

GERCINO FERREIRA VIRGÍNIO JÚNIOR

**OBSERVAÇÕES SOBRE O CONSUMO E A DIGESTIBILIDADE DE
NUTRIENTES E DE ENERGIA POR BOVINOS ARRAÇOADOS COM NÍVEIS
CRESCENTES DE FIBRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V817o
2014

Virgínio Júnior, Gercino Ferreira, 1989-
Observações sobre o consumo e a digestibilidade de nutrientes e
de energia por bovinos arraçoados com níveis crescentes de fibra /
Gercino Ferreira Virgínio Júnior. – Viçosa, MG, 2014.
x, 54f. : il. ; 29cm

Orientador: José Carlos Pereira
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa
Referências bibliográficas: f.46-54

1. Nutrição animal. 2. Bovino – Nutrição – Fibra. 3. Modelos matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Zootecnia. Programa de Pós-graduação em Zootecnia. II. Título.

CDD 22. Ed. 636.085

GERCINO FERREIRA VIRGÍNIO JÚNIOR

**OBSERVAÇÕES SOBRE O CONSUMO E A DIGESTIBILIDADE DE
NUTRIENTES E DE ENERGIA POR BOVINOS ARRAÇOADOS COM NÍVEIS
CRESCENTES DE FIBRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovado: 29 de agosto de 2014

Cristina Mattos Veloso

Leonardo Marmo Moreira

Ricardo Augusto Mendonça Vieira
(Coorientador)

Fernando de Paula Leonel
(Coorientador)

José Carlos Pereira
(Orientador)

A Deus, por estar sempre presente na minha vida.

Aos meus pais, Gercino e Terezinha, e minha irmã, Patrícia, pelo apoio, suporte e por sempre acreditarem em mim.

À todos os meus familiares, que mesmo longe, sempre torceram pelas minhas conquistas.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, e ao Departamento de Zootecnia, pela formação e realização deste curso.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), pela oportunidade de realização do experimento, e pelo gratificante ano que passei em Campos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, professor José Carlos Pereira, pela atenção, dedicação, ensinamentos, pelas várias histórias e pelo compartilhamento de suas experiências. Muito obrigado por essa oportunidade. Serei sempre grato!

Ao meu co-orientador, professor Ricardo Augusto Mendonça Vieira, pelos valiosos ensinamentos, pela atenção e paciência desde o início. Obrigado por me receber bem em Campos, e pela gratificante experiência que foi trabalhar com o senhor.

A professora Christina Mattos Veloso, que, desde a época como orientadora do estágio de conclusão de curso, mostrou-se como uma verdadeira mãe, sendo sempre atenciosa e me dando todo o apoio necessário.

Aos professores Fernando de Paula Leonel e Leonardo Marmo Moreira, por toda a contribuição dada ao trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Zootecnia, pelos ensinamentos e pela agradável convivência.

Ao Wagner Pessanha Tammy e ao Matheus Lima Corrêa Abreu (Matheuzim), por me aceitarem como parte de todo o trabalho, e pela compreensão, amizade e paciência. Sem vocês, esse trabalho não teria sido concluído.

Ao Flávio Henrique (Maraca), Raphael Gomes (Robocop), Nardele, Carlos Henrique (Carlim), Davi, Rafael Freitas (Pancinha), Jefferson Thadeu (Jeffim), Marcelo, Leonardo, por toda a ajuda durante o experimento, por terem me recebido tão bem em Campos e por toda a amizade.

Aos funcionários da UENF: Robson (Robinho) e Almir, e do DZO: Fernanda e Mariana, pela amizade, apoio e disposição em ajudar.

Aos amigos de Campos dos Goytacazes, Rafael Walter, Rodrigo Miranda, Bebeth, Renata, Tiago, Marcella, Laila, Yara e Karla. Vocês fizeram cada dia que passei em Campos mais agradável e divertido.

Ao quarteto fantástico, Rafael, Vinícius, Karol e Nathália (Nathy), pela longa amizade, apoio, pelas brigas... enfim, por serem como irmãos²

Aos companheiros da república MTM 1203, Gabriel (Macaúba), Matheus, Marquinho, Daniel, Douglas e Ana Laura (Agregada), pela amizade, companheirismo e por serem minha família em Viçosa.

Aos companheiros do “bonde”, Jarbas (Capivara), Vanessa Paula, Mariele e Aline Naime, pelos almoços de domingo e o hot dog no dimarte, pelos altos papos na net, por essa amizade que só a gente aguenta.

A Camila, Tathy, Cândida, Darlene e Marco Aurélio, que foram as primeiras pessoas que conheci em Viçosa e, hoje, são meus grandes amigos.

