomposta durante a estação de crescimento das plantas foi utilizada no balanço para garantir o não esgotamento das reservas dos nutrientes do solo. Em sistemas de balanço nutricional, em que as recomendações de adubação são baseadas apenas na diferença entre a demanda nutricional da cultura e seu suprimento pelo solo pode-se, a médio e a longo prazos, esgotar as limitadas reservas de nutrientes dos solos mais intemperizados das regiões tropicais. Atualmente, esse problema tem sido evitado estabelecendo-se teores de nutrientes que devem ser mantidos no solo ou de doses de fertilizantes suplementares necessárias à sustentabilidade do sistema, que equivalem a uma fração das quantidades de nutrientes exportadas pelo produto comercial da cultura (Freire, 2001; Oliveira, 2002; Santos, 2002).

Na modelagem do balanço nutricional da pastagem, consideram-se as quantidades de nutrientes requeridos para a sustentabilidade equivalentes aos nutrientes contidos nos resíduos vegetais não decompostos, pressupondo que estes serão, a médio e a longo prazos, mineralizados. Para garantir a sustentabilidade dos sistemas pecuários intensivos com menor produção relativa de resíduos vegetais, estabeleceu-se como limite mínimo para sustentabilidade o aporte de uma quantidade de nutrientes potencialmente reciclado para uma condição de eficiência de utilização de forragem (U_f) igual a 35 % (Equação 5.9). Assim, se a eficiência de utilização de forragem for maior que 35 %, o modelo estima a diferença entre o aporte efetivo de nutrientes e o aporte caso a eficiência de utilização de forragem seja de 35 %, e esta diferença é convertida em dose de fertilizante. Neste sentido, simulou-se

que o aporte anual de nutrientes para sustentabilidade varia de 10 a 20 % da demanda do pasto. Para o Ca, que não apresenta remobilização nas plantas, esse valor pode chegar a 40 %.

Ressalta-se que os nutrientes não liberados durante a decomposição das excretas também contribuem para manutenção de uma reserva, mas optou-se por não contabilizá-la devido à desuniformidade na distribuição espacial das excretas. As estimativas da reciclagem de nutrientes por meio das excretas podem ser aperfeiçoadas com a quantificação dos nutrientes excretados nas fezes e na urina. A produção de fezes e os nutrientes nestas poderiam ter sido quantificados a partir das estimativas do consumo e da digestibilidade da dieta dos animais e da partição dos nutrientes entre fezes e urina. No entanto, optou-se por um tratamento mais simplificado dessa questão, devido à dificuldade de estimar as perdas para nutrientes em cada tipo de excreta, à recuperação destes pelas forrageiras e o efeito da distribuição espacial sobre estes aspectos.

6. SIMULAÇÕES COM O SISTEMA

Para realizar simulações com o FERTICALC-Pastagem, tomaram-se os resultados analíticos de dez amostras de solo analisadas no Laboratório de Rotina do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (Quadro 6.1) e sete sistemas de produção hipotéticos (Quadro 6.2). Esses sistemas de produção apresentam espécie, ganho de peso do animais (Quadro 4.1), taxa de lotação e eficiência de utilização de forragem de acordo com suas características tecnológicas. Os valores adotados para a digestibilidade *in vitro* são compatíveis com as forrageiras (Pereira et al., 1992a; Euclides et al. 1999; 2000; Euclides e Medeiros, 2003). Para todos os sistemas foram consideradas pastagens de 20 ha e bovinos zebuínos ou cruzados (zebuíno x taurino) não-castrados, com 350 kg de peso vivo tendo o pasto como único alimento durante 200 dias, correspondentes à estação de crescimento das plantas.

As simulações das recomendações de adubação foram feitas para as fases de estabelecimento e de utilização da pastagem. No entanto, devido ao grande número de resultados gerados, decidiu-se por apresentar os resultados das simulações para apenas três sistemas de produção¹ que se caracterizam por baixa, média e alta produtividade.

Além de gerar estimativas de recomendação de adubação, o FERTICALC-Pastagem pode ser utilizado para avaliar variações na reciclagem

¹ Os demais resultados das simulações foram apresentados no apêndice.

Quadro 6.1. Resultados analíticos de dez amostras de solo analisadas no Laboratório de Rotina do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa¹

Solo	pH (H ₂ O)	P	S ²	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	t	CTC	V	m	MO _{solo}	P-rem
		----- mg dm ⁻³ -----			----- cmol _c dm ⁻³ -----						---- % ----		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹
1	4,44	0,2	0,76	4	0,14	0,05	1,40	7,40	1,60	7,60	3	88	2,43	4,50
2	4,83	1,4	3,52	50	1,80	0,76	0,48	5,60	3,17	8,29	32	15	4,73	8,30
3	4,57	3,7	4,41	32	0,42	0,20	1,30	4,80	2,00	5,50	13	65	3,05	17,50
4	5,08	2,7	4,85	110	4,70	0,99	0,12	8,80	6,09	14,77	40	2	4,62	21,60
5	5,12	1,9	3,66	55	1,87	0,85	0,12	4,40	2,98	7,26	39	4	2,43	26,40
6	5,41	16,1	8,35	200	0,66	0,35	0,00	1,70	1,52	3,22	47	0	1,73	32,70
7	6,20	4,8	4,01	80	2,17	0,56	0,00	0,10	2,93	3,03	97	0	0,70	35,90
8	5,49	1,0	4,17	42	2,10	0,46	0,24	3,60	2,91	6,27	43	8	2,42	41,90
9	5,15	1,2	3,56	10	1,52	0,22	0,48	4,60	2,25	6,37	28	21	1,85	48,70
10	5,19	0,8	4,03	27	1,17	0,37	0,24	3,20	1,85	4,81	34	13	1,78	55,40

¹ K e P extraídos com Mehlich-1; Ca²⁺ e Mg²⁺ com KCl; S com Ca(H₂PO₄)₂ + HOAc.

Quadro 6.2. Características de sete sistemas de produção de bovinos de corte requeridas pelo FERTICALC-Pastagem para estimar recomendações de adubação e calagem

Sistema ¹	Ganho de peso diário ²	Taxa de lotação ⁴		Espécie forrageira ²	Digestibilidade da forrageira ³	Ut _f ²	f _{est} ⁵
	kg (an dia) ⁻¹	UA ha ⁻¹	an ha ⁻¹		%	%	
1	0,20	0,50	0,64	<i>B. humidicola</i>	56,0	10	0,10
2	0,30	0,75	1,00	<i>B. decumbens</i>	58,0	17	0,15
3	0,40	1,25	1,60	<i>B. decumbens</i>	60,0	25	0,20
4	0,50	3,00	3,89	<i>B. brizantha</i>	62,0	35	0,20
5	0,60	5,00	6,43	<i>B. brizantha</i>	65,0	55	0,20
6	0,70	8,00	10,30	<i>P. maximum</i>	67,0	75	0,20
7	0,80	7,00	9,00	<i>P. maximum</i>	67,0	65	0,20

¹ Todas as pastagem apresentam 20 ha. ² Espécies, ganhos de peso (Quadro 4.1) e eficiência de utilização de forragem (Ut_f) de acordo com as características tecnológicas dos sistemas de produção. ³ Digestibilidade *in vitro* da MS: valores compatíveis com as forrageiras (Pereira et al., 1992a; Euclides et al., 1999; 2000; Euclides e Medeiros, 2003). ⁴ Unidade animal (UA) foi definida como um animal de 450 kg de peso vivo. A lotação em animais por hectare foi estimada considerando animais de 350 kg. ⁵ Modificador de estacionalidade forrageira (Equação 4.3).

de nutrientes para diversas situações de fertilidade do solo, intensidade de exploração pecuária, manejo da pastagem, entre outros. Assim, decidiu-se por apresentar os resultados das simulações de cada submodelo separadamente, destacando as principais informações geradas para cada um deles e os principais passos na estimativa final da recomendação de adubação (Figura 2.1).

6.1. Submodelo animal

Como apresentado no fluxograma da Figura 2.1, os principais resultados gerados pelo submodelo animal são o consumo de MS e de nutrientes, a retenção e a excreção de nutrientes por animais em pastejo e as estimativas da porcentagem da área da pastagem afetada por um determinado número de excretas.

As simulações de consumo de MS pelos animais foram consideradas para pastagens estabelecidas (Quadro 6.3). Os valores de consumo foram estimados a partir das quantidades de energia líquida de manutenção ($EL_{m\ pl}$) e de ganho ($EL_{g\ pl}$) da forragem disponível e do nível de performance animal esperado, expresso em termos de requerimentos de energia líquida de manutenção ($EL_{m\ an}$) e de ganho ($EL_{g\ an}$) dos animais. Destaca-se que, como as características dos animais e o tamanho da pastagem (20 ha) foram os mesmos para todos os sistemas, o valor do requerimento de energia líquida de manutenção foi constante. Assim, as variações no consumo individual foram função, exclusivamente, dos diferentes requerimentos de energia líquida de ganho. Os valores de consumo individual variaram entre 2,3 e 2,7 % quando expressos em relação ao peso vivo dos animais ($100 C_{an} / PV$). Essas estimativas são compatíveis com os valores esperados para bovinos de corte em pastejo (Pereira et al., 1992a; Euclides et al., 1999; 2000; Brâncio, 2001).

O consumo de nutrientes ($kg\ ha^{-1}$) foi estimado a partir dos teores dos nutrientes nas plantas ($T_{i\ pl}$) (Quadro 4.2) e com o consumo animal por hectare (C_{ha}). No sistema 6, o mais intensivo, as quantidades de nutrientes consumidas foram bastante elevadas (Figura 6.1a), sendo superiores a $260\ kg\ ha^{-1}$ de N e de K e a $35\ kg\ ha^{-1}$ de P. No sistema 2, mais extensivo, o consumo de N, P e K foi, respectivamente, de 24, 3 e $16\ kg\ ha^{-1}$. Com a intensificação do sistema de

Quadro 6.3. Valor energético da forragem (NDT, EM, $EL_{m\ pl}$, $EL_{g\ pl}$), requerimentos energéticos ($EL_{m\ an}$, $EL_{g\ an}$) e consumo de matéria seca (C_{an} , C_{ha}) por animais em pastejo estimados pelo FERTICALC-Pastagem para sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema ¹	NDT ² dag kg ⁻¹	EL ----- Mcal kg ⁻¹ -----	$EL_{m\ pl}$ ³ ----- Mcal kg ⁻¹ -----	$EL_{g\ pl}$ ³ ----- Mcal kg ⁻¹ -----	$EL_{m\ an}$ ⁴ ----- Mcal dia ⁻¹ -----	$EL_{g\ an}$ ⁴ ----- Mcal dia ⁻¹ -----	C_{an} ⁵ kg dia ⁻¹	C_{ha} ⁶ kg ha ⁻¹
1	52,6	1,90	1,06	0,51	7,59	0,53	8,20	1.050
2	53,8	1,95	1,10	0,55	7,59	0,83	8,40	1.680
3	55,0	1,99	1,14	0,58	7,59	1,13	8,58	2.746
4	56,2	2,03	1,18	0,62	7,59	1,45	8,74	6.801
5	58,0	2,10	1,25	0,68	7,59	1,77	8,71	11.202
6	59,2	2,14	1,29	0,71	7,59	2,10	8,84	18.216
7	59,2	2,14	1,29	0,71	7,59	2,43	9,31	16.751

¹ Sistemas caracterizados no quadro 6.2. ² Estimado no submodelo planta (Equação 4.1).

³ Quantidade de energia líquida de manutenção e de ganho da forrageira (Equações 3.1 e 3.2).

⁴ Requerimento de energia líquida de manutenção e de ganho associadas à performance dos animais (Equação 3.3 e Quadro 3.1). ⁵ Consumo diário de MS por animal (Equação 3.12).

⁶ Consumo de MS por hectare durante a estação de crescimento das plantas (Equação 3.15).

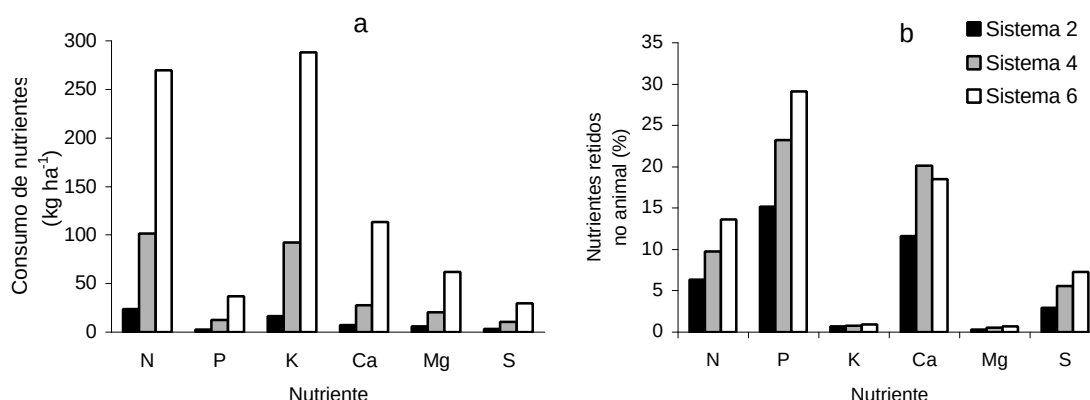


Figura 6.1. Consumo de nutrientes por animais em pastejo (a) e a porcentagem destes nutrientes que são retidos no animal (b) estimados pelo FERTICALC-Pastagem para sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6). Na estimativa do consumo de nutrientes foi considerado um consumo de 60 g animal⁻¹ dia⁻¹ de um suplemento mineral com: 6,5; 9,0 e 0,47 dag kg⁻¹ de P, Ca e S, respectivamente.

produção, o consumo dos nutrientes aumentou devido tanto ao maior consumo de forragem quanto ao teor dos nutrientes (Figura 2.1), considerando que a forrageira do sistema 2 foi a *B. decumbens* que possui menores teores dos nutrientes do que *P. maximum*, gramínea do sistema 6.

Com a intensificação do sistema, o aumento na retenção dos nutrientes no corpo dos animais (Figura 6.1b) foi, relativamente, menor do que o aumento ocorrido no consumo de nutrientes (Figura 6.1a), o que implica em maior quantidade de nutrientes excretadas via fezes e urina. Desta forma, como ressaltado por Thomas (1992), a reciclagem de nutrientes por meio da deposição de excretas é mais importante em sistemas intensivos, assim como o papel dos animais como agentes modificadores da fertilidade do solo. O aumento da retenção de nutrientes deve-se, principalmente, à maior performance animal nos sistemas mais produtivos. Os percentuais de retenção dos nutrientes verificados nas simulações são compatíveis com a magnitude relatada na literatura, entre 1 e 40 % (Wilkinson e Lowrey, 1973; Henzell e Ross, 1973; Haynes e Williams, 1993; Whitehead, 2000).

Destaca-se que as excreções não são distribuídas uniformemente, mas depositadas em locais específicos da pastagem, e que a superfície do solo ocupada por um excremento bovino recebe elevada quantidade de nutrientes. Isso implica alta porcentagem de perdas dos nutrientes reciclados via fezes e urina e intensa heterogeneidade espacial nos teores dos nutrientes em solos de pastagem (Barrow, 1987). Nas simulações feitas, sistemas extensivos, com menor taxa de lotação, resultaram em distribuição espacial das excretas mais heterogênea do que em sistemas com maior taxa de lotação (Figura 6.2).

6.2. Submodelo planta

A produção de MS da parte aérea ($M_{pa\ pl}$) das forrageiras estimada no FERTICALC-Pastagem relaciona-se diretamente com o consumo de forragem (C_{ha}) e inversamente com o sistema de pastejo expresso pela eficiência de utilização da forragem (U_{tr}) (Equações 4.2 e 4.3). Desta forma, maior consumo nem sempre implica maior produção de forragem. Durante a fase de utilização da pastagem, por exemplo, o consumo de forragem no sistema 2 foi 60 % maior do que no sistema 1 (Quadro 6.3), mas as produções de forragem ($M_{pa\ pl}$)

dos dois sistemas foram praticamente iguais (Quadro 6.4) devido à eficiência de utilização no sistema 2 ter sido 70 % maior (Quadro 6.2). A mesma tendência foi verificada nas simulações com os sistemas 6 e 7. Quanto menor a eficiência de utilização da forragem maior é a produção de resíduos vegetais (M_{rpl}) em relação à produção de forragem. O quadro 6.4 evidencia que os sistemas 4 e 5 apresentaram produção de forragem praticamente iguais, enquanto que a produção de resíduos vegetais foi maior no sistema 4 devido à menor eficiência de utilização da forragem.

Destaca-se que a utilização do FERTICALC-Pastagem requer uma escolha criteriosa do valor de eficiência de utilização da forragem, considerando o sistema de manejo da pastagem, a produção por animal (Quadro 4.1) e a categoria animal (Quadro 3.1). Maiores produtividade, por exemplo, devem estar associadas à menores valores de eficiência de utilização da forragem (U_t) dentro da faixa proposta para cada sistema de exploração e de manejo. O que se deseja simular é o maior desempenho animal associado à maior disponibilidade de forragem e, conseqüentemente, à maior capacidade dos animais em selecionar forragem de melhor qualidade.

A produção de forragem no ano de estabelecimento tende a ser menor do que a da fase de utilização da pastagem (Quadro 6.4), considerando que foi estabelecido nas simulações uma produção de 3.000 kg ha⁻¹ de MS para que o pasto seja considerado estabelecido, independentemente do sistema. Além

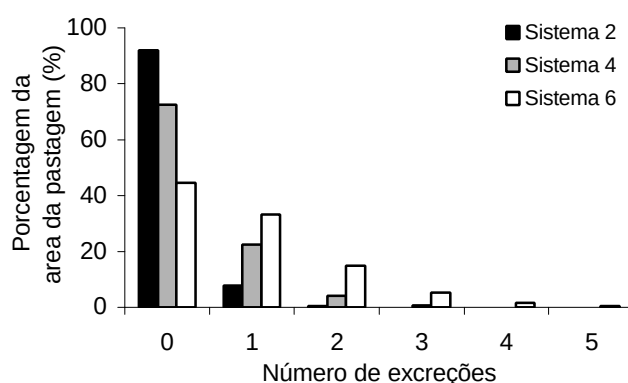


Figura 6.2. Porcentagem da área da pastagem afetada por 1, 2, ..., 5 excreções estimada pelo FERTICALC-Pastagem para sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6).

Quadro 6.4. Produção de matéria de seca de parte aérea, resíduos vegetais e raízes estimada pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em sete sistemas produção de bovinos de corte

Sistema	Produção de matéria seca		
	Parte aérea ¹	Resíduos vegetais ²	Raízes ³
----- kg ha ⁻¹ -----			
Fase de estabelecimento ³			
1	8.000	6.000	7.200
2	9.924	8.237	6.202
3	11.300	8.475	7.063
4	17.107	11.120	8.554
5	17.752	7.989	8.876
6	20.448	5.112	10.224
7	21.467	7.514	10.734
Fase de utilização			
1	11.662	10.496	---
2	11.629	9.652	---
3	13.731	10.298	---
4	24.289	15.788	---
5	25.460	11.457	---
6	30.361	7.590	---
7	32.213	11.275	---

¹ Equações 4.2 e 4.4, para a fase de estabelecimento, e equações 4.3 e 4.4, para a fase de utilização. ² Equação 4.6. ³ Equação 4.5.

disso, adotou-se um período mais longo para a fase de estabelecimento para o sistema 1 e, conseqüentemente, menor período de pastejo após esta fase. Para o sistema 1 foram considerados 120 dias para o estabelecimento da pastagem e 80 dias de pastejo; e para os demais sistemas foram 90 dias para o estabelecimento e 120 dias de pastejo.

A produção de raízes ($M_{rz\ pl}$) só foi computada para o ano de estabelecimento e foi função direta da produção de forragem ($M_{pa\ pl}$). Para diferenciar os sistemas de produção, foram adotados coeficientes alométricos (f_{rz}) diferentes para sistemas extensivos e intensivos. Nesta simulação, adotou-se $f_{rz} = 0,75$ para o sistema 1; $f_{rz} = 0,625$ para o sistema 2 e $f_{rz} = 0,50$ para os demais. Assim, a produção de raízes foi maior no sistema 1 do que no 2, apesar da maior produção de parte aérea no sistema 2 (Quadro 6.4).