Aos amigos: Luana, Leidy, Sâmara, João Paulo, Sirlene, Karina, Leticia, Paola, Clarissa (Ciça), Emily, Tiago, Taiane, Juliana (Ju), Bruno, Hélivio (Junim), Paula, Fabiana Lopes e Marina, por todo apoio, pela ajuda, pelas longas horas de estudo na BBT, pelos materiais de estudos emprestados, pelas horas de diversão. Esses dois anos de mestrado não seriam os mesmos sem vocês.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Obrigado!

BIOGRAFIA

Gercino Ferreira Virgínio Júnior, filho de Gercino Ferreira Virgínio e Terezinha Ferreira de Souza, nasceu no dia 04 de julho de 1989, em Montes Claros, Minas Gerais.

Em janeiro de 2012, graduou-se em Zootecnia pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Em novembro de 2012, iniciou o curso de mestrado em Zootecnia na Universidade Federal de Viçosa, concentrado seus estudos na área Nutrição e Produção de Ruminantes, submetendo-se à defesa de dissertação no dia 29 de agosto de 2014.

Sumário

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Sistemas para avaliação de alimentos e determinação de exigências nutricionais.	3
2.1.1. Os sistemas britânicos ARC e AFRC	7
2.1.2. O sistema CNCPS	9
2.2 Valor nutritivo dos alimentos	11
2.2.1. Digestibilidade	11
2.2.2. Digestibilidade total	12
2.2.3. Digestibilidade aparente	12
2.2.4. Digestibilidade verdadeira	12
2.3. Consumo de matéria seca	13
2.4. Valor energético dos alimentos	15
2.4.1. Energia bruta (EB)	15
2.4.2. Nutrientes digestíveis totais (NDT)	15
2.4.3. Energia digestível (ED)	17
2.4.4. Energia metabolizável (EM)	18
2.4.5. Metabolizabilidade	19
2.4.6. Eficiência de utilização da EM	19
2.5. Manutenção e metabolismo basal	20
2.5.1 Exigência de energia para manutenção	21
2.7. Taxa de passagem e tempo médio de retenção	24
2.7.1. Estimativa da taxa de passagem	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Formulação das dietas experimentais	28
3.2 Animais, alimentação e duração do experimento	30
3.3 Análises químicas das dietas oferecidas, sobras e fezes	30
3.4 Quantidades computadas	31
3.5 Análise estatística	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

RESUMO

VIRGÍNIO JÚNIOR, Gercino Ferreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2014. **Observações sobre o consumo e a digestibilidade de nutrientes e de energia por bovinos arraçoados com níveis crescentes de fibra.** Orientador: José Carlos Pereira. Coorientadores: Fernando de Paula Leonel e Ricardo Augusto Mendonça Vieira.

O objetivo básico estabelecido para o presente trabalho foi o de quantificar o consumo de matéria seca, nutrientes e energia digestível de bovinos em função da oferta de fibra na dieta. O experimento foi conduzido em dois quadrados latinos simultâneos e balanceados para quatro tratamentos. Foram utilizados quatro níveis de oferta diária de fibra insolúvel em detergente neutro, escalonada para a massa corporal dos animais: 3, 6, 9 e 12 g/(kg.dia). Oito bovinos mestiços, quatro com 298 ± 27 kg e quatro com 219 ± 16 kg, foram divididos aleatoriamente, no início do experimento, como colunas nos quadrados latinos. Os períodos experimentais consecutivos tiveram duração de 21 dias, assim distribuídos: período de adaptação de 14 dias e período de coleta de sete dias. Amostras das dietas oferecidas, sobras e fezes foram secas, moídas e analisadas para matéria seca, gordura bruta, cinzas, proteína bruta, fibra insolúvel em detergente neutro e energia bruta. O consumo de nutrientes, de nutrientes digestíveis, de energia digestível e a quantidade de fezes produzidas diariamente foram escalonadas para o tamanho metabólico. As exceções foram para a ingestão de fibra e lignina, por seus turnos, corrigidas para W^1 (g/(kg.dia)). O modelo linear misto descrito foi ajustado às variáveis escalonadas, após transformação logarítmica. O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o Proc Mixed do SAS, por meio do método de máxima verossimilhança restrita (reml). A probabilidade de verossimilhança das diferentes estruturas de variâncias e covariâncias foi avaliada a partir do critério de informação de akaike, corrigido para pequenas amostras. Hipóteses nulas sobre o fator tratamentos e seus respectivos componentes linear e quadrático foram rejeitadas sempre que $P < 0,05$. As relações entre o consumo de energia digestível e o consumo de fibra, e consumo de proteína digestível e consumo de fibra foram analisadas considerando-se o modelo alométrico e cinco hipóteses. Os modelos constantes nestas hipóteses foram ajustados por meio do Proc Mixed do SAS. Foram consideradas as mesmas estruturas de variâncias e covariâncias listadas anteriormente e empregados os mesmos critérios de verossimilhança já descritos para escolha da(s) melhor(es) hipótese(s) a representar(em) a realidade dos dados. O ajuste das variáveis, utilizando diferentes estruturas de variância-covariância, mostrou que a estrutura de componentes de variância foi a melhor escolha para a maioria das variáveis, seguido por variância-covariância não estruturada, estrutura heterogênea, simetria composta, *Spatial power* e

Spatial. As variáveis F_{Cinza} , R_{Cinza} , R_{Lig} , F_{Lig} , F_{CF} e D_{CF} apresentaram efeito quadrático, enquanto as demais variáveis apresentaram efeito linear, o que pode ser observado pelas suas equações. À medida que aumentou-se o teor de fibra na dieta, observa-se um crescente aumento dos valores observados para variáveis fibra em detergente neutro, matéria seca, cinzas e lignina. No entanto, próximo ao nível de 12 g, observa-se uma tendência de estabilização dos valores preditos. Em relação a essas variáveis, apenas a curva de excreção de matéria mineral nas fezes apresenta comportamento diferente, sendo mais estável do nível 3 g até o 6 g, e crescendo a partir desse nível. As variáveis nutrientes digestíveis solúveis, matéria orgânica, matéria seca, proteína bruta e energia bruta apresentaram valores preditos com crescimento linear, o que indica uma não limitação do consumo dessas variáveis pelo aumento do teor de fibra na dieta. Contudo, as variáveis carboidratos não fibrosos e gordura bruta apresentaram resultados constantes de consumo e digestibilidade, indicando que o aumento do teor de fibra na dieta não influenciou esses dados. A relação entre o consumo de energia digestível e o consumo de fibra foi analisada segundo as hipóteses descritas na metodologia, e a que mais se ajustou aos dados do presente trabalho foi a hipótese 5, quaisquer que sejam α_1 , α_2 , β_1 e β_2 . A estrutura de variância-covariância que melhor se ajustou à hipótese foi componente de variância, sendo significativo o efeito quadrático do nível de FDN efetivamente consumido. A relação entre consumo de proteína digestível e consumo de fibra também foi analisada e apresentou o mesmo resultado para as hipóteses testadas anteriormente e das estruturas de variância-covariância. Portanto, pode-se concluir que o consumo de fibra por bovinos mestiços leiteiros apresenta tendência à estabilização, próximo ao nível de oferta de FDN na dieta da ordem de $10,9 \pm 2,6$ g/(kg.dia). O consumo e a excreção de lignina são coincidentes dentro da faixa de 3 a 7 g/(kg.dia) de oferta de FDN na dieta. Tal fato pode explicar o porquê de a lignina ser caracterizada como entidade nutricional em ensaios de digestão conduzidos em nível de manutenção, cuja oferta de FDN encontre-se situada nos limites encontrados no presente estudo.

ABSTRACT

VIRGÍNIO JÚNIOR, Gercino Ferreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2014. **Notes about the consumption and to the digestibility of nutrients and energy by cattle fed increasing levels of fiber.** Adviser: José Carlos Pereira. Co-advisers: Fernando de Paula Leonel and Ricardo Augusto Mendonça Vieira.

The basic objective established for this study was to quantify the consumption of dry matter, nutrients and digestible energy of cattle depending on the supply of fiber in the diet. The experiment was conducted in two latin square and balanced for four treatments. Four levels of daily supply of insoluble neutral detergent fiber (3, 6, 9 and 12 g / (kg.dia)), scaled to the body mass of animals were used. Eight crossbred steers, four with 298 ± 27 kg and four with 219 ± 16 kg, were randomly divided, at the beginning of the experiment, as columns in latin squares. Consecutive experimental periods lasted for 21 days, as follows: adjustment period of 14 days and the collection period of seven days. Samples of diets offered, orts and feces were dried, ground and analyzed for dry matter, crude fat, ash, crude protein, neutral detergent insoluble fiber and gross energy. The nutrient intake, digestible nutrients, digestible energy and the amount of feces produced daily were scaled to metabolic size. The exceptions were for the intake of fiber and lignin, corrected for W^1 (g/(kg.dia)). The linear mixed model was fitted to the variables described staggered, after logarithmic transformation. The statistical model was fitted using the Proc Mixed of SAS, using the method of restricted maximum likelihood (REML). The probability likelihood of the different structures of variance and covariance was assessed using the Akaike information criterion, corrected for small samples. Null hypotheses on the treatment factor and the respective linear and quadratic components were rejected when $P < 0.05$. The relationship between digestible energy intake and fiber intake, and intake of digestible protein and fiber intake were analyzed considering the allometric model and five hypotheses. The models in these assumptions were adjusted using Proc Mixed of SAS. The same variance and covariance structures listed above were considered and employed the same criteria of verisimilitude already described for the choice (s) best (s) event (s) represent the reality of the data. The adjustment of the variables, using different structures of covariance showed that the structure of variance components was the best choice for most variables, followed by unstructured variance-covariance, heterogeneous structure composed symmetry, Spatial and Spatial power. The variables F_{Ash} , R_{Ash} , R_{Lig} , F_{Lig} , F_{FC} e D_{FC} showed a quadratic effect, while the other variables showed a linear effect,