A partir da produção de forragem e dos teores dos nutrientes ($T_{i\ pl}$) estimou-se o conteúdo nutricional (Quadro 6.5), que aumentou com a

Quadro 6.5. Conteúdo de nutrientes estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 1), média (sistema 2) e alta (sistema 6)

Sistema	Conteúdo dos nutrientes ¹					
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
----- kg ha ⁻¹ -----						
Fase de estabelecimento						
2	186,3	20,6	117,3	44,8	41,2	23,4
4	318,6	30,8	273,4	68,9	59,0	32,1
6	378,3	48,2	379,6	131,7	80,0	40,9
Fase de utilização						
2	166,3	15,1	112,8	44,2	40,7	20,9
4	361,9	34,0	330,3	85,0	72,9	36,4
6	449,3	48,6	479,7	170,0	103,2	48,6

¹ Equações 4.7 e 4.8 para as fases de estabelecimento e utilização, respectivamente.

intensificação do sistema de produção devido tanto ao aumento da produção quanto dos teores dos nutrientes das forrageiras utilizadas. Os teores dos nutrientes sugeridos na tabela 4.2 são: *P. maximum* > *B. brizantha* > *B. decumbens*. Destacam-se os elevados conteúdos estimados para N, 170 a 450 kg ha⁻¹, para K, 110 a 480 kg ha⁻¹, contrastando com baixos conteúdos de Ca e Mg, em todos os sistemas.

Ressalta-se que elevados conteúdos nem sempre implicam elevadas estimativas de demanda nutricional. De fato, nos sistemas 2 e 4 estimaram-se demandas de K e Mg para a fase de utilização da pastagem menores do que os conteúdos (Quadros 6.5 e 6.6), o que se deve a inclusão da remobilização dos nutrientes no cálculo da demanda. Isso é coerente, considerando que em pastagens a produção não é colhida de uma única vez, mas sim de forma segmentada ao longo da estação de crescimento e as plantas rebrotam recuperando sua biomassa e atendendo parte do conteúdo pela remobilização. No sistema de produção 6, que apresenta maior eficiência de utilização de forragem, há menor contribuição da remobilização e as demandas aumentaram em relação aos respectivos conteúdos.

Para Ca e P, as demandas foram sempre maiores do que os conteúdos (Quadros 6.5 e 6.6 e Figura 6.3). Para Ca, não se considerou a remobilização,

Quadro 6.6. Demanda de nutrientes estimada pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6)

Sistema	Demanda dos nutrientes ¹				
	Nitrogênio	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
----- kg ha ⁻¹ -----					
Fase de estabelecimento					
2	248,8	95,8	89,6	36,7	31,3
4	471,6	253,9	137,7	58,2	47,5
6	680,9	447,1	263,4	95,9	73,6
Fase de utilização					
2	167,0	63,0	88,4	27,2	21,0
4	441,5	240,0	170,0	59,3	44,4
6	763,9	527,7	340,0	117,0	82,6

¹ Estimado com a equação 4.10.

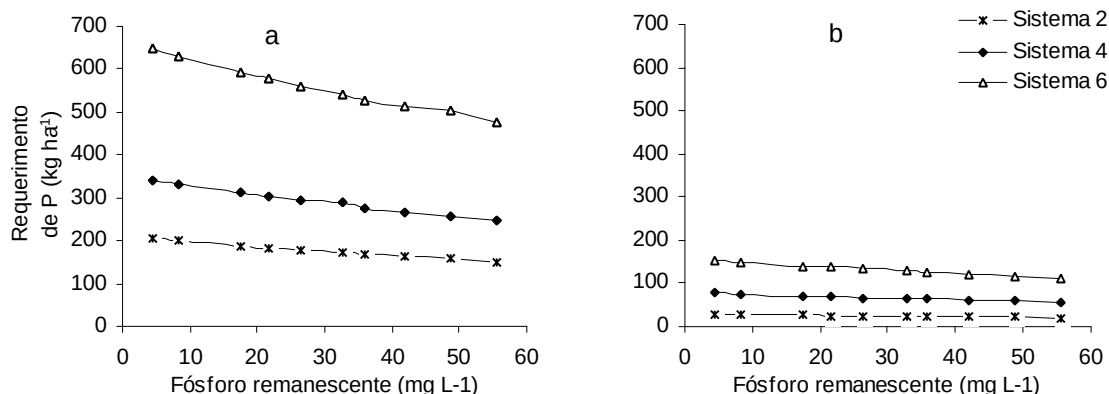


Figura 6.3. Demanda de fósforo estimada pelo FERTICALC-Pastagem em função do fósforo remanescente para as fases de estabelecimento (a) e de utilização (b) de pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6).

por não ser móvel nos tecidos floemáticos (Marschner et al., 1997). Ao contrário, o P é amplamente remobilizado, mas devido à baixa eficiência de recuperação pelas plantas ($f_{P\text{ rec}}$), fator também considerado na estimativa da demanda (Equação 4.9), obtiveram-se demandas sempre maiores do que os conteúdos.

As demandas de P para o estabelecimento foram de 4 a 7 vezes maiores do que as demandas para a fase de utilização da pastagem (Figura 6.3). Isso se deve, principalmente, à menor eficiência de recuperação pelas plantas do P adotada para o estabelecimento (Figura 4.2). Ressalta-se que a relação inversa entre as demandas de P e o fator capacidade do solo, caracterizado pelo P-rem, foi mais acentuada na fase de estabelecimento e para o sistema mais intensivo, devido ao efeito do fator capacidade sobre a eficiência de recuperação pelas plantas.

6.2. Submodelo solo

Na fase de estabelecimento da pastagem, o suprimento de nutrientes independe do sistema de produção, pois é função dos teores de nutrientes na análise de solo ($T_{i\text{ solo}}$) e, ainda, do valor do P-rem no caso de N, P e S (Quadro 6.7).

O suprimento de N relaciona-se diretamente com o P-rem e o teor de matéria orgânica do solo (MO_{solo}) (Figura 6.4a). Os suprimentos de N estimados para os solos 2 e 6, por exemplo, foram de 68 e 111 kg ha⁻¹ (Quadro 6.7), apesar do solo 2 apresentar teor de MO_{solo} 2,7 vezes maior (Quadro 6.1). Neste caso, o solo 2 apresenta menor valor de P-rem, por ser mais argiloso, o que condiciona maior proteção da MO_{solo} ao ataque microbiano, diminuindo sua mineralização (Camargo et al., 1997).

No caso do suprimento de P e S, a dependência do P-rem reflete o relacionamento inverso entre o fator capacidade de P e a disponibilidade e a capacidade de recuperação dos extratores destes nutrientes (Figura 6.4b). Assim, teores de P semelhantes, como nos solos 2 e 10, resultam em suprimentos menores em solos com maior P-rem.

Quadro 6.7. Suprimento dos nutrientes em três solos estimado pelo FERTICALC-Pastagem para a fase de estabelecimento de pastagens

Nutriente	Suprimento dos nutrientes ¹		
	Solo		
	2	6	10
----- kg ha ⁻¹ -----			
N	68,15	111,38	145,68
P	16,65	69,26	2,16
K	124,69	498,75	67,33
Ca	939,83	344,60	610,89
Mg	231,17	106,46	112,54
S	38,66	27,98	8,20

¹ O suprimento dos nutrientes independe do sistema de produção na fase de estabelecimento.

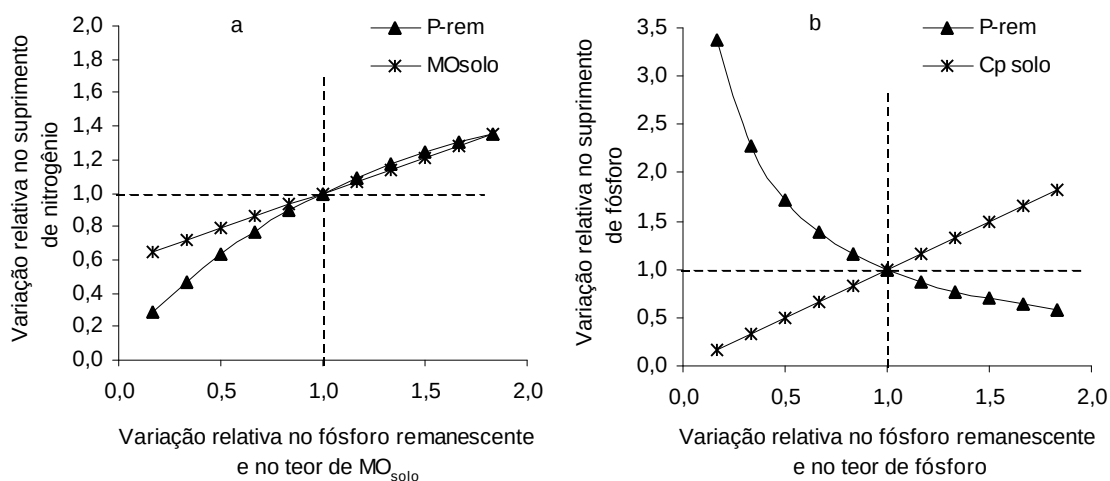


Figura 6.4. Análise de sensibilidade para a variação relativa no (a) suprimento de nitrogênio em função do fósforo remanescente (P-rem) e do teor de matéria orgânica do solo (MO_{solo}); e no (b) suprimento de fósforo em função do P-rem e do teor de fósforo no solo (C_{P solo}) disponível pelo extrator Mehlich-1.

Com base nos teores dos nutrientes no solo e nas quantidades dos nutrientes recicladas, o FERTICALC-Pastagem estima o suprimento em pastagens estabelecidas (Quadro 6.8). Com a intensificação do sistema de produção, verificou-se aumento da quantidade dos nutrientes reciclados via decomposição dos resíduos vegetais e animais, o que resultou em aumento do suprimento, mas apenas nos sistemas 2 e 4 (Quadro 6.8 e Figura 6.5), que apresentam eficiência de utilização da forragem menor ou igual a 35 % (Quadro 6.2). Nesses sistemas, a estimativa da quantidade do nutriente necessária à manutenção de uma reserva de nutrientes no solo (p_i) é igual a zero e, portanto, nenhum valor é subtraído do suprimento (Equação 5.1). Assim, para um mesmo solo, o suprimento de nutrientes no sistema 4 ($U_{t_i} = 35\%$) foi maior do que no sistema 2 ($U_{t_i} = 17\%$). Para o sistema 6, mais intensivo, apesar do aumento da quantidade de nutrientes reciclados, houve redução nas estimativas de suprimento em razão das quantidades dos nutrientes estimadas para manutenção de uma reserva no solo (p_i) terem sido maiores do que zero, tanto que se obteve, por exemplo, uma estimativa negativa de suprimento de N no solo 2 (Quadro 6.8).

Verificou-se que em pastagens estabelecidas manejadas intensivamente a contribuição para o suprimento dos nutrientes reciclados via excreta é maior que os via resíduos vegetais (Figura 6.5). Isso se deveu tanto à maior quantidade de nutrientes consumidos e excretados pelos animais quanto à distribuição mais uniforme de fezes e urina. No sistema menos produtivo a situação foi inversa

É evidente que em qualquer sistema de produção, quanto maior a disponibilidade de nutrientes no solo, menor a importância da reciclagem para o suprimento. De modo geral, estimou-se maior contribuição da reciclagem para o suprimento de N, P e K.

É interessante notar que no sistema mais intensivo houve maior contribuição da reciclagem (Figura 6.5). Sob outro ponto de vista, porém, pode-se dizer que os sistemas extensivos são mais dependentes da reciclagem para manutenção da produtividade, ao se assumir que estes sistemas são menos dependentes da adição de fertilizantes.

Quadro 6.8. Suprimento dos nutrientes em três solos estimado pelo FERTICALC-Pastagem para a fase de utilização de pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6)

Sistema	Suprimento dos Nutrientes		
	Solo		
	2	6	10
	----- kg ha ⁻¹ -----		
	Nitrogênio		
2	47,18	57,99	66,56
4	78,91	89,72	98,29
6	-5,79	5,02	13,59
	Fósforo		
2	15,25	54,71	4,39
4	18,54	58,00	7,67
6	20,86	60,33	10,00
	Potássio		
2	115,52	396,07	72,50
4	154,93	435,48	111,91
6	146,94	427,49	103,93
	Cálcio		
2	726,17	279,76	479,47
4	741,76	295,35	495,06
6	681,00	234,59	434,30
	Magnésio		
2	181,42	87,89	92,45
4	188,38	94,85	99,41
6	180,75	87,21	91,78
	Enxofre		
2	32,78	24,77	9,94
4	35,16	27,15	12,32
6	26,32	18,31	3,48

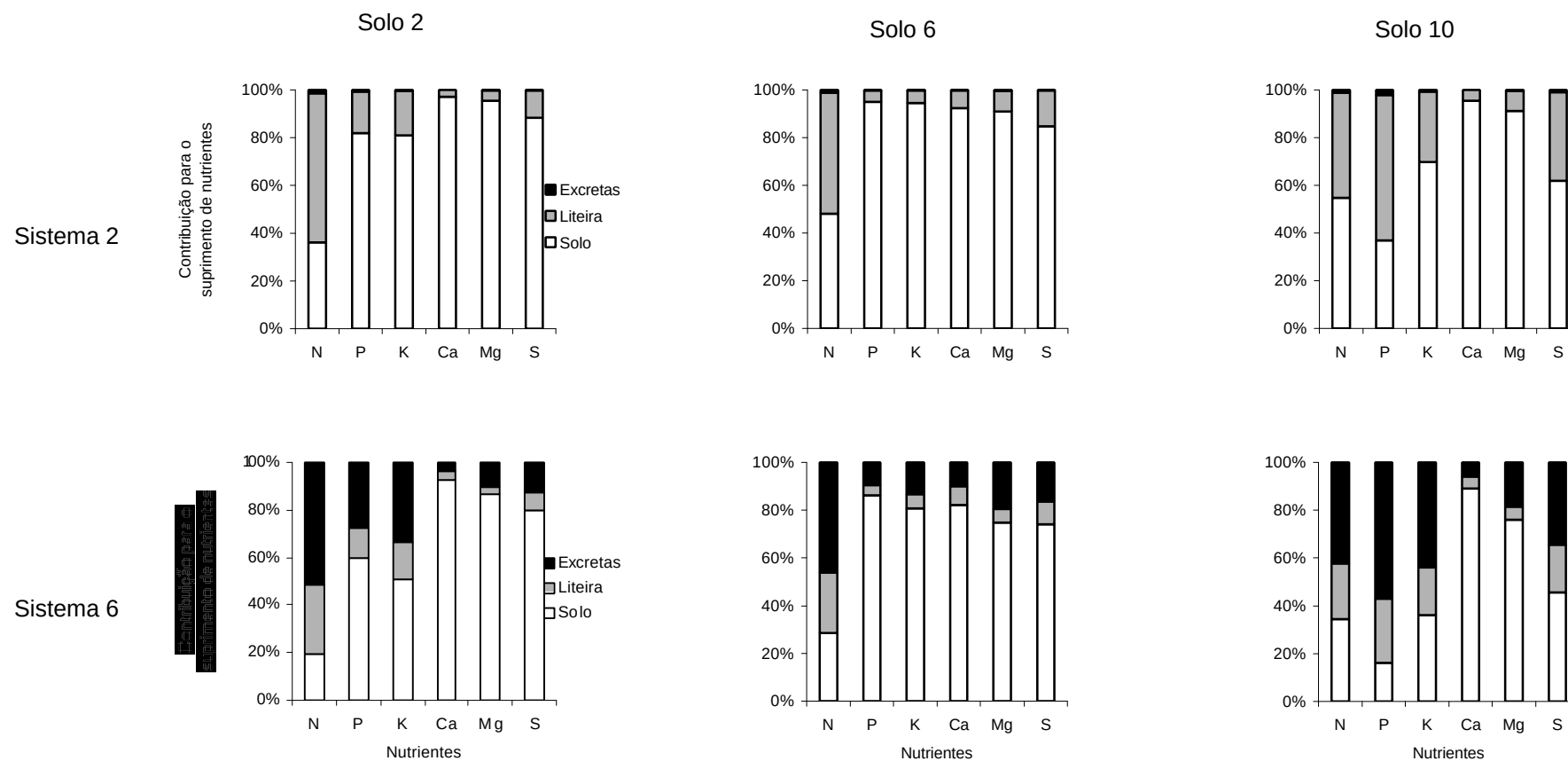


Figura 6.5. Contribuição porcentual do solo, das excretas e dos resíduos vegetais para o suprimento de nutrientes em três solos de pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2) e alta (sistema 6).

Com base na diferença entre a demanda e o suprimento (Equação 5.11), estimaram-se as doses de nutrientes para o estabelecimento e para a fase de utilização de pastagens (Figuras 6.6 a 6.13). Essas doses recomendadas pelo FERTICALC-Pastagem foram comparadas com as doses estabelecidas por Cantarutti et al. (1999) (5^a aproximação), Werner et al. (1997) (Boletim 100) e Osmond et al. (2002) (NuMaSS). As recomendações da 5^a aproximação e do Boletim 100 são função da exigência da forrageiras quanto à fertilidade do solo e, ou, ao nível tecnológico ou à intensidade de utilização da pastagem, além da classe de fertilidade do solo. Não há uma relação direta entre a produtividade animal e as doses de nutrientes recomendadas.

No sistema NuMaSS, as doses de N são dependentes do suprimento de N pelo solo e da demanda pela cultura, semelhantemente ao FERTICALC-Pastagem. Para o P, o sistema NuMaSS estima doses para se obter um teor de P no solo igual ao nível crítico. No entanto, esse nível crítico independe da produtividade, sendo função da espécie forrageira e do solo (textura). É importante destacar que no FERTICALC-Pastagem os níveis críticos² dos nutrientes são variáveis com as demandas e, conseqüentemente, com as produtividades e, no caso do P e S, com o fator capacidade.

As comparações entre os sistemas são apresentados nas figuras 6.6 a 6.9, para a fase de estabelecimento, e nas figuras 6.10 a 6.13, para a fase de utilização das pastagens. As doses de N estimadas pelo FERTICALC-Pastagem, tanto para o estabelecimento quanto para manutenção da produtividade, foram menores, mas compatíveis com as recomendadas pelo NuMaSS (Figuras 6.6 e 6.10). No entanto, ressalta-se que o NuMaSS não considera a contribuição da reciclagem no suprimento de N e que as recomendações foram obtidas utilizando as produções de MS estimadas no FERTICALC-Pastagem e os mesmos teores de N nas plantas. As doses de N recomendadas pela 5^a aproximação e pelo Boletim 100 são compatíveis entre si, mas de 2 a 14 vezes menores do que as do FERTICALC-Pastagem para os sistemas de produção simulados, especialmente para o estabelecimento. De fato, as doses de N recomendadas por aqueles boletins são semelhantes à quantidade de N consumida pelos animais (Figura 6.1).

² Os níveis críticos podem ser estimados dividindo-se a demanda do nutriente pela eficiência de recuperação pelo extrator do nutriente aplicado ao solo (Quadro 5.1).