which can be seen by their equations. With the increase of fiber content in the diet, there is a growing incidence of observed values for variables neutral detergent fiber, dry matter, ash and lignin. However, close to the level of 12 g, there is a tendency of stabilization of the predicted values. In terms of these variables, just the curve of mineral matter excretion in feces presents different behavior, being more stable to level 3 g up to 6 g, and growing from this level. Variables compounds neutral detergent soluble, organic matter, dry matter, crude protein and gross energy showed predicted values with linear growth, which indicates a non-limiting consumption of these variables by increasing the fiber content in the diet. However, the nonfiber carbohydrates and crude fat results showed constant intake and digestibility, indicating that increasing the fiber content in the diet did not influence these data. The relationship between digestible energy intake and fiber intake was analyzed according to the assumptions described in the methodology, and the one that most fit to the data of the present study was the hypothesis 5, whatever they are α_1 , α_2 , β_1 and β_2 . The variance-covariance structure that best fit the hypothesis was variance components, with a significant quadratic effect of level of NDF actually consumed. The relationship between consumption of digestible protein and fiber intake was also analyzed and showed similar results to the assumptions previously tested and the variance-covariance structures. Therefore, it can be concluded that the consumption of fiber per dairy crossbred cattle exhibits a tendency towards stabilization, near the level of supply of NDF in the diet of the order of 10.9 ± 2.6 g/(kg.day). The intake and excretion of lignin are coincident within the range of 3 to 7 g/(kg.day) supply of NDF in the diet. This may explain why lignin be characterized as a nutritional entity digestion trials conducted maintenance level, whose offer of NDF find yourself situated within the limits of the present study.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios para os nutricionistas é a estimativa do valor nutricional dos alimentos para o seu emprego em modelos de avaliação de alimentos e determinação das exigências nutricionais dos animais. A energia é considerada o primeiro fator limitante à vida e às funções produtivas. Desta forma, a sua quantificação nos alimentos é de extrema importância na formulação das dietas para o atendimento das exigências nutricionais dos animais.

A energia pode ser expressa como energia bruta (EB), energia digestível (ED), energia metabolizável (EM) ou energia líquida (EL). A maneira mais correta de expressarmos a energia útil dos alimentos é como EL. No entanto sua determinação é trabalhosa e de alto custo devido às perdas energéticas fecais, gasosas e de calor sensível e latente. Esta condição torna o conhecimento da ED fundamental, pois esta pode ser obtida por meio de ensaios de digestibilidade ou de equações matemáticas, as quais empregam os constituintes da energia como variáveis da equação (WEISS, 1993; NRC, 2007).

Alguns componentes químicos são relacionados à concentração de energia disponível de um alimento, sendo que os comumente avaliados são as cinzas ou matéria mineral (MM), gordura bruta (GB), proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, amido e frações nitrogenadas. Alguns destes componentes, especialmente gordura e PB, têm sido positivamente correlacionados aos nutrientes digestíveis totais (NDT), enquanto as frações fibrosas têm apresentado correlações negativas com a disponibilidade energética dos alimentos. A lignina, embora constitua somente pequena proporção dos alimentos (1 a 12%), mostra alta correlação negativa com a digestibilidade (WEISS, 1998).

Devido à sua importância e à dificuldade de determinação, é indispensável avaliar e quantificar a energia específica dos alimentos. Vários métodos e sistemas foram desenvolvidos para estimar a energia disponível (WEISS et al., 1992).

Modelos matemáticos são utilizados como ferramenta para predição da energia digestível e formulação das dietas (WEISS, 1993; NRC, 2007). A modelagem surge, então, como alternativa aos ensaios de digestão, tornando necessário avaliar o poder preditivo dos diferentes modelos existentes.

O conhecimento das necessidades dos animais e do valor nutritivo das forragens, grãos e subprodutos empregados em sua alimentação, fornecerão importantes

informações, que serão utilizadas na formulação das dietas e que possibilitarão a redução dos custos com alimentação e das perdas de nutrientes e, assim, maior eficiência do sistema de produção (RUSSEL et al., 1992; SNIFFEN et al., 1992; AFRC, 1993; 1997; NRC, 1996; 2001). Além disso, a correta nutrição minimiza a ocorrência de transtornos digestivos (RUSSELL et al., 1992; SNIFFEN et al., 1992). É necessário estimar, de forma adequada, a dieta oferecida aos animais, para que seja possível satisfazer seu consumo voluntário de matéria seca e suas exigências de energia, proteína, minerais e vitaminas.

No Brasil, especula-se muito sobre a falta de adequação dos modelos nutricionais às condições vigentes de produção. No entanto, provas satisfatórias dessa falta de poder de predição dos modelos ainda não se encontram disponíveis na literatura internacional. Propor um sistema novo a partir do conhecimento já existente é muito difícil, pois vários conceitos nutricionais estão bem delineados e consolidados na literatura. Os sistemas nutricionais em uso para ruminantes, de uma forma geral, têm por base conceitos semelhantes, porém as estimativas do valor nutricional e das exigências nutricionais são calculadas de forma diferente (JARRIGE, 1988; AFRC, 1997; NRC 2007; TEDESCHI and CANNAS et al. 2004).

A energia digestível pode ser obtida por meio de ensaios de digestão, ou equações que empregam constituintes químicos dos alimentos ou dietas (WEISS, 1993; NRC, 2007). Considerando a determinação cara e laboriosa dos ensaios com animais, as equações podem facilitar a obtenção de estimativas visando sua aplicação, tanto em nível de sistemas de produção como para a pesquisa.

O objetivo básico estabelecido para o presente trabalho foi o de quantificar o consumo de matéria seca, nutrientes e energia digestível por bovinos, em função da oferta de fibra na dieta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas para avaliação de alimentos e determinação de exigências nutricionais.

O conceito de modelagem é estreitamente ligado à noção de sistema. Um estudo sobre síntese, realizado por Sauvant (1999) concernente a definição de sistema, estabelecida por diferentes autores, identificou a presença comum de termos como conjunto de elementos, relações, totalidade, organização, finalidade e não aditividade. Nesse sentido, o conceito de Spedding (1988) sintetiza e integra os demais termos: "modelagem é a abstração e simplificação da realidade capaz de integrar as principais interações e comportamento do sistema estudado, apta a ser manipulada com o objetivo de prever as consequências da modificação de um ou de vários parâmetros sobre o comportamento do sistema".

A modelagem é, sobretudo, uma tentativa de integração de diferentes fenômenos, sendo limitada pelos recursos humanos e materiais disponíveis e/ou utilizados na sua construção. A modelagem aplicada aos seres vivos é estudada há várias décadas. Os estudos pioneiros foram realizados por Monod (1942), que estabeleceu o primeiro modelo do metabolismo bacteriano.

Em nutrição animal, esse tipo de procedimento pressupõe a integração quantitativa dos fenômenos digestivos e metabólicos passíveis de influenciar as respostas dos animais às variações alimentares. Esse objetivo pode ser alcançado graças às pesquisas direcionadas à compreensão dos mecanismos biológicos e, sobretudo, à construção de modelos matemáticos capazes de traduzir as variações desses fenômenos digestivos e metabólicos (SAUVANT, 1992).

Um dos primeiros sistemas para avaliação de alimentos foi desenvolvido por Henneberg e Stohnann, de 1857 a 1865 na Estação Experimental de Weende, na Alemanha, e baseiam-se na determinação das diferentes proporções de umidade, compostos nitrogenados, cinzas, extratos solúveis em éter e porções fibrosas insolúveis em ácido e álcali. Foi a primeira base para a estimativa de valores de energia dos alimentos, mais precisamente, do total de nutrientes digestíveis (NDT). Este sistema também é chamado de método de análise por aproximação.

Entretanto, tem sua utilização limitada quando se busca conhecer precisamente o valor nutritivo dos alimentos, as exigências nutricionais e, assim, a predição do desempenho animal (SALVADOR, 2007).

Na formulação de dieta para ruminantes, é necessário, para correto balanceamento, definir os constituintes químicos, visando atender todas as necessidades dos animais. Assim, o fracionamento de compostos nitrogenados e de carboidratos tem por base o modo diferenciado de como os microrganismos do rúmen fazem uso destes, levando-se em consideração as diferenças quanto à utilização dos carboidratos para manutenção e crescimento, quanto à utilização e natureza dos compostos nitrogenados consumidos e à sincronização entre a disponibilidade de energia e nitrogênio para maximização do crescimento microbiano em nível ruminal (RUSSELL et al., 1992; SNIFFEN et al., 1992; e NRC, 1996).

O sistema proposto por Goering & Van Soest (1970), baseado na solubilidade dos alimentos em soluções detergentes, permitiu a identificação e classificação de diferentes porções dos alimentos, fazendo inferências às suas disponibilidades biológicas. Esse sistema proporcionou melhores resultados e permitiu caracterização dos carboidratos, principalmente daqueles representados pela fibra bruta e extrativo não nitrogenado, e também de componentes nitrogenados dos alimentos.