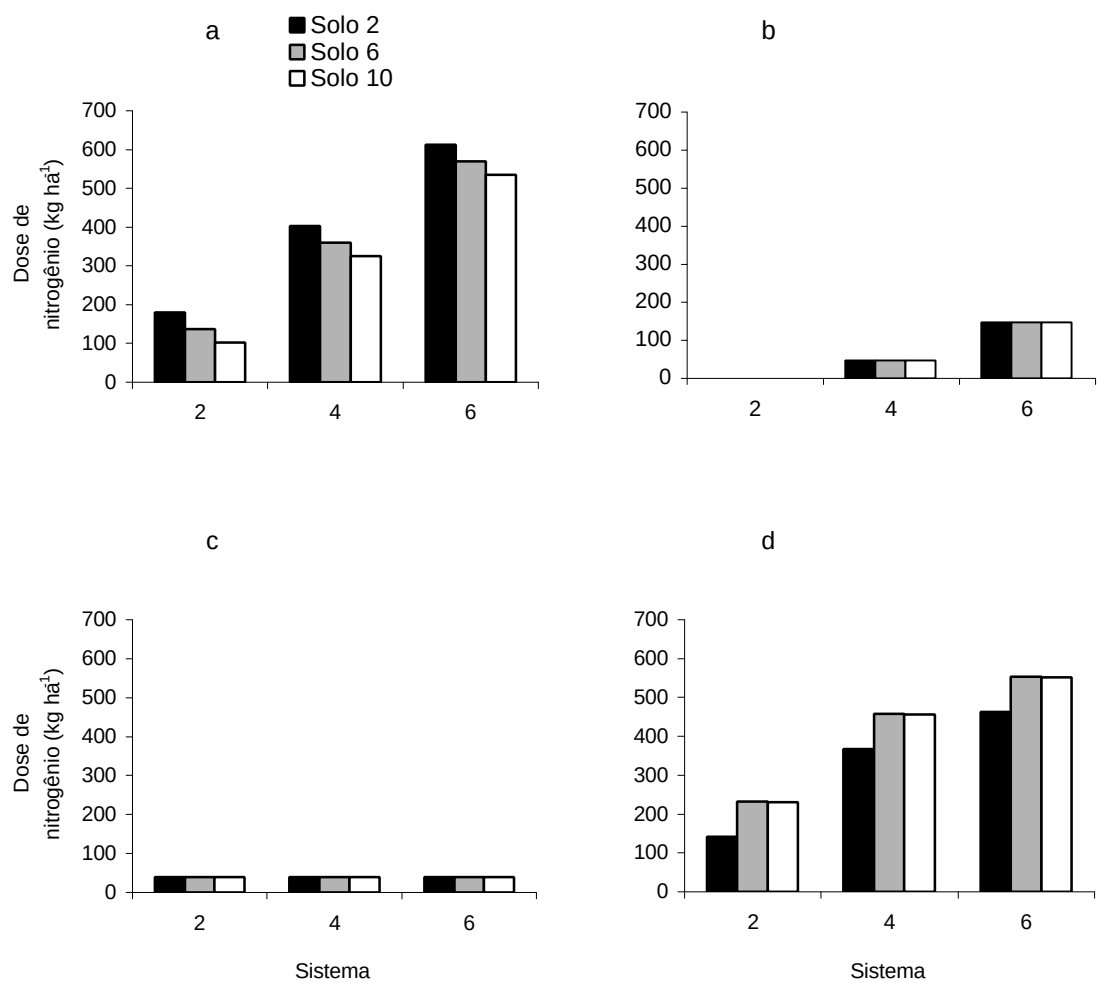


Figura 6.6. Doses de nitrogênio estimadas pelo FERTICALC – Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b), pelo Boletim 100 (c) e pelo NuMaSS (d) para estabelecer pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

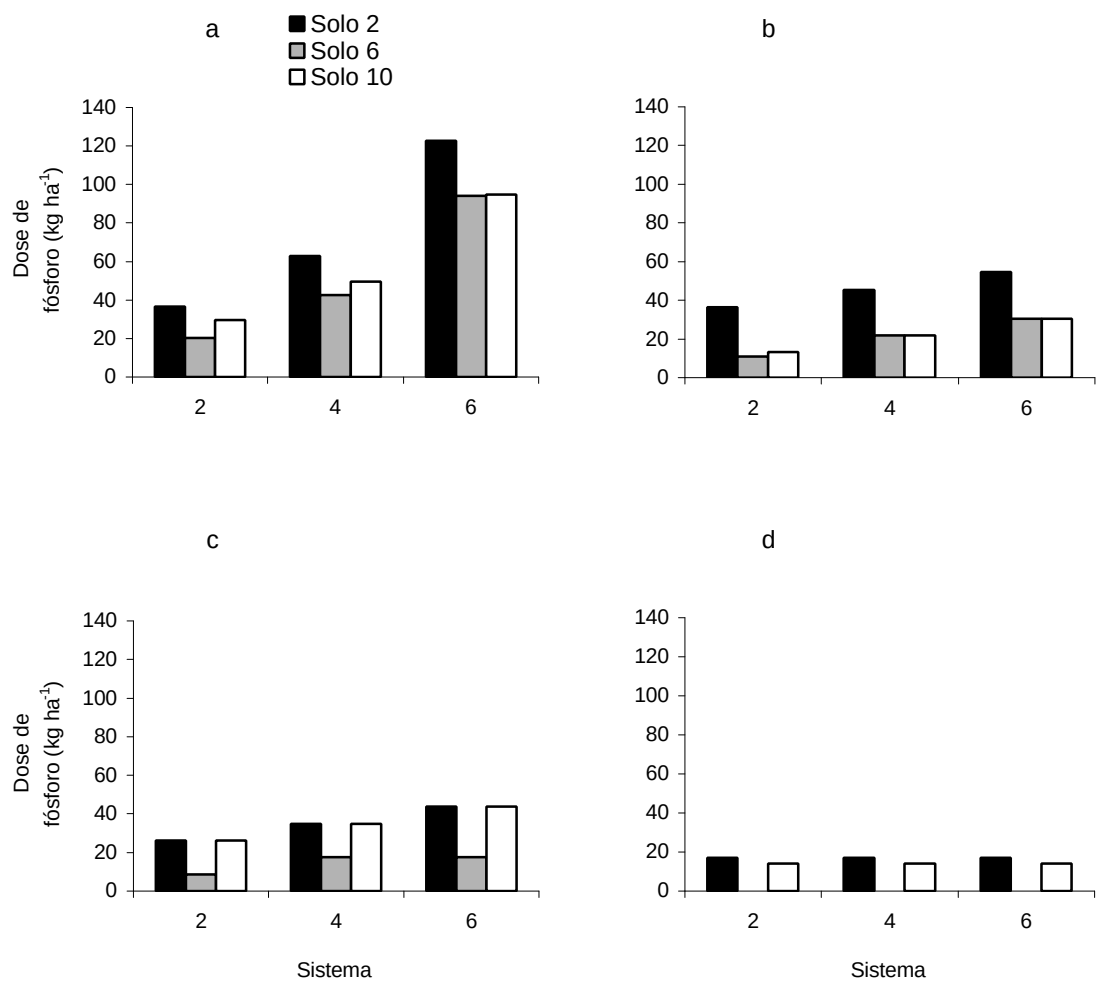


Figura 6.7. Doses de fósforo estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b), pelo Boletim 100 (c) e pelo NuMaSS (d) para estabelecer pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

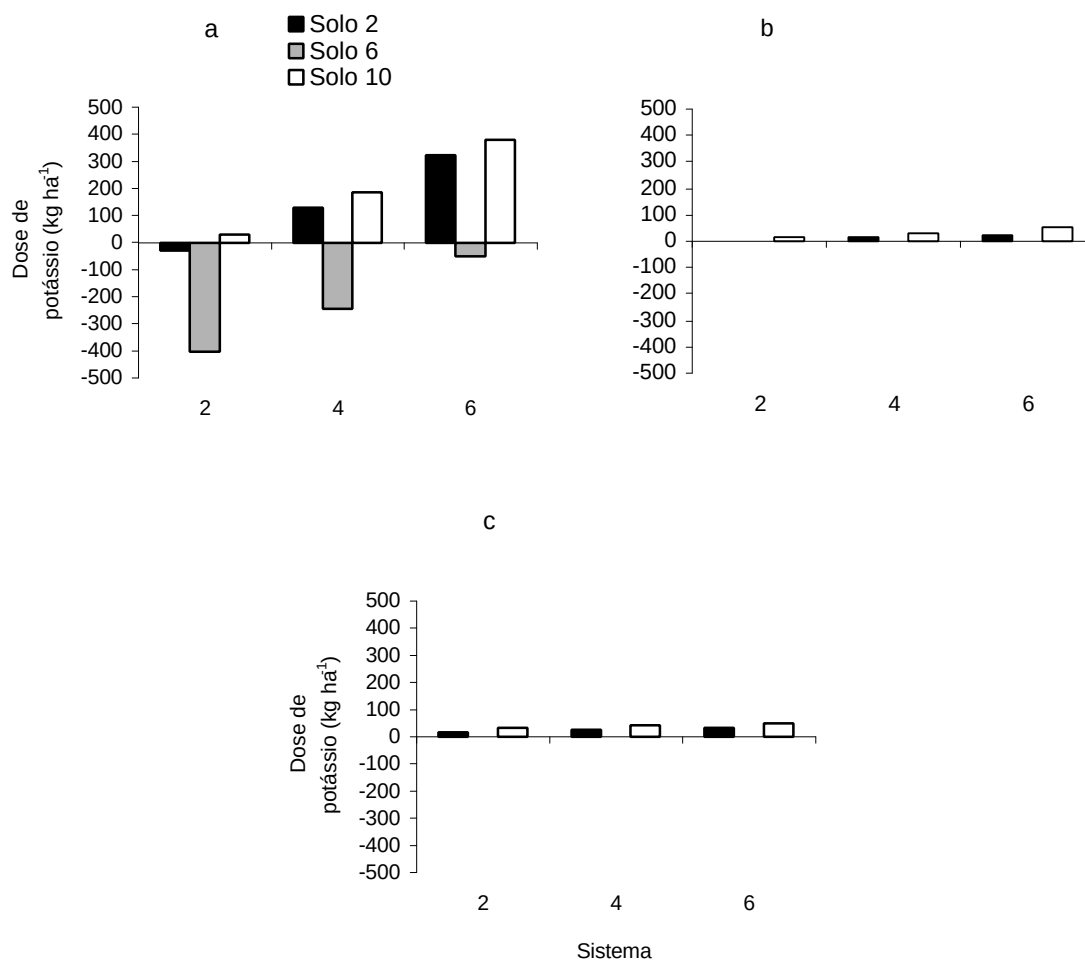


Figura 6.8. Doses de potássio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b) e pelo Boletim 100 (c) para estabelecer pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

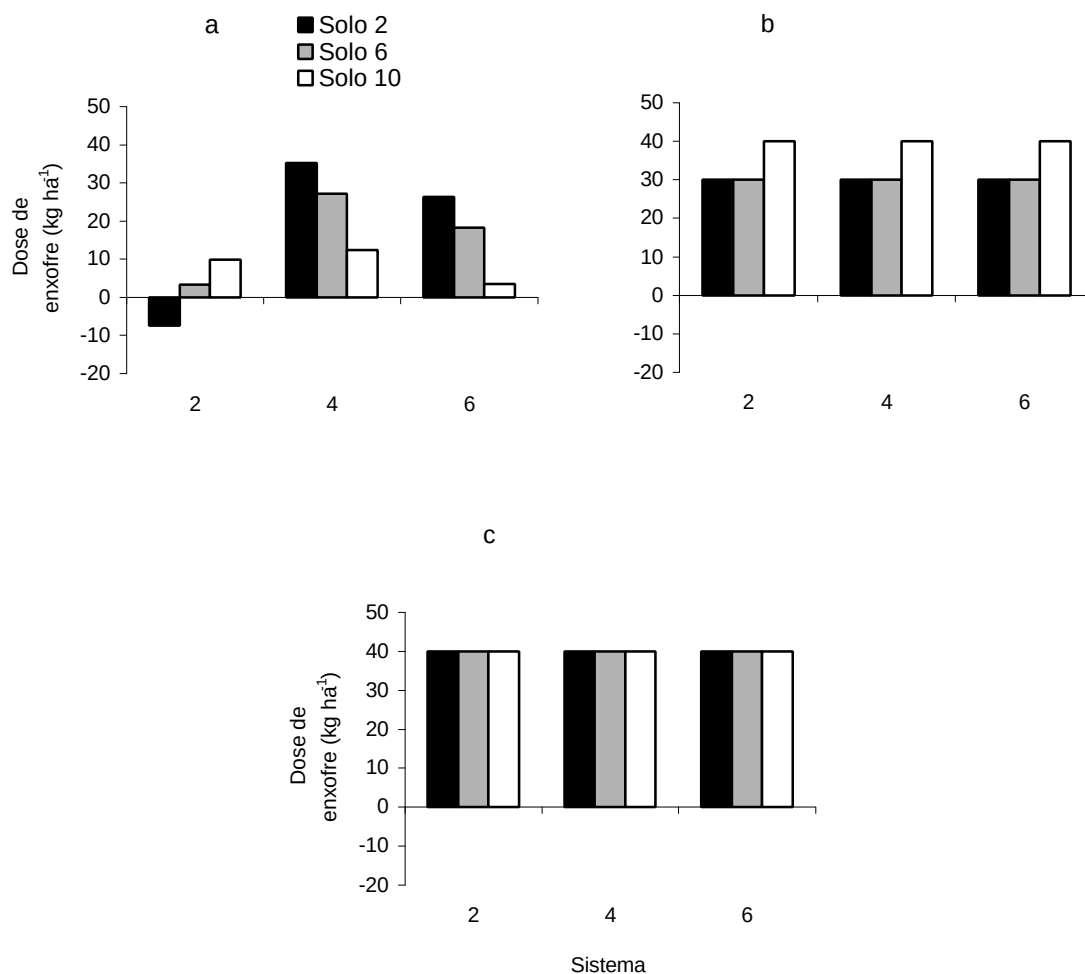


Figura 6.9. Doses de enxofre estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b) e pelo Boletim 100 (c) para estabelecer pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

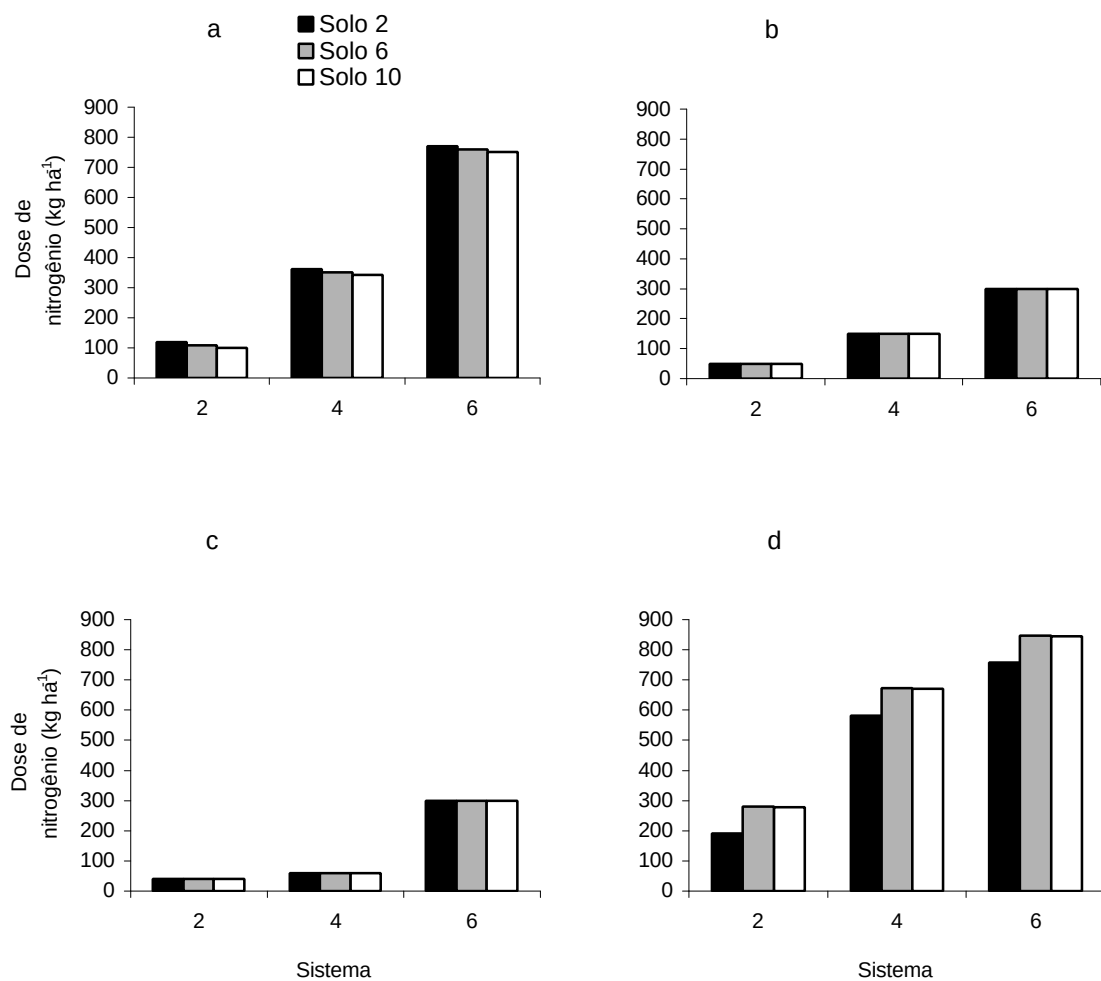


Figura 6.10. Doses de nitrogênio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b), pelo Boletim 100 (c) e pelo NuMaSS (d) para a fase de utilização pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

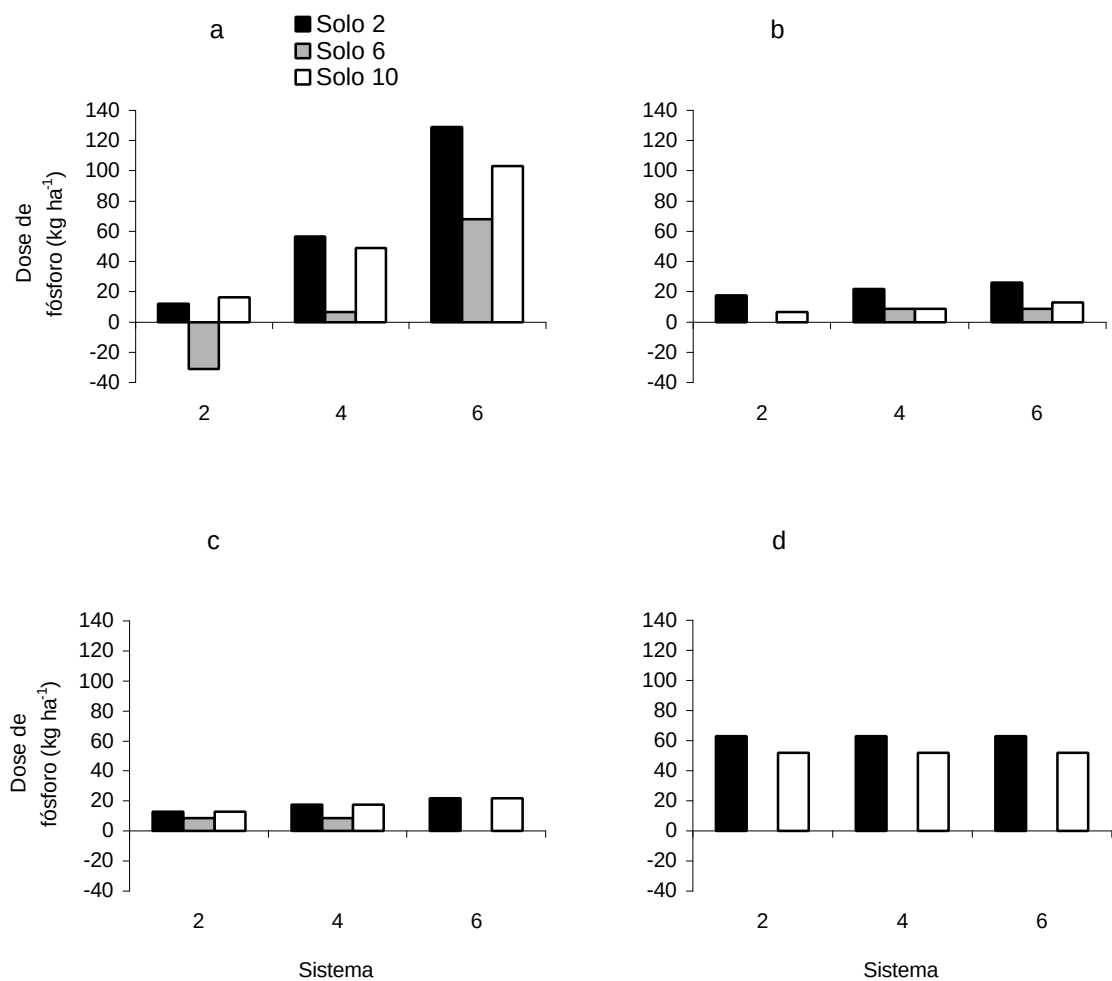


Figura 6.11. Doses de fósforo estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b), pelo Boletim 100 (c) e pelo NuMaSS (d) para a fase de utilização pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