Nas últimas décadas, os conceitos sobre análise de alimentos, valor nutritivo e nutrição de animais de produção tiveram grande desenvolvimento. Na década de 70, as análises e estimativas energéticas eram obtidas por meios de ensaios de digestibilidade e, também, avaliando-se o desempenho dos animais. Nos anos 80, com o aperfeiçoamento dos sistemas de avaliação, as exigências passaram a ser realizadas por meio de métodos fatoriais. Estes métodos são utilizados até os dias de hoje pelos principais modelos de nutrição.

As exigências de proteína, determinadas pela abordagem fatorial, consideram separadamente as demandas e manutenção (sendo nestas incluídas as perdas endógenas de nitrogênio através das fezes e urina e por intermédio da descamação da pele) e, em especial, pelo montante de aminoácidos disponíveis para absorção.

As fontes de proteína que chegam ao intestino dos ruminantes são a proteína microbiana, a proteína dietética que não sofreu a ação da microbiota ruminal (durante sua permanência nas câmaras pré-gástricas) e a proteína endógena. Ao *pool* dos aminoácidos provenientes da digestão dessas fontes e absorvidos no intestino dá-se o nome de proteína metabolizável (BURROUGHS et al., 1975a; ARC, 1980).

Os sistemas de alimentação evoluíram das determinações de exigências de proteína bruta para os atuais modelos de proteína metabolizável, que permitem adequar as exigências da população microbiana ruminal em compostos nitrogenados, assim como as

exigências do ruminante em proteína metabolizável. Os sistemas de proteína metabolizável têm estimulado e permitido avanços no conhecimento das exigências de aminoácidos dos ruminantes e no balanceamento do perfil de aminoácidos essenciais da proteína metabolizável (SANTOS, 2006).

O aperfeiçoamento dos conhecimentos sobre necessidades nutricionais e determinação da composição química dos alimentos deve-se, em grande parte, à ampliação dos conhecimentos tecnológicos, iniciados nos anos 60, com o advento de novas tecnologias e técnicas computacionais. Graças a estes avanços, a habilidade dos cientistas pôde ser incrementada, permitindo descrever matematicamente as relações biológicas por meio da modelagem matemática. Assim, os modelos passaram a descrever vários aspectos relacionados à nutrição animal.

Um modelo é definido como uma representação simplificada, abstrata e idealizada de uma determinada realidade. Deve basear-se em argumentações ordenadas, lógicas e justificáveis, pressupostas a partir do conhecimento científico existente sobre o assunto em questão. Segundo Mertens (1976), o modelo matemático nada mais é do que uma equação ou conjunto de equações que representam o comportamento de um sistema, cuja resolução implicará na predição de mudanças que podem ocorrer na realidade; e, em termos matemáticos, representará a consequência ou resultado direto dos procedimentos analíticos empregados para abstração e definição do mundo real.

Modelos matemáticos podem ser classificados como ‘deterministas’ ou ‘estocásticos’, ‘dinâmicos’ ou ‘estáticos’, e ‘empíricos’ ou ‘mecanicistas’. Modelos deterministas são baseados em pressuposições, em que as soluções obtidas derivam de equações ou funções exatas. Entretanto, é sabido que dados biológicos, frequentemente, têm elevado grau intrínseco de variabilidade. Os modelos estocásticos (também ditos probabilísticos) valem-se de relações estatísticas no cômputo das variações, tendo estas a amplitude da variância de cada um de seus componentes. Modelos estáticos ignoram o efeito do tempo, mas modelos dinâmicos descrevem relações tempo-dependente dos fatores que tenham esta característica (BALDWIN & DONOVAN, 2000; RUSSELL, 2002).

Modelos empíricos são construídos a partir da descrição da observação de dados, os quais são ajustados a uma equação (ou conjunto de equações matemáticas). Já os modelos mecanicistas (também denominados ‘teóricos’) buscam promover a descrição de um sistema com a compreensão dos fatores causais concernentes aos mecanismos envolvidos no sistema em estudo. Estes modelos são construídos através do exame da

estrutura do sistema, compartimentalizando-o e analisando o comportamento de todo o sistema em termos dos componentes individuais (compartimentos) e das interações entre eles (DIJKSTRA & FRANCE, 1995).

Atualmente, os sistemas de alimentação de ruminantes utilizam equações empíricas (AFRC, CSIRO, INRA, NRC, DVB/OEB-System - DIJKSTRA et al., 1998). Existem semelhanças entre os sistemas citados quanto a terminologias e detalhamentos, embora apresentem diferenças. Seus objetivos são convergentes e conceitualmente similares em seu intuito de prever o fluxo de energia disponível para os animais e microrganismos ruminais em uma quantidade de nitrogênio passível de ser utilizada por aqueles seres, pela estimativa de síntese de proteína microbiana e pelo consequente N-aminoácido microbiano que seja disponível ao ruminante hospedeiro, pelos aspectos cinéticos dos nutrientes no rúmen, pelo 'rendimento' de nutrientes que alcança o intestino delgado e, conseqüentemente, pelo próprio desempenho animal.

Modelos mecanicistas são mais variáveis, quando comparados aos modelos empíricos, pois seus objetivos e hipóteses são completamente distintos. O objetivo central dos modelos mecanicistas do rúmen é o de prover um conhecimento integrado dos aspectos envolvidos e permitir prever o perfil de nutrientes (incluindo a proteína microbiana), disponível para absorção.

Outro aspecto também desconsiderado nos atuais modelos empíricos, referem-se à consideração dada às variações ocorrentes quanto ao tempo, relevando, assim, as oscilações entre dias e dentro de cada dia, fazendo com que os modelos empíricos observem o animal segundo uma condição *steady-state*, o que absolutamente não condiz com a realidade, classificando, assim, estes sistemas como empíricos e estáticos (SNIFFEN & ROBINSON, 1987).

O CNCPS adota o modelo que utiliza tanto elementos empíricos como mecanicistas em suas predições. Para exemplificar esta característica, pode-se citar que este sistema relaciona a disponibilidade de substratos à utilização da energia, em processos de crescimento e não-crescimento microbiano (enfoque mecanístico), mas a degradação dos substratos é representada sem considerar a interação dos efeitos entre carboidratos e nitrogênio ou os efeitos das atividades microbianas sobre a degradação da matéria orgânica no rúmen (enfoque empírico).

Seja como for, cada abordagem assumida de modelagem possui vantagens e desvantagens, dependendo do objetivo específico. Um modelo empírico, baseado diretamente em um conjunto definido de dados, pode, dentro deste limite, prover

respostas bastante acuradas em sua predição. Em contrapartida, modelos mecanicistas, que tiveram seus componentes e parâmetros advindos de numerosos e variados bancos de dados, podem não fornecer predições tão exatas, entretanto permitem um entendimento melhor do comportamento do sistema como um todo.

Outro aspecto importante reside no fato de que os modelos empíricos são, normalmente, mais simples e, portanto, mais facilmente utilizáveis, constituindo, por esta razão, práticas ferramentas utilizadas, inclusive na elaboração de dietas.

Os alimentos produzidos sob condições tropicais apresentam composição nutricional diferente dos alimentos obtidos em condições temperadas (VAN SOEST, 1994). Além disso, é notória a existência de poucos dados sobre a caracterização das frações que constituem as proteínas e os carboidratos de alimentos cultivados em regiões tropicais, tornando a predição mecanicista do desempenho animal com sistemas desenvolvidos em condições temperadas, ainda mais complexas. Estas circunstâncias tornam cada vez mais necessária a avaliação das frações dos alimentos tropicais a fim habilitar os nutricionistas a fazer predições mais confiáveis sobre o desempenho dos animais (FOX et al., 1992).

2.1.1. Os sistemas britânicos ARC e AFRC

Os sistemas britânicos de nutrição e alimentação de ruminantes (ARC, 1980 e AFRC, 1993) trouxeram relevantes contribuições sobre a utilização dos nutrientes por estes animais. O conceito de energia metabolizável, assumido pelo ARC (1980), tem como base a relação entre o consumo de energia metabolizável (nos alimentos ou dieta) e a retenção da energia líquida nos produtos e no metabolismo animal. A ingestão de energia metabolizável refere-se à energia bruta ingerida menos a energia bruta contida nas fezes, urina e gases de combustão (principalmente metano), expresso em MJ/d ou MJ/kg MS.

Especificamente no que diz respeito ao aproveitamento da energia, o ARC (1980) estabeleceu o conceito da metabolizabilidade (q), definida como a energia metabolizável do alimento dividida por sua energia bruta. A metabolizabilidade da energia à manutenção é simbolizada por q_m e, em qualquer outro nível de alimentação, q_L . A eficiência de utilização da energia metabolizável (simbolizada por k) é definida como o aumento na retenção de energia que ocorre por unidade de incremento de energia metabolizável oferecida, tendo por isso, estreita relação com a metabolizabilidade da energia em cada

alimento. A eficiência de utilização da energia metabolizável foi, então, apresentada como função linear da metabolizabilidade da energia, sendo específica quanto à função fisiológica de interesse (manutenção, ganho de peso corporal, lactação, etc.).

Por convenção, os sistemas de alimentação consideram que, quando a retenção de energia corporal é zero, o animal está em manutenção, ou seja, consome e dissipa energia para a manutenção dos processos vitais e metabólicos básicos. Já a retenção de energia, refere-se à taxa de deposição energética corporal, que pode ser, obviamente, negativa, quando o nível de ingestão energética está abaixo da manutenção. Considerando que a energia metabolizável de cada alimento possui uma metabolizabilidade que lhe é peculiar e a eficiência com que é utilizada é variável em função do objetivo de seu uso, faz-se imperativo que, para se estimarem as exigências de energia metabolizável de manutenção e ganho de peso, seja necessário, primeiramente, estimar a exigência líquida de energia para manutenção e para ganho, respectivamente.