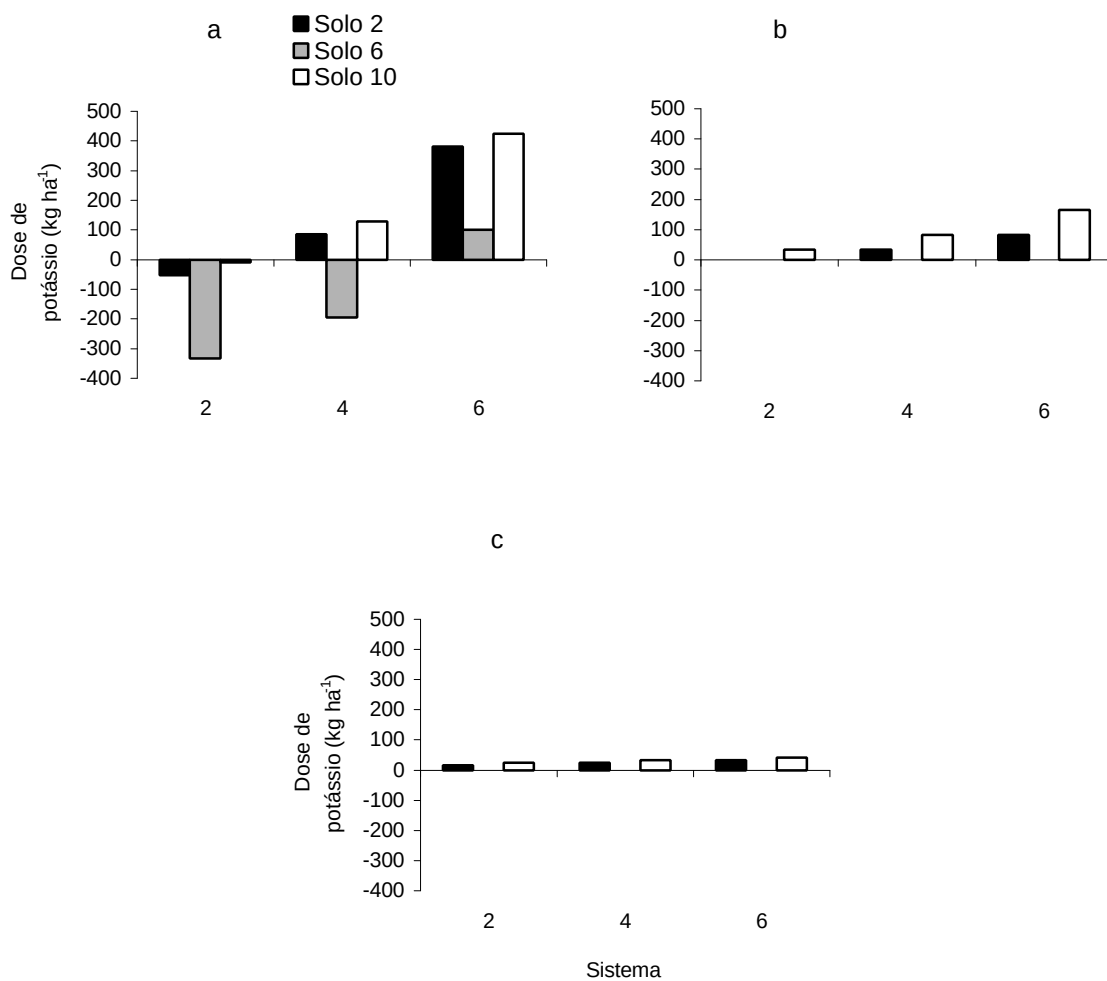


Figura 6.12. Doses de potássio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b) e pelo Boletim 100 (c para a fase de utilização pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

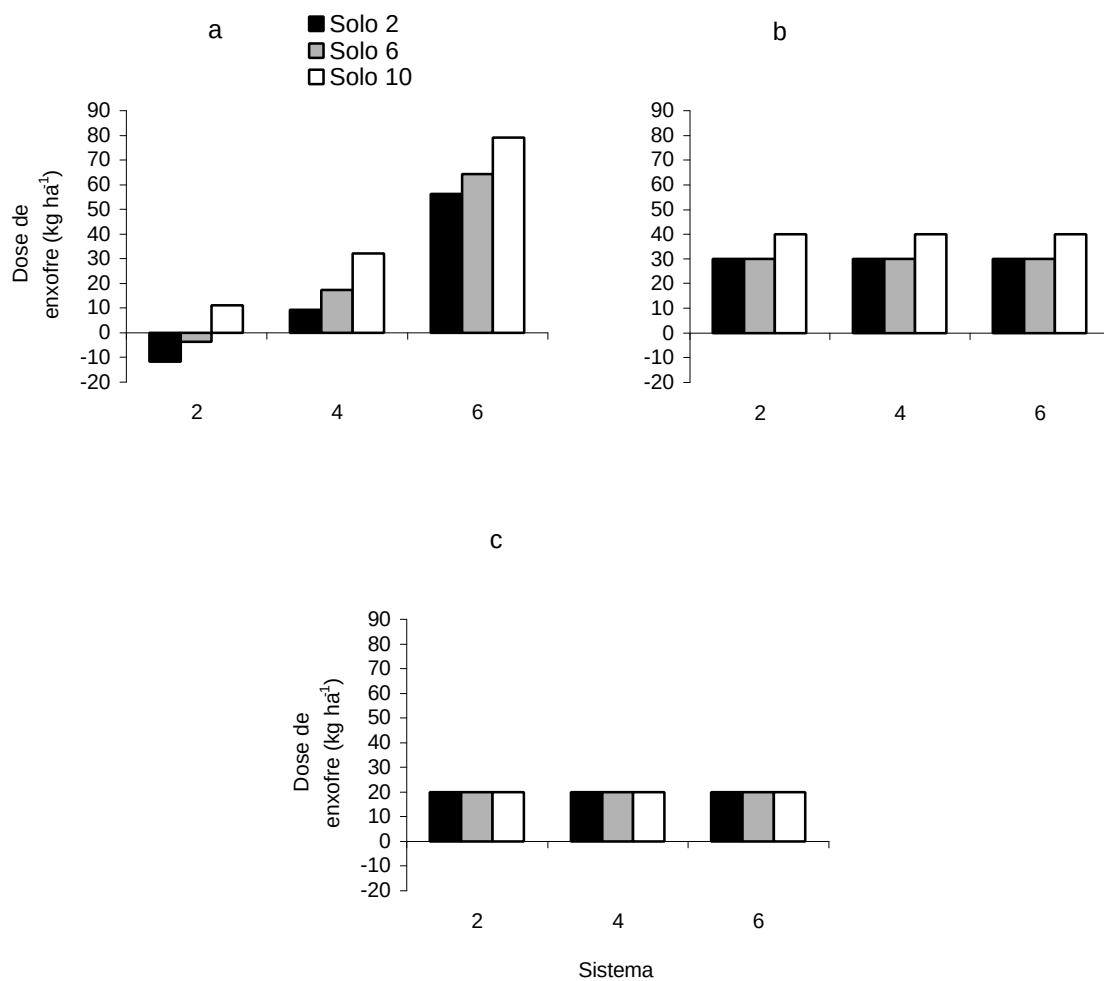


Figura 6.13. Doses de enxofre estimadas pelo FERTICALC-Pastagem (a), pela 5ª Aproximação (b) e pelo Boletim 100 (c) para a fase de utilização pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte caracterizados por produtividade baixa (sistema 2), média (sistema 4) e alta (sistema 6), em três diferentes solos.

Na comparação das doses de P para o estabelecimento, assumiu-se que as recomendações da 5^a aproximação e do Boletim 100 representam doses a serem aplicadas localizadamente no sulco de plantio. Para tanto, no FERTICALC-Pastagem e no NuMaSS, as doses localizadas (Figura 6.7), foram estimadas dividindo as doses a lanço por cinco. As doses para a fase de utilização representam quantidades a serem aplicadas a lanço (Figura 6.11). Para o sistema de produção 2, as recomendações de P tanto para o estabelecimento quanto para a fase de utilização foram relativamente semelhantes entre os métodos de recomendação. No entanto, nos sistemas mais intensivos as recomendações geradas pelo FERTICALC-Pastagem foram sempre maiores do que as demais.

As doses de P estimadas pelo FERTICALC-Pastagem são mais variáveis do que as dos outros sistemas tanto entre sistemas de produção quanto entre solos (Figuras 6.7 e 6.11). O FERTICALC-Pastagem é o único dos sistemas em que a dose de P é função contínua da reciclagem de nutrientes, da produtividade animal e vegetal desejada, da relação entre fator capacidade e a demanda e o suprimento de P e das fases de estabelecimento ou utilização. As doses estimadas pelo NuMaSS não variam com a produtividade desejada, nem entre as fases de estabelecimento e de utilização. Nesse sistema, as diferenças verificadas entre as recomendações de estabelecimento e utilização deveram-se às diferentes profundidades de incorporação do fertilizante fosfatado consideradas na simulação.

As doses de K estimadas pelo FERTICALC-Pastagem tanto para o estabelecimento quanto para a fase de utilização de pastagens foram semelhantes às da 5^a aproximação e do Boletim 100, quando se considerou o sistema de produção extensivo. No demais sistemas, as recomendações do FERTICALC-Pastagem foram progressivamente maiores em função do aumento da demanda e variaram de forma contínua com os teores de K no solo. Comportamento semelhante foi observado para as doses de S. Com exceção do FERTICALC-Pastagem, essa variação não existe em uma ampla faixa de teores de K e S no solo. O NuMaSS não faz recomendações de K e S.

7. RESUMO E CONCLUSÕES

A exploração pecuária brasileira fundamenta-se na alimentação dos animais em pasto. No entanto, a maioria das pastagens é cultivada com baixa ou nenhuma aplicação de fertilizantes, o que é apontado como uma das principais razões para sua degradação e, conseqüentemente, para a baixa produtividade da pecuária bovina. De modo geral, as recomendações de adubação têm sido sistematizadas na forma de tabelas e reunidas em manuais. Embora essas tabelas sejam fundamentadas em resultados experimentais, sua elaboração conta com algum subjetivismo. A modelagem da reciclagem e do balanço de nutrientes, incluindo os componentes animal, planta e solo do sistema de pastagem e suas inter-relações, desponta como possibilidade de estimar recomendações de adubação mais exatas.

Com este trabalho, objetivou-se desenvolver um sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para pastagens pastejadas por bovinos de corte, por meio da modelagem do balanço nutricional e da reciclagem de nutrientes entre os componentes animal, planta e solo desse sistema agrícola.

A modelagem do sistema FERTICALC-Pastagem basea-se no balanço nutricional, considerando a demanda de nutrientes para atingir uma produtividade desejada e a capacidade de suprimento destes nutrientes pelo sistema de produção. Para tanto, esse modelo apresenta uma estrutura modular, que dividi a pastagem em seus principais componentes: animal,

planta e solo. A demanda nutricional é calculada com base no conteúdo de nutrientes do pasto que se relaciona com uma determinada produtividade animal, ou seja, estabeleceu-se relação entre a produtividade na pecuária bovina de corte e as recomendações de adubação. O suprimento de nutrientes é estimado com base nos teores de nutrientes na análise química do solo e na reciclagem dos nutrientes adicionados ao solo com a liteira e com as excretas dos animais.

As simulações resultaram em doses de nutrientes, com exceção do P, maiores para fase de utilização do que para a de estabelecimento de pastagens. Em sistemas extensivos de produção as recomendações dependem, principalmente, da demanda nutricional e do suprimento pelo solo. Nesse caso, as doses estimadas pelo FERTICALC-Pastagem foram, de modo geral, compatíveis com as recomendadas por outros sistemas de recomendação. Em pastagens intensivamente exploradas, além da elevada demanda de nutrientes, as doses são função da quantidade de nutrientes reciclados e recuperados pelas plantas. As doses estimadas pelo FERTICALC-Pastagem foram maiores do que as atualmente recomendadas. Dos sistemas de recomendação comparados, o FERTICALC-Pastagem é o único em que as recomendações variam de forma contínua com a disponibilidade de nutrientes e com a produtividade esperada.

Com este trabalho, concluiu-se que o FERTICALC-Pastagem estima doses de nutrientes com melhor fundamentação conceitual do que as tabelas, levando em consideração a produção animal que representa o produto comercial da pecuária. A modelagem deste sistema resultou na conclusão de que esse é um processo contínuo e que há sempre necessidade de melhorias para obtenção de um sistema de recomendação de adubação consistente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRUÑA, F.; VICENTE-CHANDLER, J.; PEARSON, R.W. Effects of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 28: 657-661, 1964.
- ADDISCOTT, T.M. Modelling concepts and their relation to the scale of the problem. **Nutr. Cycl. Agroecosys.**, 50: 239-245, 1998.
- ADDISCOTT, T.M.; WAGENET, R.J. Concepts of solute leaching in soils: a review of modelling approaches. **J. Soil Sci.**, 36: 411-424, 1985.
- AERTS, R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? **J. Ecology**, 84: 597-608, 1996.
- ALVAREZ V., V.H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V., V.H., FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. (Eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS; UFV; DPS, 1996. p.615-645.
- ALVAREZ V., V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5º aproximação**. Viçosa: CFSEMG/UFV, 1999. p. 43-66.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **B. Inf. SBCS**, 25 (1): 27-32, 2000.
- ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A.; NOVELLY, P.E. Produção de gramíneas forrageiras tropicais e temperadas, irrigadas na época da seca. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 15: 384-392, 1986.
- ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A.; VERNEQUE, R.S.; SALVATI, J.A. Aplicação de nitrogênio em acessos de *Brachiaria*. 1. Efeito sobre a produção de matéria seca. **Pasturas Tropicales**, 12 (2): 2-6, 1990.

- ANDRADE, J.B.; PEDREIRA, J.V.S.; HENRIQUE, W. Comparação de três capins da espécie *Panicum maximum* Jacq. (colônia, tobiatã e K-187B) sob dois níveis de adubação nitrogenada. **B. Indúst. anim.**, 48: 77-82, 1991.
- ANSOTEGUI, R.P.; HAVSTAD, K.M.; WALLACE, J.D.; HALLFORD, D.M. Effects of milk intake on forage intake and performance of suckling range calves. **J. Anim. Sci.**, 69: 899-904, 1991.
- AYARZA, M.A. **Potassium dynamics in a humid tropical pasture in the Peruvian Amazon**. Raleigh: North Carolina State University, 1988. 156p. (Ph.D. Thesis).
- BAILEY, J.S.; BEATTIE, J.A.M.; KILPATRICK, D.J. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for diagnosing the nutrient status of grassland swards: I. Model establishment. **Plant Soil**, 197: 127-135, 1997.
- BAKER, R.D.; BARKER, J.M. Milk-fed calves. 4. The effects of herbage allowance and milk intake upon herbage intake and performance of grazing calves. **J. Agric. Sci.**, 90: 31-38, 1978.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A.C.; FURLANI, A.M.C.; SCHAFFERT, R.E.; FAGERIA, N.K.; ROSOLEM, C.A.; CANTARELLA, H. (Eds.). **Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Campinas/Viçosa: SBCS, 1997. p.75-95.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- BARROW, N.J. Return of nutrients by animals. In: SNAYDON, R.W. (Ed.). **Managed Grasslands: analytical studies**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 181-186. (Ecosystems of the world 17B).
- BARROW, N.J.; LAMBOURNE, L.J. Partition of excreted nitrogen, sulphur, and phosphorus between the faeces and urine of sheep being fed pasture. **Aust. J. Agric. Res.**, 13: 461-471, 1962.
- BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C.; GERALDES, A.P.A.; FERNANDES, S.A.P. Carbono e nitrogênio em solos de uma cronossequência de floresta tropical – pastagem de Paragominas. **Sci. agric.**, 56: 777-783, 1999.
- BLACK, C.A. **Soil fertility evaluation and control**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 746p.
- BOIN, C. Alguns dados sobre a exigência de energia e proteína de zebuínos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS DE RUMINANTES, 1995, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa: DZO, UFV, 1995. p. 457-465.
- BONO, J.A.M.; MACEDO, M.C.M.; EUCLIDES, V.B.P. Biomassa e área do sistema radicular e resistência do solo à penetração em pastagens de *Panicum maximum* Jacq. sob pastejo rotacionado. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37, 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2000. (Trab382, CD-ROM).

- BOTREL, M.A.; ALVIM, M.J.; MARTINS, C.E. Aplicação de nitrogênio em acessos de *Brachiaria*. 2. Efeito sobre os teores de proteína bruta e minerais. **Pasturas Tropicales**, 12: 7-10, 1990.
- BRÂNCIO, P.A. **Comportamento animal e estimativas de consumo por bovinos em pastagens de *Panicum maximum* Jacq. (Cultivares Tanzânia, Mombaça e Massai)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. 278p. (Tese de Doutorado).
- BRAY, R.H. A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. **Soil Sci.**, 78: 9-22, 1954.
- BRAZ, S.P. **Distribuição de fezes de bovinos e a reciclagem de nutrientes em pastagens de *Brachiaria decumbens***. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 77p. (Dissertação de Mestrado).
- BUSQUE, J.; HERRERO, M. Sward structure and patterns of defoliation of signal grass (*Brachiaria decumbens*) pastures under different cattle grazing intensities. **Trop. Grassl.**, 35: 193-204, 2001.
- CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, 21: 575-579, 1997.
- CAMPKIN, R. Model for calculating potassium requirements for grazed pastures. **N. Z. J. Exp. Agric.**, 13: 27-37, 1985.
- CANTARUTTI, R.B.; FONSECA, D.M.; SANTOS, H.Q.; ANDRADE, C.M.S. Adubação de pastagens: uma análise crítica. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV/DZO, 2002. p. 43-84.
- CANTARUTTI, R.B.; MARTINS, C.E.; CARVALHO, M.M.; FONSECA, D.M.; ARRUDA, M.E.; VILELA, H.; OLIVEIRA, R.T.T. Pastagens. In: RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5º aproximação**. Viçosa: CFSEMG/UFV, 1999. p. 332-341.
- CARRER, S.C.; FAVORETTO, V.; RODRIGUES, L.R.A.; REIS, R.A. Aplicação do nitrogênio ao solo e em pulverização foliar sobre a produção e composição bromatológica do capim-colonião. **Pesq. agropec. bras.**, 23: 957-961, 1988.
- CARRIEL, J.M.; MONTEIRO, F.A.; COLOZZA, M.T. Calagem num Podzólico Vermelho Amarelo para cultivo de três gramíneas forrageiras. **B. Indúst. anim.**, 52: 1-8, 1995.
- CARVALHO, M.M.; MARTINS, C.E.; SIQUEIRA, C.; SARAIVA, O.F. Crescimento de uma espécie de braquiária, na presença da calagem em cobertura e de doses de nitrogênio. **R. Bras. Ci. Solo**, 16: 69-74, 1992.
- CARVALHO, M.M.; MARTINS, C.E.; VERNEQUE, R.S.; SIQUEIRA, C. Resposta de uma espécie de braquiária à fertilização com nitrogênio e potássio em um solo ácido. **R. Bras. Ci. Solo**, 15: 195-200, 1991.
- CENTRO DE PESQUISAS DO CACAU - CEPEC. Informe técnico 1981. Ilhéus, 1982. 340p.

- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL - CIAT. Informe anual del Programa de Pastos Tropicales 1979. Cali, Colombia, 1980. 186p.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL - CIAT. Informe anual del Programa de Pastos Tropicales 1980. Cali, Colombia, 1981. 138p.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL - CIAT. Informe anual del Programa de Pastos Tropicales 1981. Cali, Colombia, 1982. 304p.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL - CIAT. Informe anual del Programa de Pastos Tropicales 1990. Cali, Colombia, 1991. s.p.
- CHACON, E.; STOBBS, T.H.; DALE, M.B. Influence of sward characteristics on grazing behaviour and growth of Hereford steers grazing tropical grass pastures. **Austr. J. Agric. Res.**, 29: 89-102, 1978.
- COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANATION - CSIRO. Feeding standards for Australian livestock: ruminants. Victoria: Australian Agricultural Council, 1990. 126p.
- CONRAD, H.R., PRATT, A.D., HIBBS, J.W. Regulation of feed intake in dairy cows. I. Change in importance of physical and physiological factors with increasing digestibility. **J. Dairy Sci.**, 47: 54-62, 1964.
- CORNFORTH, I.S. & SINCLAIR, A.G. Model for calculating maintenance phosphate requirements for grazed pastures. **N. Z. J. Exp. Agric.**, 10: 53-61, 1982.
- CORRÊA, L.A.; HAAG, H.P. Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras em Latossolo Vermelho-Amarelo, álico: I: Ensaio em casa de vegetação. **Sci. agric.**, 50: 99-108, 1993a.
- CORRÊA, L.A.; HAAG, H.P. Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras em Latossolo Vermelho-Amarelo, álico: II: Experimento de campo. **Sci. agric.**, 50: 109-116, 1993b.
- CORSI, M.; NUSSIO, L.G. Manejo do capim-elefante: correção e adubação do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 10, 1993, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 87-115.
- COSTA, G.G.; MONERATT, P.H.; GOMIDE, J.A. Efeito de doses de fósforo sobre o crescimento e teor de fósforo de capim-jaraguá e capim-colonião. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 12: 1-10, 1983.
- COSTA, M.N.X.; MATTOS, H.B.; BUENO, M.F.; DIAS, C.T.S.; LEITE, V.B.O. Influência de épocas e doses de adubação nitrogenada na produção estacional do capim *Brachiaria humidicola*. **B. Indúst. anim.**, 58: 153-167, 2001.
- COSTA, M.N.X.; MATTOS, H.B.; DIAS, C.T.S.; BUENO, M.F.; LEITE, V.B.O. Influência de doses e épocas de adubação nitrogenada na produção estacional do capim-mombaça. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37, 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2000a. (684; CD-ROM).
- COSTA, N.L.; OLIVEIRA, J.R.C. Evaluación agronómica de accesiones de *Panicum maximum* en Rondônia, Brasil. **Pasturas Tropicales**, 16 (2): 44-47, 1994.

- COSTA, N.L.; TOWNSEND, C.R.; MAGALHÃES, J.A.; PEREIRA, R.G.A. Resposta de pastagens degradadas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu à doses de nitrogênio e fósforo. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37, 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2000b. (trab345; CD-ROM).
- COUTO, W.S.; TEIXEIRA NETO, J.F.; SIMÃO NETO, M.; LOURENÇO JR., J.B. Estabelecimento de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob duas fontes e doses de fósforo na região de Paragominas, estado do Pará, Brasil. **Pasturas Tropicais**, 21 (1): 60-63, 1999.
- COUTO, W.S.; TEIXEIRA NETO, J.F.; VEIGA, J.B.; SIMÃO NETO, M. Utilização de duas fontes de fosfato no estabelecimento de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Pasturas Tropicais**, 17 (2): 25-28, 1995.
- DAWSON, L.A.; GRAYSTON, S.J.; PATERSON, E. Effects of grazing on the roots and rhizosphere of grasses. In: LEMAIRE, G.; HOGSDON, J.; MORAES, A.; NABINGER, C.; CARVALHO, P.C.F. **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2000. p. 61-84.
- DI MARCO, O.N.; AELLO, M.S.; MENDEZ, D.G. Energy expenditure of cattle grazing on pastures of low and high availability. **Anim. Sci.**, 63: 45-50, 1996.
- EUCLIDES, V.P.B. **Quality evaluation and cattle grazing behavior on bahiagrass and limpograss pastures**. Gainesville: University of Florida, 1985. 177p. (Ph.D. Thesis).
- EUCLIDES, V.P.B. Valor alimentício de espécies forrageiras do gênero *Panicum*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 12, 1995, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1995. p. 245-273.
- EUCLIDES, V.P.B. **Alternativas para intensificação da produção de carne bovina em pastagens**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2000. 65p.
- EUCLIDES, V.P.B.; EUCLIDES FILHO, K. **Uso de animais na avaliação de forrageira**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 1998. 59p. (Documentos: Embrapa Gado de Corte, 74).
- EUCLIDES, V.P.B.; MEDEIROS, S.R. **Valor nutritivo das principais gramíneas cultivadas no Brasil**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2003. (no prelo).
- EUCLIDES, V.P.B.; MACEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, M.P. Avaliação de diferentes métodos de amostragem (para se estimar o valor nutritivo de forragem) sob pastejo. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 21: 691-702, 1992.
- EUCLIDES, V.P.B.; MACEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, M.P. Desempenho animal em pastagens de gramíneas recuperadas com diferentes níveis de fertilização. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 34, 1997, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: SBZ, 1997. p.201-203.
- EUCLIDES, V.P.B.; ZIMMER, A.H.; OLIVEIRA, M.P. Evaluation of *Brachiaria decumbens* and *Brachiaria brizantha* under grazing. In: INTERNATIONAL

- GRASSLAND CONGRESS, 17, 1993, Palmerston North, New Zealand. **Proceedings...** Palmerston North, New Zealand, 1993a. p.1997-1998.
- EUCLIDES, V.P.B.; CARDOSO, E.G.; MACEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, M.P. Consumo voluntário de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob pastejo. **Rev. Bras. Zootec.**, 29: 2200-2208, 2000.
- EUCLIDES, V.P.B.; MACEDO, M.C.M.; VIEIRA, A.; OLIVEIRA, M.P. Evaluation of *Panicum maximum* cultivars under grazing. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 17, 1993, Palmerston North, New Zealand. **Proceedings...** Palmerston North, New Zealand, 1993b. p.1999-2000.
- EUCLIDES, V.P.B.; THIAGO, L.R.L.S.; MACEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, M.P. Consumo voluntário de forragem de três cultivares de *Panicum maximum* sob pastejo. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 1177-1185, 1999.
- FAQUIN, V.; FERRARI NETO, J.; EVANGELISTA, A.R.; VALE, F.R. Limitações nutricionais do colônio (*Panicum maximum*, Jacq.) e da braquiária (*Brachiaria decumbens*, Staff.), em amostras de solo de um Latossolo do noroeste do Paraná: II. Nutrição em macro e micronutrientes. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 23: 552-564, 1994.
- FAQUIN, V.; HOFFMANN, C.R.; EVANGELISTA, A.R.; GUEDES, G.A.A. O potássio e o enxofre no crescimento da braquiária e do colônio em amostras de um Latossolo da região noroeste do Paraná. **R. Bras. Ci. Solo**, 19: 87-94, 1995.
- FAQUIN, V.; ROSSI, C.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Nutrição mineral em fósforo, cálcio e magnésio do Braquiário em amostras de Latossolo dos Campos das Vertentes sob influência de calagem e fontes de fósforo. **R. Bras. Zootec.**, 26: 1074-1082, 1997a.
- FAQUIN, V.; PASSOS, R.R.; VILA, M.R.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Absorção e acumulação de nutrientes por gramíneas forrageiras sob influência de fontes de fósforo e correção do solo. **R. Bras. Zootec.**, 26: 219-226, 1997b.
- FERRARI JR., E.; ANDRADE, J.B.; PEDREIRA, J.V.S.; CONSENTINO, J.R.; SCHAMMAS, E.A. Produção de feno de *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob três frequências de corte. I. Produção de matéria seca. **B. Indúst. anim.**, 51: 49-54, 1994.
- FERREIRA, E. **A excreção de bovinos e as perdas de nitrogênio nas pastagens tropicais.** Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1995. 124p. (Tese de Mestrado).
- FERREIRA, M.A.; VALADARES FILHO, S.C.; MUNIZ, E.B.; SILVA, J.F.C.; VALADARES, R.F.D.; PAULINO, M.F.; CECON, P.R. Composição corporal e exigência líquida de macronutrientes minerais de bovinos F₁ Simental x Nelore. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 361-367, 1999a.
- FERREIRA, M.A.; VALADARES FILHO, S.C.; SILVA, J.F.C.; PAULINO, M.F.; VALADARES, R.F.D.; CECON, P.R.; MUNIZ, E.B. Composição corporal e exigências líquidas de proteína e energia para ganho de peso de bovinos F₁ Simental x Nelore. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 352-360, 1999b.

- FERREIRA, M.A.; VALADARES FILHO, S.C.; SILVA, J.F.C.; VALADARES, R.F.D.; PAULINO, M.F.; CECON, P.R.; MUNIZ, E.B. Eficiência de utilização da energia metabolizável para ganho de peso e exigências de energia metabolizável e nutrientes digestíveis totais de bovinos F₁ Simental x Nelore. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 368-373, 1999c.
- FISHER, M.J.; KERRIDGE, P.C. The agronomy and physiology of *Brachiaria* species. In: MILES, J.W., MAASS, B.L.; VALLE, C.B. (Eds.). **Brachiaria: biology, agronomy, and improvement**. Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA/CNPQC, 1996. p. 43-52.
- FONSECA, D.M. **Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de *Andropogon gayanus* var. *bisquamulatus*, *Panicum maximum* e *Brachiaria decumbens* em casa de vegetação e no campo**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 150p. (Tese de Doutorado).
- FONSECA, D.M. **Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa***. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 146p. (Tese de Mestrado).
- FORBES, T.J.; RAVEN, A.M.; ROBINSON, K.L. Observations on the utilization of grass grazed by young beef cattle with and without barley supplementation. **J. Br. Grassld. Soc.**, 21: 167-173, 1963.
- FRANZLUEBBERS, A.J.; STUEDEMANN, J.A.; SCHOMBERG, H.H. Spatial distribution of soil carbon and nitrogen pools under grazed tall fescue. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64:635-639, 2000.
- FREIRE, F.J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 87p. (Tese de Doutorado).
- FRIESEN, D.K.; BLAIR, G.J. A comparison of soil sampling procedures used to monitor soil fertility in permanent pastures. **Aust. J. Soil Res.**, 22: 81-90, 1984.
- FRIESEN, D.K.; RAO, I.M.; THOMAS, R.J.; OBERSON, A.; SANZ, J.I. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. **Plant Soil**, 196: 289-294, 1997.
- GAMA R., A.C.; CADIMA Z., A. Efeito da intensidade de pastejo sobre o sistema radicular de pastagem. **Pesq. agropec. bras.**, 26: 439-445, 1991.
- GASTAL, F.; DURAND, J.L. Effects of nitrogen and water supply on N and C fluxes and partitioning in defoliated swards. In: LEMAIRE, G.; HOGDSON, J.; MORAES, A.; NABINGER, C.; CARVALHO, P.C.F. **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2000. p. 15-39.
- GERARDO, J.; OLIVA, O. Evaluación zonal de pastos introducidos en Cuba. I. Con riego. **Pastos y Forrajes**, 2: 47-65, 1979a.
- GERARDO, J.; OLIVA, O. Evaluación zonal de pastos introducidos en Cuba. II. Secano. **Pastos y Forrajes**, 2: 66-83, 1979b.

- GERARDO, J.; RODRIGUES, R.; SOLANO, J.C. Evaluación zonal de pastos introducidos en Cuba. IX. Condiciones de secano, San Cristobal. **Pastos y Forrajes**, 5: 129-139, 1982.
- GIJSMAN, A.J.; ALARCÓN, H.F.; THOMAS, R.J. Root decomposition in tropical grasses and legumes, as affected by soil texture and season. **Soil Biol. Biochem.**, 29: 1443-1450, 1997.
- GOMIDE, J.A.; COSTA, G.G.; SILVA, M.A.M.M. Adubação nitrogenada e consorciação do capim-colonião e capim-jaraguá com leguminosas. II. Composição mineral e digestibilidade da matéria seca dos componentes da mistura. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 13: 22-29, 1984.
- GUEDES, L.M.; GRAÇA, D.S.; MORAIS, M.G.; ANTUNES, R.C.; GONÇALVES, L.C. Influência da aplicação de gesso na produção de matéria seca, na relação nitrogênio:enxofre e na concentração de enxofre, cobre, nitrogênio e nitrato em pastagens de *Brachiaria decumbens* Stapf. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, 52: 521-526, 2000.
- GUSS, A. **Exigência de fósforo para estabelecimento de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais em solos com diferentes características físicas e químicas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1988. 74p. (Tese de Doutorado).
- HAYNES, R.J.; WILLIAMS, P.H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Adv. Agron.**, 49:119-199, 1993.
- HEAL, O.W.; ANDERSON, J.M.; SWIFT, M.J. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: CADISCH, G.; GILLER, K.E. (Eds.). **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**. Wallingford, CAB International, 1997. p. 3-30.
- HENZELL, E.F. & ROSS, P.J. The nitrogen cycles of pasture ecosystems. In: BUTLER, G.W. & BAILEY, R.W. (Eds.). **Chemistry and biochemistry of herbage**. New York: Academic Press, 1973. v.2, p. 227-246.
- HERNÁNDEZ, N.; HERNÁNDEZ, J.E. Evaluacion inicial de 19 gramíneas. **Pastos y Forrajes**, 7: 23-35, 1984.
- HOLDERBAUM, J.F.; SOLLENBERGER, L.E.; QUESENBERRY, K.H.; MOORE, J.E.; JONES JR., C.S. Canopy structure and nutritive value of limpograss pasture during mid-summer to early autumn. **Agron. J.**, 84: 11-16, 1992.
- HOFFMANN, C.R.; FAQUIN, V.; GUEDES, G.A.A.; EVANGELISTA, A.R. O nitrogênio e o fósforo no crescimento da braquiária e do colonião em amostras de um Latossolo da região noroeste do Paraná. **R. Bras. Ci. Solo**, 19: 79-86, 1995.
- HOOSBEEK, M.R.; BRYANT, R.B. Towards the quantitative modeling of pedogenesis - a review. **Geoderma**, 55: 183-210, 1992.
- HUMPHREYS, L.R. **Tropical pasture utilisation**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1991. 206p.
- HUNT, W.F. Nitrogen cycling through senescent leaves and litter in swards of Ruanui and Nui ryegrass with high and low nitrogen inputs. **N. Z. J. Agric. Res.**, 26: 461-471, 1983.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Sistema IBGE de recuperação automática (SIDRA) - Bancos de dados agregados. Disponível site **IBGE**. URL: <http://www.ibge.gov.br>. Consultado em 19 maio 2003.
- JANK, L.; SAVIDAN, Y.; SOUZA, M.T.; COSTA, J.C.G. Avaliação do germoplasma de *Panicum maximum* introduzido da África. 1. Produção forrageira. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 23: 433-440, 1994.
- JANK, L. Melhoramento e seleção de variedades de *Panicum maximum*. In: SIMPÓSIO MANEJO DA PASTAGEM, 12, 1995, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1995. p.21-58.
- JARRELL, W.M.; BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Adv. Agron.**, 34: 197-224, 1981.
- JOHNSON, G.V. General model for predicting crop response to fertilizer. **Agron. J.**, 83: 367-373, 1991.
- JOHNSON, I.R.; PARSONS, A.J. A theoretical analysis of grass growth under grazing. **J. theor. Biol.**, 112: 345-367, 1985.
- JORGE, A.M.; FONTES, C.A.A.; PAULINO, M.F. Composição corporal de bovinos de quatro raças zebuínas, abatidos em diferentes estádios de maturidade. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 388-394, 1999.
- KANNO, T.; MACEDO, M.C.M.; BONO, J.A. Growth responses of *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk and *Brachiaria brizantha* cv. Marandu to phosphorus supply. **Grassland Science**, 45: 1-8, 1999a.
- KANNO, T.; MACEDO, M.C.M.; CORRÊA, M.R.; SANTOS JR., J.D.G.; BORGES, M.J. Produtividade de pastagens de *Panicum maximum* cv. Tanzânia estabelecidas após o cultivo de culturas anuais em sistemas agropastoris. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37, 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2000. (trab381, CD-ROM).
- KANNO, T.; MACEDO, M.C.M.; EUCLIDES, V.P.B.; BONO, J.A.; SANTOS Jr., J.D.G.; ROCHA, M.C.; BERETTA, L.G. Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian savannas. **Grassland Science**, 45: 9-14, 1999b.
- KNELLER, G.F. **A ciência como atividade humana**. Rio de Janeiro: Editora Zahar, 1979. 310p.
- KOUTIKA, L.S.; ANDREUX, F.; HASSINK, J.; CHONÉ, T.; CERRI, C.C. Characterization of organic matter in topsoils under rain forest and pasture in the eastern Brazilian Amazon basin. **Biol. Fertil. Soils**, 29: 309-313, 1999.
- LANDSBERG, J.J. **Physiological ecology of forest production**. Sydney: Academic Press, 1986. 198p.
- LASCANO, C.E.; EUCLIDES, V.P.B. Nutritional quality and animal production of *Brachiaria* pastures. In: MILES, J.W., MAASS, B.L.; VALLE, C.B. (Eds.). **Brachiaria: biology, agronomy, and improvement**. Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA/CNPGC, 1996. p. 106-123.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2000. 531p.

- LE DU, Y.L.P.; BAKER, R.D. Milk-fed calves. 5. The effects of a change in milk intake upon the herbage intake and performance of grazing calves. **J. Agric. Sci.**, 92: 457-469, 1979.
- LEITE, G.G.; EUCLIDES, V.P.B. Utilização de pastagens de *Brachiaria* spp. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 11, 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1994. p.267-297.
- LEITE, H.G.; OLIVEIRA, F.H.T. Statistical procedure to test identity between analytical methods. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 33: 1105-1118, 2002.
- LEMAIRE, G.; AGNUSDEI, M. Leaf tissue turnover and efficiency of herbage utilization. In: LEMAIER, G.; HODGSON, J.; MORAES, A.; NABINGER, C.; CARVALHO, P.C.F. **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2000. p. 265-287.
- LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J. & ILLIUS, A.W. (Eds.). **The ecology and management of grazing systems**. Wallingford, UK: CAB International, 1996. p.3-36.
- LÉON, L.A.; FENSTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Perú, and Venezuela. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 50: 798-802, 1986.
- LIRA, M.A. FARIAS, I., FERNANDES, A.P.M., SOARES, L.M. & DUBEUX JR., J.C.B. Estabilidade de reposta do capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.) sob níveis crescente de nitrogênio e fósforo. **Pesq. agropec. bras.**, 29: 1151-1157, 1994.
- LUZ, P.H.C.; BRAGA, G.J.; HERLING, V.R.; LIMA, C.G. Teores de macronutrientes do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.) em resposta a doses de nitrogênio e intervalos de corte. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39, 2002, Recife. **Anais...** Recife: SBZ, 2002. (02sbz1046; CD-ROM).
- MACEDO, M.C.M. Pastagens no ecossistema cerrado: pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSISTEMAS BRASILEIROS: PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1995, Brasília. **Anais...** Brasília: SBZ, 1995. p. 28-62.
- MACEDO, M.C.M.; EUCLIDES, V.P.B.; OLIVEIRA, M.P. Seasonal changes in the chemical composition of cultivated tropical grasses in the savannas of Brazil. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 17, 1993, Palmerston North, New Zealand. **Proceedings...** Palmerston North, New Zealand., 1993. p. 2000-2002.
- MACHADO, R.; NÚÑEZ, C.A. Comportamiento de variedades de *Brachiaria* spp. bajo pastoreo en codiciones de secano y fertilizacion media. **Pastos y Forrajes**, 14: 123-132, 1991.
- MACOON, B. **Forage and animal responses in pasture-based dairy production systems for lactating cows**. Gainesville: University of Florida, 1999. 307p. (Ph.D. Thesis).

- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2^a. ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd. ed. New York: Academic Press, 1995. 889p.
- MARSCHNER, H., KIRKBY, E.A.; ENGELS, C. Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development. **Bot. Acta**, 110: 265-273, 1997.
- MARTHA JR., G.B. **Balanço de ¹⁵N e perdas de amônia por volatilização em pastagens de capim-elefante**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1999. 74p. (Tese de Mestrado).
- MATHEWS, B.W.; CARPENTER, J.R.; SOLLENBERGER, L.E.; HISASHIMA, K.D.. Macronutrient, soil organic carbon, and earthworm distribution in subtropical pastures on an Andisol with and without long-term fertilization. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 32: 209-230, 2001
- MATHEWS, B.W.; SOLLENBERGER, L.E.; NAIR, V.D.; STAPLES, C.R. Impact of grazing management on soil nitrogen, phosphorus, potassium, and sulphur distribution. **J. Environ. Qual.**, 23: 1006-1013, 1994a.
- MATHEWS, B.W.; SOLLENBERGER, L.E.; NKEDI-KIZZA, P.; GASTON, L.A.; HORNSBY, H.D. Soil sampling procedures for monitoring potassium distribution in grazed pastures. **Agron. J.**, 86: 121-126, 1994b.
- MATHEWS, B.W.; TRITSCHLER, J.P.; CARPENTER, J.R.; SOLLENBERGER, L.E.. Soil macronutrient distribution in rotationally stocked kikuyugrass paddocks with short and long grazing periods. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 30: 557-571, 1999.
- MERTENS, D.R. Regulation of forage intake. In: FAHEY JR., G.C. (Ed.). **Forage quality, evaluation, and utilization**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1994. p. 450-493.
- MIDDLETON, K.R.; SMITH, G.S. The concept of a climax in relation to the fertilizer input of a pastoral ecosystem. **Plant Soil**, 50: 595-614, 1978.
- MILLARD, P. Ecophysiology of the internal cycling of nitrogen for tree growth. **Z. Pflanzenernähr. Bodenk.**, 159: 1-10, 1996.
- MINSON, D.J. **Forage in ruminant nutrition**. San Diego: Academic Press, 1990. 483p.
- MINSON, D.J.; WILSON, J.R. Prediction of intake as an element of forage quality. In: FAHEY JR., G.C. (Ed.). **Forage quality, evaluation, and utilization**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1994. p. 533-562.
- MONTEIRO, F.A.; CARRIEL, J.M. Aplicação de enxofre na forma de gesso para cultivo do capim-colônia em dois solos arenosos do estado de São Paulo. **B. Indúst. anim.**, 44: 335-347, 1987.
- MONTEIRO, H.C.F.; CANTARUTTI, R.B.; NASCIMENTO Jr., D.; REGAZZI, A.J.; FONSENCA, D.M. Dinâmica de decomposição e mineralização de

- nitrogênio em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras. **R. Bras. Zootec.**, 31: 1092-1102, 2002.
- MOORE, J.E. Practical approaches to estimating pasture intake. In: JOOST, R.E.; ROBERTS, C.A. (Eds.). **Nutrient cycling in forage ecosystems**. Columbia: University of Missouri, 1996. p. 193-202.
- MOORE, J.E.; COLEMAN, S.W. Forage intake, digestibility, NDF, and ADF: how well are they related? In: 2001 FORAGE AND GRASSLAND CONFERENCE, 2001, Springdale, AR. **Proceedings...** Georgetown, TX: Am. For. Grsld. Coun., 2001. p. 238-242.
- MOORE, J.E.; UNDERSANDER, D.J. Relative forage quality: an alternative to relative feed value and quality index. In: ANNUAL FLORIDA RUMINANT NUTRITION SYMPOSIUM, 13, 2002, Gainesville. **Proceedings...** Gainesville: University of Florida, IFAS, 2002. p. 16-31.
- MOORE, J.E.; BROWN, W.F.; HALL, M.B. Evaluation of equations for estimating total digestible nutrient concentration in forage grasses. In: 1998 FORAGE AND GRASSLAND CONFERENCE, 1998, Indianapolis, IN. **Proceedings...** Georgetown, TX: Am. For. Grsld. Coun., 1998. p. 117-121.
- MOORE, J.E.; ELLIS, G.L.; RIOS, C.E.; KOGER, M. Estimates of the voluntary intake and nutrient digestibility of bahiagrass pasture by grazing steers. **Proc. Soil Crop Sci. Soc. Fla.**, 29: 169-175, 1969.
- MOORE, J.E.; KUNKLE, W.E.; DENHAM, S.C.; ALLSHOUSE, R.D.; WAKEMAN, D.L. Relationship of steer gains to quality index of bermudagrass hays. In: **1991 Florida beef cattle annual report**. Gainesville: University of Florida, 1991. p. 45-49.
- MORTON, J.D.; BAIRD, D.B. Spatial distribution of dung patches under sheep grazing. **N. Z. J. Agric. Res.**, 33: 285-294, 1990.
- MUTSAERS, H.J.W.; WANG, Z. Are simulation models ready for agricultural research in developing countries? **Agron. J.**, 91: 1-4, 1999.
- MOTT, G.O. Symposium on forage evaluation. IV. Animal variation and measurements of forage quality. **Agron. J.**, 51: 223-226, 1959.
- MYERS, R.J.K.; VALLIS, I.; MCGILL, W.B.; HENZELL, E.F. Nitrogen in grass-dominant, unfertilized pasture systems. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SOIL SCIENCE, 13, 1986, Hamburg, Germany. **Proceedings...** Hamburg, Germany, 1986. v.6, p. 761-771.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. United States-Canadian tables of feed composition: nutritional data for United States and Canadian feeds. (3rd ed.). Washington: National Academy Press, 1982. 148p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of beef cattle. (6th ed.). Washington: National Academy Press, 1984. 90p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of beef cattle. (7th ed.). Washington: National Academy Press, 1996. 242p.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.

- OLIVEIRA, F.H.T. **Sistema para recomendação de calagem e adubação para a cultura da bananeira**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 78p. (Tese de Doutorado).
- OLIVEIRA, S.A. **Avaliação da mineralização e disponibilidade de nitrogênio para o trigo (*Triticum aestivum* L.) em solos do Distrito Federal**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1987. 128p. (Tese de Doutorado).
- OQUENDO, G.; GERARDO, J. Conportamiento de siete gramíneas en suelos pardos de Guaimaro. **Pastos y Forrajes**, 9: 230-235, 1986.
- OYANARTE, M., BESGA, G., RODRÍGUEZ, M., DOMINGO, M. & SINCLAIR, A.G. Balanced pasture fertilization in the Basque Country: I. phosphorus and potassium budgets on dairy farms. **Nutr. Cycl. Agroecosys.**, 47: 261-269, 1997.
- OSMOND, D.L.; SMYTH, T.J.; YOST, R.S.; HOAG, D.L.; REID, W.S.; BRANCH, W.; WANG, X.; LI, H. **Nutrient management support system (NuMaSS), version 2.0: software installation and user's guide**. Raleigh: Soil Management Collaborative Research Support System, North Carolina State University, 2002. 32p. (Technical Bulletin no. 2002-02).
- PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering. **Agron. J.**, 88: 690-694, 1996.
- PASTRANA, L. Respuesta de *Brachiaria decumbens* a la aplicación de dos fuentes de fósforo en un suelo ácido. **Pasturas Tropicales**, 16: 32-35, 1994.
- PAULINO, M.F.; FONTES, C.A.A.; JORGE, A.M.; GOMES JÚNIOR, P. Composição corporal e exigências de energia e proteína para ganho de peso de bovinos de quatro raças zebuínas. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 627-633, 1999a.
- PAULINO, M.F.; FONTES, C.A.A.; JORGE, A.M.; PEREIRA, J.C.; GOMES JÚNIOR, P. Exigências de energia de manutenção de bovinos zebuínos não-castrados em confinamento. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 627-633, 1999b.
- PAULINO, M.F.; FONTES, C.A.A.; JORGE, A.M.; QUEIROZ, A.C.; SILVA, J.F.C.; GOMES JÚNIOR, P. Composição corporal e exigências de macroelementos minerais (Ca, P, Mg, Na e K) de bovinos não-castrados de quatro raças zebuínas. **Rev. Bras. Zootec.**, 28: 634-641, 1999c.
- PAULINO, V.T.; COSTA, N.L.; PAULINO, T.S.; LUCENA, M.A.C.D. Limitações nutricionais ao crescimento de *Panicum maximum* cv. Mombaça. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39, 2002, Recife. **Anais...** Recife: SBZ, 2002. (02sbz56; CD-ROM).
- PAULINO, V.T.; COSTA, N.L.; LUCENA, M.A.C.D.; SCHAMMAS, E.A.; FERRARI JR., E. Resposta de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu à calagem e à fertilização fosfatada em um solo ácido. **Pasturas Tropicales**, 16: 34-40, 1994.
- PAYNE, G.C.; RECHCIGL, J.E.; STEPHENSON, R.J. Development of diagnosis and recommendation integrated system norms for bahiagrass. **Agron. J.**, 82: 930-934, 1990.

- PEREIRA, J.M.; BODDEY, R.M.; REZENDE, C.P. Pastagens no ecossistema Mata Atlântica: pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSSISTEMAS BRASILEIROS: PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1995, Brasília. **Anais...** Brasília: SBZ, 1995. p. 94-146.
- PEREIRA, J.M.; NASCIMENTO JR., D.; SANTANA, J.R.; CANTARUTTI, R.B.; LEÃO, M.I. Teor de proteína bruta e digestibilidade "in vitro" da matéria seca da forragem disponível e da dieta selecionada por bovinos em pastagens de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick, em monocultivo ou consorciado com leguminosas, submetida a diferentes taxas de lotação. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 21: 104-117, 1992a.
- PEREIRA, J.M.; NASCIMENTO JR., D.; CANTARUTTI, R.B.; REGAZZI, A.J. Consumo e ganho de peso de bovinos em pastagens de capim *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick, em monocultivo ou consorciado com leguminosas, submetidas a diferentes taxas de lotação. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 21: 118-131, 1992b.
- PÉREZ, A.; ACOSTA, R. Influencia de la norma y la frecuencia del riego sobre el rendimiento y la calidad en cuatro gramíneas. **Pastos y Forrajes**, 9: 244-250, 1986.
- PETERSEN, R.G.; LUCAS, H.L.; WOODHOUSE, W.W. The distribution of excreta by freely grazing cattle and its effect on pasture fertility: I. Excretal distribution. **Agron. J.**, 48: 440-444, 1956.
- PETERSON, P.R.; GERRISH, J.R. Grazing management affects manure distribution by beef cattle. In: 1995 FORAGE AND GRASSLAND CONFERENCE, 1995, Lexington, KY. **Proceedings...** Georgetown, TX: Am. For. Grsld. Coun., 1995. p. 170-174.
- PINTO, J.C.; BELARMIRO, M.C.; ROCHA, G.P. Composição mineral da forragem de capim-tanzânia em função da aplicação de superfosfato simples e sulfato de amônio. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39, 2002, Recife. **Anais...** Recife: SBZ, 2002a. (02sbz1542; CD-ROM).
- PINTO, J.C.; MAIA, M.C.; SANTOS, I.P.A.; CAMARGO, M.S. Composição mineral da forragem do milho e do capim-tanzânia cultivados associados. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39, 2002, Recife. **Anais...** Recife: SBZ, 2002b. (02sbz1050; CD-ROM).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análises de solos para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. 31p. (Boletim, 81).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de potássio em solos para capim-braquiária cultivado em vasos. **Bragantia**, 43: 531-539, 1984.
- RAO, I.M. Root distribution and production in native and introduced pastures in the South American savannas. In: BOX JR., J.E. (Ed.). **Root demographics and their efficiencies in sustainable agriculture, grasslands and forest ecosystems**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. p.19-41.

- RAO, I.M. Adapting tropical forages to low-fertility soils. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19, 2001, São Pedro, Brasil. **Proceedings...** São Pedro, Brasil, 2001. (Theme 6-2; CD-ROM).
- RAO, I.M.; AYARZA, M.A.; GARCÍA, R. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. I. Differences in plant growth, nutrient acquisition and nutrient utilization among C₄ grasses and C₃ legumes. **J. Plant Nutr.**, 18: 2135-2155, 1995.
- RAO, I.M.; FRIESEN, D.K.; OSAKI, M. Plant adaptation to phosphorus-limited tropical soils. In: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of plant and crop stress**. (2nd Ed.). New York: Marcel Dekker, Inc., 1999. p. 61-95.
- RAO, I.M., KERRIDGE, P.C. & MACEDO, M.C.M. Nutritional requirements of *Brachiaria* and adaptation to acid soils. In: MILES, J.W., MAASS, B.L. & VALLE, C.B. (Eds.). **Brachiaria: biology, agronomy, and improvement**. Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA/CNPQC, 1996b. p. 53-71.
- REEVES, M.; FULKERSON, W.J.; KELLAWAY, R.C.; DOVE, H. A comparison of three techniques to determine the herbage intake of dairy cows grazing kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) pasture. **Aust. J. Exp. Agric.**, 36: 23-30, 1996.
- REYNOLDS, J.F.; ACOCK, B. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. **Ecol. Modell.**, 94: 7-16, 1997.
- REZENDE, C.P.; CANTARUTTI, R.B.; BRAGA, J.M.; GOMIDE, J.A.; PEREIRA, J.M.; FERREIRA, E.; TARRÉ, R.; MACEDO, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K.E.; BODDEY, R.M. Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Nutr. Cycl. Agroecosys.**, 54: 99-112, 1999.
- RICHARDS, I.R.; WOLTON, K.M. The spatial distribution of excreta under intensive cattle grazing. **J. Br. Grassld. Soc.**, 31: 89-92, 1976.
- ROBBINS, G.B.; BUSHELL, J.J.; BUTLER, K.L. Decline in plant and animal production from ageing pasture of green panic (*Panicum maximum* var. *trichoglume*). **J. Agric. Sci.**, 108: 407-417, 1987.
- ROBBINS, G.B.; BUSHELL, J.J.; MCKEON, G.M. Nitrogen immobilization in decomposing litter contributes to productivity decline in ageing pasture of green panic (*Panicum maximum* var. *trichoglume*). **J. Agric. Sci.**, 113: 401-406, 1989.
- ROCHINOTTI, D. **Model components of forage-fed cattle systems: energy expenditure of grazing cattle and prediction of intake in dairy cows**. Gainesville: University of Florida, 1998. 187p. (Ph.D. Thesis).
- ROSTON, A.J.; ANDRADE, P. Digestibilidade de forrageiras com ruminantes: coletânea de informações. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 21: 647-666, 1992a.
- ROSTON, A.J.; ANDRADE, P. Índices de valores nutritivos de forrageiras tropicais. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 21: 674-682, 1992b.
- RUIZ, R.; CAIRO, J.; MARTINEZ, R.O.; HERRERA, R.S. Milk production of cows grazing coast cross no. 1 bermuda grass (*Cynodon dactylon*). 2.

- Sward structure and productive potential. **Cuban J. Agric. Sci.**, 15: 133-144, 1981.
- SANTOS, C.A.A. **Potencial de mineralização e disponibilidade de nitrogênio de solos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 59p. (Tese de Mestrado).
- SANTOS, F.C. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 64p. (Tese de Mestrado).
- SANTOS, H.Q.; FONSECA, D.M.; CANTARUTTI, R.B.; ALVAREZ V., V.H.; NASCIMENTO JR, D. Níveis críticos de fósforo no solo e na planta para gramíneas forrageiras tropicais, em diferentes idades. **R. Bras. Ci. Solo**, 26: 173-182, 2002.
- SANTOS, M.V.F.; DUBEUX JR., J.C.B.; SILVA, M.C.; SANTOS, S.F.; FERREIRA, R.L.; ARAÚJO, K.C. Produção e crescimento de gramíneas tropicais. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 36, 1999, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBZ, 1999. (FOR 154, CD-ROM).
- SANZONOWICZ, C.; LOBATO, E.; GOEDERT, W.J. Efeito residual da calagem e de fontes de fósforo numa pastagem estabelecida em solo de cerrado. **Pesq. agropec. bras.**, 22: 233-243, 1987.
- SCHUNKE, R.M. **Qualidade, decomposição e liberação de nutrientes da liteira de quatro cultivares de *Panicum maximum* Jacq.** Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1998. 111p. (Tese de Doutorado).
- SENEVIRATNE, G. Litter quality and nitrogen release in tropical agriculture: a synthesis. **Biol. Fertil. Soils**, 31: 60-64, 2000.
- SIMÃO NETO, M.; DIAS FILHO, M.B. Pastagens no ecossistema do trópico úmido: pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSSISTEMAS BRASILEIROS: PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 1995, Brasília. **Anais...** Brasília: SBZ, 1995. p. 76-93.
- SOLLENBERGER, L.E.; BURNS, J.C. Canopy characteristics, ingestive behaviour and herbage intake in cultivated tropical grasslands. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19, 2001, Piracicaba, Brasil. **Proceedings...** Piracicaba, Brasil: ESALQ, 2001. (Theme 8-2; CD-ROM).
- SOLLENBERGER, L.E.; CHERNEY, D.J.R. Evaluating forage production and quality. In: BARNES, R.F., MILLER, D.A.; NELSON, C.J. (Eds.). **Forages: the science of grassland agriculture**. 5th ed. Ames: Iowa State University Press, 1995. v.2, p.97-110.
- SOLLENBERGER, L.E.; DUBEUX JR., J.C.B.; SANTOS, H.Q.; MATHEWS, B.W. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39, 2002, Recife. **Anais de palestras...** Recife: SBZ, 2002. p. 151-179.
- SOUZA FILHO, A.P.S.; DUTRA, S.; SERRÃO, E.A.S. Produtividade estacional e composição química de *Brachiaria humidicola* e pastagem nativa de

- campo cerrado do estado do Amapá, Brasil. **Pasturas Tropicales**, 14: 11-16, 1992.
- STOOBS, T.H. Automatic measurement of grazing time by dairy cows on tropical grass and legume pastures. **Trop. Grassl.**, 4: 237-244, 1970.
- STOOBS, T.H. Factors affecting the nutritional value of grazed tropical pastures for beef and milk production. **Trop. Grassl.**, 9: 141-150, 1975.
- TARPLEY, M.L.; ROBINSON, D.L.; GUSTAVSON, B.K.; EICHHORN, M.M. The DRIS for interpretation of coastal bermudagrass analysis. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, 16: 1335-1348, 1982.
- THE FORAGE AND GRAZING TERMINOLOGY COMMITTEE – FGTC. Terminology for grazing lands and grazing animal. **J. Prod. Agric.**, 5: 191-201.
- THOMAS, R.J. The role of the legume in the nitrogen cycle of productive and sustainable pastures. **Grass For. Sci.**, 47: 133-142, 1992.
- THOMAS, R.J.; ASAKAWA, N.M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. **Soil Biol. Biochem.**, 25: 1351-1361, 1993.
- THORNLEY, J.H.M. **Grassland dynamics: an ecosystem simulation model**. Wallingford, UK: CABI Publishing, 1998. 241p.
- TINKER, P.B.; NYE, P.H. **Solute movement in the rhizosphere**. New York: Oxford University Press, 2000. 444p. (Topics in sustainable agronomy).
- URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; GILLER, K.E. Influence of decomposition of roots of tropical forage species on the availability of soil nitrogen. **Soil Biol. Biochem.**, 30: 2099-2106, 1998.
- VALLE, C.B.; MILES, J.W. Melhoramento de gramíneas do gênero *Brachiaria*. In: SIMPÓSIO MANEJO DA PASTAGEM, 11, 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1994. p.1-24.
- VAN HORN, H.H.; NEWTON, G.L.; KUNKLE, W.E. Ruminant nutrition from an environmental perspective: factors affecting whole-farm nutrient balance. **J. Anim. Sci.**, 74: 3082-3102, 1996.
- VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J.B.; LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nostarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **J. Dairy Sci.**, 74: 3583-3597, 1991.
- VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, 7: 143-148, 1983.
- VÉRAS, A.S.C.; VALADARES FILHO, S.C.; SILVA, J.F.C.; PAULINO, M.F.; CECON, P.R.; VALADARES, R.F.D.; FERREIRA, M.A.; OLIVEIRA, S.R. PAULINO, P.V.R. Composição corporal e requisitos energéticos e protéicos de bovinos nelore, não-castrados, alimentados com rações contendo diferentes níveis de concentrado. **Rev. Bras. Zootec.**, 30: 904-910, 2000.
- VÉRAS, A.S.C.; VALADARES FILHO, S.C.; SILVA, J.F.C.; PAULINO, M.F.; CECON, P.R.; FERREIRA, M.A.; LEÃO, M.I.; VALADARES, R.F.D.; MORAES, E.H.B.K. Predição da composição corporal e dos requisitos de energia e proteína para ganho de peso de bovinos, não-castrados,

- alimentados com rações contendo diferentes níveis de concentrado. **Rev. Bras. Zootec.**, 30: 1127-1134, 2001a.
- VÉRAS, A.S.C.; VALADARES FILHO, S.C.; SILVA, J.F.C.; PAULINO, M.F.; CECON, P.R.; FERREIRA, M.A.; VALADARES, R.F.D.; MORAES, E.H.B.K. Eficiência de utilização da energia metabolizável e de nutrientes digestíveis totais de bovinos nelore, não castrados. **Rev. Bras. Zootec.**, 30: 904-910, 2001b.
- VICENTE-CHANDLER, J. Intensive grassland management in Puerto Rico. **Rev. Soc. Bras. Zoot.**, 2: 173-215, 1973.
- VICENTE-CHANDLER, J.; SILVA, S.; FIGARELLA, J. The effect of nitrogen fertilization and frequency of cutting on the yield and composition of three tropical grasses. **Agron. J.**, 51: 202-206, 1959.
- VIEIRA, J.M.; KICHEL, A.N. Estabelecimento e recuperação de pastagens de *Panicum maximum*. In: SIMPÓSIO MANEJO DA PASTAGEM, 12, 1995, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1995. p.147-196.
- VITOUSEK, P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. **Am. Nat.**, 119: 553-572, 1982.
- VITOUSEK, P. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. **Ecology**, 65: 285-298, 1984.
- WERNER, J.C.; PAULINO, V.T.; CANTARELLA, H.; ANDRADE, N.O.; QUAGGIO, J.A. Forrageiras. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. (2ª ed. rev. atual.). Campinas, IAC, 1997. p. 261-273. (Boletim técnico, 100).
- WEST, C.P., MALLARINO, A.P., WEDIN, W.F.; MARX, D.B. Spatial variability of soil chemical properties in grazed pastures. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 53: 784-789, 1989.
- WHITE, P.F.; TREACHER, T.T.; TERMANINI, A.; RIHAWI, S. The accuracy of using the ratio of nitrogen to acid detergent fibre in faeces to partition nitrogen between faeces and urine in total excreta collections from ewes. **Grass For. Sci.**, 52: 122-124, 1997.
- WHITEHEAD, D.C. **Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships**. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2000. 369p.
- WILKINSON, S.R., LOWREY, R.W. Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystem. In: BUTLER, G.W. & BAILEY, R.W. (Eds.). **Chemistry and biochemistry of herbage**. New York: Academic Press, 1973. v.2, p. 247-315.
- WILKINSON, S.R., STUEDEMANN, J.A.; BELESKY, D.P. Soil potassium distribution in grazed K-31 tall fescue pastures as affected by fertilization and endophytic fungus infection level. **Agron. J.**, 81: 508-512, 1989.
- WILLIAMS, P.H., HAYNES, R.J. Transformations and plant uptake of urine N and S in long and short-term pastures. **Nutr. Cycl. Agroecosys.**, 56: 109-116, 2000.

- WILLIAMS, P.H.; GREGG, P.E.H.; HEDLEY, M.J. Mass balance modelling of potassium losses from grazed dairy pasture. **N. Z. J. Agric. Res.**, 33: 661-668, 1990.
- WILSON, J.R.; MINSON, D.J. Prospects for improving the digestibility and intake of tropical grasses. **Trop. Grassl.**, 14: 253-259, 1980.
- WRIGHT, I.J.; WESTOBY, M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of Australian sclerophyll species. **Functional Ecol.**, 17: 10-19, 2003.
- YOST, R.S.; NADERMAN, G.C.; KAMPRATH, E.J.; LOBATO, E. Availability of rock phosphate as measured by an acid tolerant pasture grass and extractable phosphorus. **Agron. J.**, 74: 462-468, 1982.
- ZEMMELINK, G.; 't MANNETJE, L. Value for animal production (VAP): a new criterion for tropical forage evaluation. **Anim. Feed Sci. Technol.**, 96: 31-42, 2002.
- ZIMMER, A.H.; EUCLIDES, V.P.B. Importância das pastagens para o futuro da pecuária de corte no Brasil. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 2000, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2000. p. 1-50.
- ZIMMER, A.H.; MACEDO, M.C.M.; BARCELLOS, A.O.; KICHEL, A.N. Estabelecimento e recuperação de pastagens de *Brachiaria*. In: SIMPÓSIO MANEJO DA PASTAGEM, 11, 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1994. p.153-208.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Quadro 1A. Valores sugeridos para o modificador para a raça ($j_{raça}$), o peso médio dos bezerros ao nascer ($\overline{PV}_{bez}$) e a produção de leite no pico da lactação (p_{pico}) utilizados no cálculo dos requerimentos de energia líquida de manutenção dos animais

Raça	$j_{raça}^1$	$\overline{PV}_{bez}$ (kg)	p_{pico} (kg dia ⁻¹)
Angus	1,00	31	8,0 (5,4) ³
Brahman	0,90	31	8,0 (5,4)
Brangus	0,95	33	8,0 (5,4)
Charolês	1,00	39	9,0 (6,0)
Chianina	1,00	41	6,0 (4,0)
Devon	1,00	32	8,0 (5,4)
Gelbvieh	1,10	39	11,5 (7,7)
Hereford	1,00	36	7,0 (4,7)
Holandês	1,20	43	15,0 (10,1)
Jersey	1,20	31	12,0 (8,5)
Limousin	1,00	37	9,0 (6,0)
Nelore	0,85 ²	40	7,0 (4,7)
Piemontês	1,00	38	7,0 (4,7)
Santa Gertrudes	0,90	33	8,0 (5,4)
Simental	1,20	39	12,0 (8,5)

Fonte: Modificado do NRC (1996).

¹ Para animais cruzados recomenda-se valores intermediários entre as raças. ² Esse valor é também recomendado para as demais raças zebuínas utilizadas no Brasil (Gir, Guzerá, Mocho Tabapuã).

³ Valor entre parênteses indica a produção média de leite durante toda a lactação.

Quadro 2A. Teor médio de nutrientes no leite ($T_{i \text{ leite}}$)

Nutriente	$T_{i \text{ leite}}$ (dag kg ⁻¹)
N	0,541
P	0,095
K	0,150
Ca	0,123
Mg	0,012
S	0,030

Fonte: NRC (1996); Whitehead (2000).

Quadro 3A. Dados utilizados para estimativas do consumo de forragem pelo submodelo animal apresentadas na figura 4.2.

Espécie	Período	$\overline{W}_{jejum}^{/2}$	g	NDT ^{/3}	DIVMS ^{/4}	DISMS ^{/5}	PB	FDN	FDA ^{/6}	M.O. ^{/6}	G	S	C _{cro} ^{/7}	C _{an} ^{/8}	Referência
		kg	kg dia ⁻¹	----- % -----				hrs dia ⁻¹				ha	(% PV)	(% PV)	
<i>B. humidicola</i>	jul	295,0	0,680	56,3	63,4		8,20	73,0 ^{/6}	44,0	94	10,50	1,0	2,58	2,89	Pereira et al. (1992a, b)
<i>B. humidicola</i>	nov	346,0	0,410	57,4	64,7		8,80	73,0 ^{/6}	44,0	94	8,50	1,0	1,91	2,11	
<i>B. humidicola</i>	mar	395,0	0,437	52,9	59,8		6,50	73,0 ^{/6}	44,0	94	8,50	1,0	2,40	2,47	
<i>B. decumbens</i>	set	206,1	0,260	57,4		65,0	7,60	73,7	43,0	94	9,42	1,5	1,95	2,13	Euclides et al. (2000)
<i>B. decumbens</i>	jan	234,3	0,550	64,5		71,7	8,40	66,8	38,0	94	8,83	1,5	2,60	2,08	
<i>B. decumbens</i>	maio	299,8	0,260	57,4		65,0	7,60	73,7	43,0	94	9,42	1,5	2,10	1,96	
<i>B. decumbens</i>	nov	328,0	0,550	64,5		71,7	8,40	66,8	38,0	94	8,83	1,5	2,80	1,93	
<i>B. brizantha</i>	set	206,1	0,170	56,4		63,3	8,20	73,1	43,0	94	10,08	1,5	2,00	2,05	
<i>B. brizantha</i>	jan	234,3	0,630	62,5		69,3	8,80	67,5	38,0	94	7,67	1,5	2,75	2,29	
<i>B. brizantha</i>	maio	299,8	0,170	56,4		63,3	8,20	73,1	43,0	94	10,08	1,5	2,08	1,88	
<i>B. brizantha</i>	nov	328,0	0,630	62,5		69,3	8,80	67,5	38,0	94	7,67	1,5	2,90	2,12	
Colonião ^{/1}	set	215,5	0,015	59,5		67,0	11,10	71,6	45,0	94	10,33	1,5	2,05	1,65	Euclides et al. (1999)
Colonião	jan	243,6	0,655	63,2		70,3	12,00	68,0	41,0	94	8,72	1,5	2,75	2,29	
Colonião	maio	318,6	0,140	59,5		67,0	11,10	71,6	45,0	94	10,03	1,5	2,28	1,65	
Colonião	nov	337,3	0,755	63,2		70,3	12,00	68,0	41,0	94	8,58	1,5	2,98	2,27	
Tobiatã ^{/1}	set	215,5	0,000	55,2		62,6	8,80	76,0	47,0	94	10,57	1,5	1,85	1,83	
Tobiatã	jan	243,6	0,610	59,7		66,1	10,80	69,2	41,0	94	7,52	1,5	2,58	2,44	
Tobiatã	maio	318,6	0,270	55,2		62,6	8,80	76,0	47,0	94	8,88	1,5	2,00	2,07	
Tobiatã	nov	337,3	0,620	59,7		66,1	10,80	69,2	41,0	94	8,82	1,5	2,89	2,30	
Tanzânia ^{/1}	set	215,5	0,158	58,4		67,1	7,50	72,2	45,0	94	10,13	1,5	2,00	1,89	
Tanzânia	jan	243,6	0,665	62,8		70,2	9,40	68,1	41,0	94	8,57	1,5	2,70	2,33	
Tanzânia	maio	318,6	0,315	58,4		67,1	7,50	72,2	45,0	94	9,62	1,5	2,22	1,95	Moore et al. (1969)
Tanzânia	nov	337,3	0,800	62,8		70,2	9,40	68,1	41,0	94	8,98	1,5	2,89	2,35	
<i>P. notatum</i>	verão	318,6	0,159		57,5		7,07	74,3	37,6	95	8,50	5,0	1,70	2,18	

¹ *Panicum maximum*. ¹² Todos os animais foram classificados como novilhos zebuínos castrados de porte médio. ¹³ Nutrientes digestíveis totais calculados pelo submodelo planta. ¹⁴ Digestibilidade *in vitro* da matéria seca. ¹⁵ Digestibilidade *in situ* da matéria seca. ¹⁶ Valores não disponíveis nos trabalhos originais, mas estimados com base na literatura (NRC, 1982, 1996). ¹⁷ Consumo estimado com óxido crômico. ¹⁸ Consumo estimado pelo submodelo animal.

Quadro 4A. Matéria seca de raízes de gramíneas forrageiras utilizadas pelo submodelo planta

Espécie	Biomassa de raízes	Referência
	(kg/ha)	
<i>Brachiaria humidicola</i> / <i>B. dictyoneura</i>	4.898 (3.690) 5.650 (4.124)	Gama R. e Cadima Z. (1991) ¹ Rao (1998) ²
<i>Brachiaria decumbens</i>	11.660 (10.390)	Kanno et al. (1999b) ³
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	18.660 (16.500)	Kanno et al. (1999b) ³
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	6.600 (4.908)	Bono et al. (2000) ⁴
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	9.490 (8.375) 9.284 (6.815)	Kanno et al. (1999b) ³ Bono et al. (2000) ⁴

¹ Biomassa de raízes até a profundidade de 100 cm e, entre parênteses, até 20 cm . Média de quatro tratamentos (duas taxas de lotação e dois sistemas de pastejo).

² Biomassa de raízes até a profundidade de 80 cm e, entre parênteses, até 20 cm. Adubação de implantação (kg ha⁻¹): 20 P, 20 K, 50 Ca, 20 Mg, 12 S.

³ Biomassa de raízes até a profundidade de 40 cm e, entre parênteses, até 20 cm. Média de dois níveis de adubação para renovação da pastagem (kg ha⁻¹): 35 P, 66 K e 70 P, 133 K. Adubação de manutenção (kg ha⁻¹): 50 N.

⁴ Biomassa de raízes até a profundidade de 40 cm e, entre parênteses, até 20 cm. Adubação de utilização (kg ha⁻¹): 50 N, 17,5 P, 33 K.

Quadro 5A. Conteúdo de nutrientes estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens de sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Conteúdo de nutrientes					
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
----- kg ha ⁻¹ -----						
Fase de estabelecimento						
1	136,4	17,1	94,9	26,5	16,7	15,4
2	186,3	20,6	117,3	44,8	41,2	23,4
3	212,1	23,5	133,6	51,0	47,0	26,7
4	318,6	30,8	273,4	68,9	59,0	32,1
5	330,6	31,9	283,7	71,5	61,2	33,3
6	378,3	48,2	379,6	131,7	80,0	40,9
7	397,1	50,6	398,5	138,2	83,9	42,9
Fase de utilização						
1	144,6	14,0	109,6	31,5	19,8	16,3
2	166,3	15,1	112,8	44,2	40,7	20,9
3	196,3	17,8	133,2	52,2	48,1	24,7
4	361,9	34,0	330,3	85,0	72,9	36,4
5	379,3	35,6	346,2	89,1	76,4	38,2
6	449,3	48,6	479,7	170,0	103,2	48,6
7	476,8	51,5	509,0	180,4	109,5	51,5

Quadro 6A. Demanda de nutrientes estimada pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens de sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Demanda de nutrientes				
	Nitrogênio	Potássio	Cálcio	Magnésio	Enxofre
----- kg ha ⁻¹ -----					
Fase de estabelecimento					
1	174,6	73,4	52,9	14,2	19,7
2	248,8	95,8	89,6	36,7	31,3
3	296,9	115,8	102,0	43,8	37,4
4	471,6	253,9	137,7	58,2	47,5
5	542,2	298,8	142,9	67,0	54,6
6	680,9	447,1	263,4	95,9	73,6
7	683,1	444,6	276,5	96,2	73,8
Fase de utilização					
1	133,0	54,1	63,0	12,2	15,0
2	167,0	63,0	88,4	27,2	21,0
3	216,0	84,4	104,4	35,2	27,2
4	441,5	240,0	170,0	59,3	44,4
5	553,8	316,2	178,2	74,3	55,8
6	763,9	527,7	340,0	117,0	82,6
7	753,3	512,4	360,8	115,4	81,4

Quadro 7A. Demanda de fósforo estimada pelo FERTICALC-Pastagem, em solos com diferentes valores de fator capacidade de fósforo, para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens de sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Demanda de fósforo									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	162,7	158,5	149,0	145,2	140,9	135,7	133,2	128,7	124,0	119,7
2	205,2	199,8	187,9	183,1	177,7	171,1	168,0	162,3	156,4	150,9
3	244,8	238,4	224,2	218,5	212,0	204,2	200,4	193,7	186,6	180,1
4	339,0	330,1	310,5	302,5	293,6	287,7	277,5	268,2	258,4	249,4
5	389,8	379,6	357,0	347,8	337,6	325,1	319,1	308,4	297,1	286,7
6	646,8	629,9	592,4	577,1	560,2	539,4	529,4	511,7	503,8	475,8
7	648,8	631,9	594,3	578,9	561,9	541,1	531,1	513,3	494,5	477,3
Fase de utilização										
1	24,0	23,4	22,0	21,4	20,8	20,0	19,6	19,0	18,3	17,6
2	28,3	27,5	25,9	25,2	24,5	23,6	23,1	22,4	21,5	20,8
3	36,6	35,6	33,5	32,6	31,7	30,5	29,9	28,9	27,9	26,9
4	77,2	75,2	70,8	68,9	66,9	64,4	63,2	61,1	58,9	56,8
5	96,9	94,4	88,8	86,5	83,9	80,8	79,3	76,7	73,9	71,3
6	153,8	149,8	140,8	137,2	133,2	128,2	125,9	121,6	117,2	113,1
7	151,6	147,7	138,9	135,3	131,3	126,5	124,1	120,0	115,6	111,5

Quadro 8A. Suprimento de nitrogênio estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Suprimento de nitrogênio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	40,99	87,05	114,99	162,36	132,73	130,47	109,26	165,94	156,95	161,19
2	31,58	68,15	93,31	133,71	111,09	111,38	94,15	144,11	139,78	145,68
3	31,58	68,15	93,31	133,71	111,09	111,38	94,15	144,11	139,78	145,68
4	31,58	68,15	93,31	133,71	111,09	111,38	94,15	144,11	139,78	145,68
5	31,58	68,15	93,31	133,71	111,09	111,38	94,15	144,11	139,78	145,68
6	31,58	68,15	93,31	133,71	111,09	111,38	94,15	144,11	139,78	145,68
7	31,58	68,15	93,31	133,71	111,09	111,38	94,15	144,11	139,78	145,68
Fase de utilização										
1	34,43	45,94	52,93	64,77	57,36	56,80	51,50	65,66	63,42	64,48
2	38,04	47,18	53,47	63,57	57,92	57,99	53,68	66,17	65,09	66,56
3	41,08	50,22	56,51	66,61	60,96	61,03	56,72	69,21	68,13	69,60
4	69,77	78,91	85,20	95,30	89,64	89,72	85,41	97,90	96,81	98,29
5	29,39	38,53	44,83	54,92	49,27	49,34	45,03	57,52	56,44	57,92
6	-14,93	-5,79	0,50	10,60	4,95	5,02	0,71	13,20	12,12	13,59
7	9,58	18,72	25,01	35,11	29,46	29,53	25,22	37,71	36,63	38,10

Quadro 9A. Suprimento de fósforo estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Suprimento de fósforo									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
2	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
3	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
4	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
5	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
6	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
7	3,28	16,65	26,42	16,37	9,79	69,26	19,05	3,47	3,64	2,16
Fase de utilização										
1	4,81	14,84	22,17	14,63	9,69	54,30	16,64	4,95	5,08	3,97
2	5,22	15,25	22,58	15,04	10,11	54,71	17,06	5,37	5,49	4,39
3	5,53	15,55	22,89	15,35	10,41	55,02	17,36	5,67	5,80	4,69
4	8,51	18,54	25,87	18,33	13,39	58,00	20,34	8,65	8,78	7,67
5	8,56	18,59	25,92	18,38	13,44	58,05	20,39	8,70	8,83	7,72
6	10,84	20,86	28,20	20,65	15,72	60,33	22,67	10,98	11,11	10,00
7	11,14	21,17	28,50	20,96	16,02	60,63	22,98	11,29	11,41	10,30

Quadro 10A. Suprimento de potássio estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Suprimento de potássio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
2	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
3	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
4	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
5	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
6	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
7	9,98	124,69	79,80	274,31	137,16	498,75	199,50	104,74	24,94	67,33
Fase de utilização										
1	28,05	114,09	80,42	226,31	123,44	394,64	170,20	99,12	39,27	71,07
2	29,49	115,52	81,85	227,74	124,87	396,07	171,63	100,56	40,71	72,50
3	30,97	117,00	83,34	229,22	126,35	397,55	173,11	102,04	42,19	73,99
4	56,64	154,93	177,37	267,15	164,28	435,48	211,04	139,96	80,11	111,91
5	56,92	142,95	109,29	255,17	152,31	423,50	199,06	127,99	68,14	99,94
6	60,91	146,94	113,28	259,16	156,29	427,49	203,05	131,98	72,13	103,93
7	73,86	159,90	126,23	272,12	169,25	440,44	216,01	144,93	85,08	116,88

Quadro 11A. Suprimento de cálcio estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Suprimento de cálcio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
2	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
3	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
4	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
5	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
6	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
7	73,10	939,83	219,29	2.453,99	976,37	344,60	1.133,01	1.096,46	793,63	610,89
Fase de utilização										
1	68,97	719,02	178,62	1.854,64	746,43	272,60	863,91	836,50	609,37	472,31
2	76,13	726,17	185,77	1.861,80	753,58	279,76	871,06	843,65	616,53	479,47
3	78,06	728,10	187,70	1.863,72	755,51	281,69	872,99	845,58	618,46	481,40
4	91,72	741,76	201,36	1.877,39	769,18	295,35	886,65	859,24	632,12	495,06
5	67,09	717,14	176,74	1.852,76	744,55	270,72	862,03	834,61	607,49	470,43
6	30,96	681,00	140,60	1.816,62	708,41	234,59	825,89	798,48	571,36	434,30
7	54,70	704,74	164,35	1.840,37	732,16	258,33	849,63	822,22	595,10	458,04

Quadro 12A. Suprimento de magnésio estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Suprimento de magnésio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	----- kg ha ⁻¹ -----									
	Fase de estabelecimento									
1	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
2	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
3	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
4	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
5	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
6	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
7	15,21	231,17	60,83	301,13	258,54	106,46	170,33	139,92	66,92	112,54
	Fase de utilização									
1	15,01	176,98	49,22	229,44	197,51	83,44	131,35	108,54	53,79	88,01
2	19,45	181,42	53,67	233,89	201,95	87,89	135,79	112,98	58,23	92,45
3	20,47	182,44	54,69	234,91	202,97	88,91	136,82	114,00	59,25	93,47
4	26,41	188,38	60,63	240,85	240,85	94,85	142,76	119,94	65,19	99,41
5	21,30	183,27	55,52	235,74	203,80	89,74	137,64	114,83	60,08	94,30
6	18,78	180,75	52,99	233,21	201,28	87,21	135,12	112,31	57,56	91,78
7	22,98	184,95	57,20	237,42	205,49	91,42	139,33	116,52	61,77	95,99

Quadro 13A. Suprimento de enxofre estimado pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Suprimento de enxofre									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	----- kg ha ⁻¹ -----									
	Fase de estabelecimento									
1	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
2	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
3	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
4	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
5	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
6	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
7	12,94	38,66	26,06	23,76	14,94	27,98	12,31	11,07	8,19	8,20
	Fase de utilização									
1	12,43	31,72	22,27	20,55	13,94	23,71	11,96	11,03	8,87	8,88
2	13,49	32,78	23,33	21,61	15,00	24,77	13,02	12,09	9,93	9,94
3	13,86	33,16	23,70	21,98	15,37	25,15	13,40	12,47	10,31	10,31
4	15,87	35,16	25,71	23,99	17,37	27,15	15,40	14,47	12,31	12,32
5	11,74	31,04	21,58	19,86	13,25	23,02	11,28	10,34	8,19	8,19
6	7,03	26,32	16,87	15,15	8,54	18,31	6,56	5,63	3,48	3,48
7	9,73	29,03	19,57	17,85	11,24	21,01	9,27	8,33	6,18	6,18

Quadro 14A. Doses de nitrogênio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Dose de nitrogênio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	133,60	87,54	59,60	12,24	41,86	44,12	65,33	8,66	17,64	13,40
2	217,26	180,69	155,53	115,14	137,75	137,46	154,69	104,73	109,06	103,16
3	251,20	214,63	189,47	149,08	171,69	171,40	188,64	138,68	143,00	137,10
4	439,98	403,41	378,24	337,85	360,46	360,18	377,41	327,45	331,78	325,88
5	510,66	474,09	448,93	408,54	431,15	430,86	448,10	398,14	402,47	396,56
6	649,35	612,78	587,61	547,22	569,84	569,55	586,78	536,82	541,15	535,25
7	651,51	614,94	589,77	549,38	572,00	571,71	588,94	538,98	543,31	537,41
Fase de utilização										
1	98,61	87,10	80,12	68,27	75,68	76,24	81,55	67,38	69,63	68,57
2	128,92	119,78	113,49	103,39	109,05	108,97	113,28	100,79	101,88	100,40
3	174,91	165,76	159,47	149,37	155,03	154,96	159,26	146,77	147,86	146,38
4	371,76	362,62	356,32	346,23	351,88	351,81	356,12	343,63	344,71	343,23
5	524,45	515,31	509,02	498,92	504,58	504,50	508,81	496,32	497,40	495,93
6	778,81	769,66	763,37	753,27	758,93	758,86	763,16	750,67	751,76	750,28
7	743,69	734,55	728,26	718,16	723,81	723,74	728,05	715,56	716,64	715,17

Quadro 15A. Doses de fósforo estimadas pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Dose de fósforo									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	31,89	28,36	24,52	25,76	26,23	13,29	22,83	25,05	24,07	23,51
2	40,38	36,64	32,30	33,34	33,58	20,37	29,78	31,77	30,55	29,76
3	47,00	43,08	38,37	39,25	39,32	25,89	35,20	37,01	35,59	34,63
4	67,14	62,69	56,81	57,22	56,76	42,69	51,68	52,94	50,94	49,44
5	77,30	63,10	66,12	66,29	65,56	51,16	60,00	60,98	58,69	56,92
6	128,70	122,65	113,20	112,15	110,08	94,02	102,07	101,64	97,86	94,73
7	129,11	123,05	113,57	112,51	110,43	94,37	102,41	101,96	98,17	95,03
Fase de utilização										
1	19,16	8,51	-0,21	6,76	11,07	-34,30	2,98	14,01	13,19	13,66
2	23,04	12,27	3,30	10,18	14,37	-31,14	6,08	16,99	16,04	16,41
3	31,03	20,05	10,60	17,28	21,25	-24,53	12,56	23,25	22,06	22,20
4	68,73	56,69	44,88	50,59	53,51	6,42	42,88	52,45	50,09	49,15
5	88,34	75,78	62,83	68,08	70,48	22,76	58,92	67,95	65,02	63,56
6	142,92	128,88	112,64	116,54	117,45	67,91	103,19	110,66	106,08	103,11
7	140,49	126,50	110,38	114,33	115,30	65,82	101,14	108,67	104,15	101,24

Quadro 16A. Doses de potássio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Dose de potássio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	63,45	-51,27	-6,38	-200,89	-63,74	-425,33	-126,08	-31,32	48,48	6,09
2	85,86	-28,85	16,04	-178,48	-41,32	-402,92	-103,66	-8,90	70,90	28,50
3	101,64	-13,07	31,82	-162,69	-25,54	-387,13	-87,88	6,88	86,68	44,29
4	243,96	129,24	99,32	-20,38	116,78	-244,82	54,43	149,19	228,99	186,60
5	288,84	174,12	219,01	24,50	161,65	-199,94	99,31	194,07	273,87	231,48
6	437,14	322,42	367,31	172,80	309,95	-51,64	247,61	342,37	422,17	379,78
7	434,62	319,91	364,79	170,28	307,44	-54,16	245,09	339,86	419,66	377,26
Fase de utilização										
1	26,03	-60,01	-26,34	-172,23	-69,36	-340,55	-116,12	-45,04	14,81	-16,99
2	33,53	-52,50	-18,83	-164,72	-61,85	-333,05	-108,61	-37,54	22,31	-9,48
3	53,38	-32,65	1,02	-144,87	-42,00	-313,20	-88,76	-17,69	42,16	10,37
4	183,40	85,11	62,67	-27,11	75,76	-195,44	29,00	100,07	159,93	128,13
5	259,32	173,29	206,95	61,07	163,93	-107,26	117,18	188,25	248,10	216,30
6	466,76	380,72	414,39	268,51	371,37	100,18	324,61	395,69	455,54	423,74
7	438,50	352,46	386,13	240,24	343,11	71,91	296,35	367,43	427,28	395,48

Quadro 17A. Doses de cálcio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Dose de cálcio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	-20,18	-886,91	-166,37	-2401,07	-923,45	-291,68	-1080,09	-1043,54	-740,71	-557,97
2	16,47	-850,26	-129,73	-2364,42	-886,81	-255,04	-1043,45	-1006,90	-704,07	-521,32
3	28,88	-837,84	-117,31	-2352,01	-874,39	-242,62	-1031,03	-994,48	-691,65	-508,90
4	64,61	-802,11	-81,58	-2316,28	-838,66	-206,89	-995,30	-958,75	-655,92	-473,17
5	69,81	-796,92	-76,39	-2311,08	-833,47	-201,70	-990,11	-953,56	-650,72	-467,98
6	190,28	-676,45	44,08	-2190,61	-713,00	-81,23	-869,64	-833,09	-530,26	-347,51
7	203,40	-663,33	57,21	-2177,49	-699,87	-68,10	-856,51	-819,96	-517,13	-334,39
Fase de utilização										
1	-6,00	-656,04	-115,64	-1791,66	-683,45	-209,62	-800,93	-773,52	-546,40	-409,34
2	12,25	-637,79	-97,39	-1773,41	-665,20	-191,37	-782,68	-755,27	-528,15	-391,09
3	26,30	-623,75	-83,35	-1759,37	-651,16	-177,33	-768,64	-741,23	-514,10	-377,04
4	78,30	-571,74	-31,34	-1707,36	-599,15	-125,32	-716,63	-689,22	-462,10	-325,04
5	111,13	-538,92	1,48	-1674,54	-566,33	-92,50	-683,81	-656,40	-429,27	-292,22
6	309,08	-340,96	199,44	-1476,59	-368,38	105,45	-485,85	-458,44	-231,32	-94,26
7	306,09	-343,96	196,44	-1479,58	-371,37	102,46	-488,85	-461,44	-234,31	-97,25

Quadro 18A. Doses de magnésio estimadas pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Dose de magnésio									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	-0,99	-216,95	-46,62	-286,91	-244,33	-92,24	-156,12	-125,70	-52,70	-98,33
2	21,53	-194,43	-24,10	-264,39	-221,81	-69,72	-133,60	-103,18	-30,18	-75,81
3	27,24	-188,72	-18,38	-258,68	-216,09	-64,01	-127,88	-97,47	-24,47	-70,09
4	43,02	-172,94	-2,60	-242,89	-242,89	-48,23	-112,10	-81,68	-8,68	-54,31
5	51,75	-164,21	6,13	-234,16	-191,58	-39,50	-103,37	-72,96	0,04	-45,58
6	80,74	-135,22	35,11	-205,18	-162,60	-10,52	-74,39	-43,97	29,03	-16,60
7	81,04	-134,92	35,41	-204,88	-162,30	-10,21	-74,09	-43,67	29,33	-16,29
Fase de utilização										
1	-2,85	-164,82	-37,07	-217,28	-185,35	-71,28	-119,19	-96,38	-41,63	-75,85
2	7,79	-154,18	-26,42	-206,64	-174,71	-60,64	-108,55	-85,74	-30,99	-65,21
3	14,77	-147,20	-19,45	-199,67	-167,73	-53,67	-101,57	-78,76	-24,01	-58,23
4	32,85	-129,12	-1,37	-181,59	-181,59	-35,59	-83,49	-60,68	-5,93	-40,15
5	53,04	-108,93	18,83	-161,39	-129,46	-15,39	-63,30	-40,49	14,26	-19,96
6	98,21	-63,76	64,00	-116,22	-84,29	29,78	-18,13	4,68	59,43	25,21
7	92,38	-69,59	58,16	-122,06	-90,12	23,94	-23,96	-1,15	53,60	19,38

Quadro 19A. Doses de enxofre estimadas pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Dose de enxofre									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----- kg ha ⁻¹ -----										
Fase de estabelecimento										
1	6,78	-18,95	-6,34	-4,05	4,77	-8,27	7,40	8,64	11,52	11,51
2	18,39	-7,34	5,27	7,56	16,38	3,34	19,01	20,25	23,13	23,12
3	22,66	-3,07	9,54	11,83	20,65	7,62	23,28	24,52	27,40	27,39
4	34,54	8,81	21,42	23,71	32,53	19,49	35,16	36,40	39,28	39,27
5	41,65	15,93	28,53	30,83	39,64	26,61	42,27	43,52	46,39	46,39
6	60,68	34,95	47,56	49,85	58,67	45,64	61,30	62,54	65,42	65,41
7	60,91	35,19	47,79	50,08	58,90	45,87	61,53	62,78	65,65	65,65
Fase de utilização										
1	2,59	-16,70	-7,25	-5,53	1,08	-8,69	3,06	3,99	6,15	6,14
2	7,53	-11,77	-2,31	-0,59	6,02	-3,75	7,99	8,93	11,08	11,08
3	13,32	-5,97	3,48	5,20	11,82	2,04	13,79	14,72	16,88	16,87
4	28,58	9,29	18,74	20,46	27,08	17,30	29,05	29,98	32,14	32,13
5	44,01	24,72	34,17	35,89	42,51	32,73	44,48	45,41	47,57	47,57
6	75,55	56,26	65,71	67,43	74,04	64,27	76,02	76,95	79,11	79,10
7	71,70	52,41	61,86	63,58	70,19	60,42	72,17	73,10	75,26	75,25

Quadro 20A. Necessidade de calagem estimada pelo FERTICALC-Pastagem para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Necessidade de calagem									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	----- t ha ⁻¹ -----									
	Fase de estabelecimento									
1	2,63	2,73	2,78	3,45	3,48	4,09	4,12	2,63	2,73	2,78
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,07	1,07	1,07	1,50	1,50	1,92	1,95	1,07	1,07	1,07
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Fase de utilização									
1	2,63	2,70	2,76	3,51	3,58	4,31	4,34	2,63	2,70	2,76
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,07	1,07	1,07	1,50	1,50	2,14	2,17	1,07	1,07	1,07
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro 22A. Níveis críticos de nutrientes estimados para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens de sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Nível crítico dos nutrientes			
	Potássio	Cálcio	Magnésio	X ^{II}
	----- mg dm ⁻³ -----	----- cmol _c dm ⁻³ -----		
		Fase de estabelecimento		
1	29,4	0,10	0,05	0,15
2	38,4	0,17	0,12	0,29
3	46,4	0,20	0,14	0,34
4	101,8	0,26	0,19	0,46
5	119,8	0,27	0,22	0,49
6	179,3	0,50	0,32	0,82
7	178,3	0,53	0,32	0,85
		Fase de utilização		
1	28,9	0,12	0,04	0,16
2	33,7	0,17	0,09	0,26
3	45,1	0,20	0,12	0,32
4	128,3	0,33	0,19	0,52
5	169,1	0,34	0,24	0,59
6	282,1	0,65	0,38	1,04
7	273,9	0,69	0,38	1,07

^{VI} Equivalente a soma dos níveis críticos de Ca e Mg.

Quadro 23A. Níveis críticos de enxofre estimados para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Nível crítico de enxofre									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	----- mg dm ⁻³ -----									
	Fase de estabelecimento									
1	1,5	2,4	4,4	5,4	6,4	7,8	8,6	9,9	11,4	12,9
2	2,5	3,8	7,1	8,5	10,2	12,5	13,6	15,7	18,1	20,6
3	2,9	4,5	8,4	10,2	12,2	14,9	16,2	18,8	21,6	24,5
4	3,7	5,8	10,7	12,9	15,5	18,9	20,6	23,8	27,5	31,2
5	4,3	6,6	12,3	14,9	17,8	21,7	23,7	27,4	31,6	35,8
6	5,8	8,9	16,6	20,0	24,0	29,3	32,0	37,0	42,6	48,3
7	5,8	9,0	16,7	20,1	24,1	29,4	32,1	37,1	42,8	48,5
	Fase de utilização									
1	1,2	1,8	3,4	4,1	4,9	6,0	6,5	7,5	8,7	9,9
2	1,6	2,6	4,7	5,7	6,9	8,4	9,1	10,6	12,2	13,8
3	2,1	3,3	6,1	7,4	8,9	10,8	11,8	13,7	15,7	17,8
4	3,5	5,4	10,0	12,1	14,5	17,7	19,3	22,3	25,7	29,2
5	4,4	6,8	12,6	15,2	18,2	22,2	24,2	28,0	32,3	36,6
6	6,5	10,0	18,6	22,5	27,0	32,9	35,9	41,5	47,8	54,2
7	6,4	9,9	18,4	22,2	26,6	32,4	35,4	40,9	47,2	53,4

Quadro 24A. Níveis críticos de fósforo estimados para as fases de estabelecimento e de utilização de pastagens em dez solos e sete sistemas de produção de bovinos de corte

Sistema	Nível crítico de fósforo									
	Solo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	----- mg dm ⁻³ -----									
	Fase de estabelecimento									
1	9,9	13,3	20,9	24,0	27,4	31,5	33,5	37,1	40,9	44,4
2	12,5	16,8	26,3	30,2	34,5	39,8	42,3	46,8	51,6	56,0
3	14,9	20,1	31,4	36,0	41,2	47,5	50,5	55,9	61,5	66,8
4	20,7	27,8	43,5	49,9	57,0	66,9	69,9	77,3	85,2	92,5
5	23,8	31,9	50,0	57,4	65,5	75,6	80,4	88,9	98,0	106,4
6	39,5	53,0	83,0	95,2	108,8	125,4	133,4	147,6	166,1	176,6
7	39,6	53,1	83,2	95,5	109,1	125,8	133,8	148,0	163,1	177,1
	Fase de utilização									
1	1,9	2,6	4,1	4,7	5,4	6,2	6,6	7,3	8,0	8,7
2	2,3	3,1	4,8	5,5	6,3	7,3	7,8	8,6	9,5	10,3
3	3,0	4,0	6,3	7,2	8,2	9,4	10,0	11,1	12,2	13,3
4	6,3	8,4	13,2	15,2	17,3	20,0	21,2	23,5	25,9	28,1
5	7,9	10,6	16,6	19,0	21,7	25,0	26,6	29,5	32,5	35,3
6	12,5	16,8	26,3	30,2	34,5	39,7	42,3	46,8	51,5	56,0
7	12,3	16,6	25,9	29,8	34,0	39,2	41,7	46,1	50,8	55,2

APÊNDICE B

Para estimar o valor de NDT de forrageiras, MOORE¹ sugeriu três equações somatórias baseadas na digestão *in vitro* da matéria seca e da fibra em detergente neutro de forragens:

$$NDT = 0,95 \cdot dMSp \quad (1)$$

$$NDT = (0,98 \text{ CNF}) + (0,87 \text{ PB}) + (0,97 \text{ AG } 2,25) + (FDNn \text{ dFDNp}/100) - 10 \quad (2)$$

$$NDT = (0,98 \text{ CNF}) + (0,87 \text{ PB}) + (0,97 \text{ AG } 2,25) + (FDNn \text{ } 1,09 \text{ dMSp}/100) - 10 \quad (3)$$

em que:

Proteína bruta (PB) = 6,25 x teor de nitrogênio na forragem;

Fibra em detergente neutro (FDN);

FDN não nitrogenado (FDNn) = 0,93 x FDN;

Ácidos graxos (AG) = 1 - Extrato etéreo (EE);

Carboidratos não-fibrosos (CNF) = 100 – cinzas – PB – FDNn – EE;

Digestibilidade *in vitro* da FDN por 48 horas (DIVFDN);

Digestibilidade *in vitro* da matéria seca por 48 horas (DIVMS);

FDN digestível predita (dFDNp) = 22,7 + 0,642 DIVFDN;

Matéria seca digestível predita (dMSp) = 20,1 + 0,630 DIVMS.

Todos os valores são expressos em dag kg⁻¹ de MS; exceto a digestibilidade *in vitro* da FDN (DIVFDN) e a digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS), expressas em %, e a FDN digestível predita (dFDNp) que é expressa como dag kg⁻¹ de FDN.

Os valores para o intercepto (b_0) e para o estimador do parâmetro β_1 (b_1) das equações para estimar a FDN digestível predita (dFDNp) e a matéria seca digestível predita (dMSp) são baseados em regressão entre a digestão *in vivo* e

¹ MOORE, J.E. (Department of Animal Sciences, University of Florida, Gainesville, USA). Comunicação pessoal, 2002.

digestão *in vitro* para FDN ($R^2 = 0,81$; $s_{\text{erro}} = 2,9$) e para MS ($R^2 = 0,75$; $s_{\text{erro}} = 3,0$), respectivamente. MOORE ressaltou que essas equações são específicas para os dados utilizados (40 gramíneas tropicais e temperadas: dados S-45), devendo ser validadas para outras forragens, especialmente as com digestibilidade menor do que 55 %.

Na equação (3), obteve-se a constante 1,09, que converte a matéria seca digestível predita (dMSp) em FDN digestível predita (dFDNp), a partir de uma regressão entre a FDN digestível *in vivo* e a matéria seca digestível *in vivo* ($b_0 = 0$; $b_1 = 1,09$; $R^2 = 0,87$; $s_{\text{erro}} = 2,4$).

As equações (1), (2) e (3) foram avaliadas por meio de regressões lineares simples entre os valores de NDT por elas estimados e valores de NDT *in vivo*. Em todas as regressões, estatisticamente, o estimador b_0 não foi diferente de zero e o b_1 não diferiu de um. A média do NDT *in vivo* foi de $53,9 \pm 5,2$; para as equações (1), (2) e (3) as médias do NDT estimado foram, respectivamente, $53,9 \pm 4,9$; $53,9 \pm 5,7$; e $54,3 \pm 4,9$.

A equação (2) está sendo recomendada por Moore ao *National Forage Testing Association*. Esse autor destacou que as outras duas equações são aceitáveis, por serem os erros de predição estimados para o NDT similares à variação entre animais que recebem um mesma dieta.