O ARC (1980) relacionou, ainda, a quantidade de energia provinda do alimento consumido e a exigência energética dos animais, auferindo quantas vezes a energia exigida para manutenção é ingerida, e, a este valor, foi dado o nome de nível de produção, representado por L. O sistema AFRC (1993) também assume este postulado. Este valor calculado, enquanto não é considerado para o computo das demandas energéticas, é levado em conta para o cálculo do potencial de crescimento microbiano ruminal.

Nos sistemas britânicos, a exigência de proteína metabolizável, igualmente ao que se dá no tocante à energia, é resultante do somatório das demandas de manutenção e produção, sendo considerada a parte da demanda para manutenção, as perdas derivadas da descamação da pele e do crescimento de lã e pelos.

Para estimar a síntese de proteína microbiana, o sistema considera, primeiramente o potencial de crescimento microbiano (YPBmic) possível de ser obtido, sendo este definido como função do nível de ingestão de energia metabolizável, ou melhor, pelo plano nutricional (L), conforme a equação:

$$YPBmic = 7 + 6 \times (1 - e^{-0.35 \times L})$$

Assim, tem-se que o crescimento microbiano (Y) é obtido, segundo o AFRC (1993), a partir de:

$$Y = IEMfe \times YPBmic,$$

em que (YPBmic) é o potencial de crescimento microbiano, expresso em g de PB microbiana/Mcal de IEMfe; (L) é o nível de produção (ingestão de EM em relação à exigência de manutenção) e IEMfe representa a ingestão de energia metabolizável

fermentável (em Mcal/dia).

A inclusão de proteína dietética se desenvolve em uma segunda etapa do balanceamento, conforme apresentada pelo ARC (1980) e AFRC (1993). A partir da definição da concentração energética da dieta, que é função do consumo, peso vivo, composição e intensidade de ganho de peso, busca-se incluir proteína degradável na dieta a fim de atender, prioritariamente, à demanda de proteína para crescimento microbiano ruminal. Desta forma, a inclusão de uma dada fonte de proteína verdadeira ou de NNP dependerá da escala de crescimento microbiano que o balanço energético da dieta permite.

2.1.2. O sistema CNCPS

O conteúdo de energia metabolizável fermentescível de um alimento é utilizado, no sistema AFRC (1993), para estimar o crescimento microbiano e, conseqüentemente, a contribuição da proteína microbiana em ácidos aminados para o hospedeiro. Seu cômputo baseia-se no conteúdo de energia metabolizável do alimento, descontando-se a contribuição em energia metabolizável do extrato etéreo; no caso das silagens, desconta-se, também, a contribuição em energia metabolizável dos ácidos orgânicos. O teor em nutrientes digeríveis totais (NDT) é utilizado para calcular a eficiência de crescimento microbiano no sistema NRC (1989). Entretanto, neste sistema, não são consideradas as inter-relações dinâmicas do ecossistema ruminal (RUSSELL et al. 1992; NRC, 1996).

O sistema CNCPS baseia-se no fracionamento dos carboidratos e no modo diferenciado como os microrganismos ruminais fazem uso destes compostos, sendo levadas em consideração as diferenças quanto à utilização dos carboidratos para manutenção e crescimento, quanto à utilização e natureza dos compostos nitrogenados consumidos e quanto à sincronização entre a disponibilidade de energia e nitrogênio para maximização do crescimento microbiano no rúmen (RUSSELL et al., 1992; SNIFFEN et al., 1992; e NRC, 1996). Neste sistema, os carboidratos são classificados em não-estruturais (CNE), que compreendem as frações A (açúcares) e B1 (amido e compostos fibrosos solúveis), e estruturais (CE), constituídos pelas frações B2 e C, que correspondem às frações potencialmente degradáveis e indegradáveis da fibra em detergente neutro do alimento, corrigida para o seu conteúdo de proteína e cinzas (VAN SOEST et al., 1991; SNIFFEN et al. 1992; VAN SOEST, 1994). A proteína bruta dos alimentos foi classificada pelo CNCPS em componente A, constituído por compostos

nitrogenados não-proteicos (NNP); em fração de proteínas solúveis de rápida degradação no rúmen (B1); em fração de proteínas insolúveis com taxa de degradação intermediária (B2) e lenta (B3); e em fração C, que consiste de proteínas insolúveis em detergente ácido e não-digeríveis no rúmen e intestino (SNIFFEN et al., 1992). Esta maneira de fracionar os constituintes nitrogenados dos alimentos, em associação com o devido fracionamento dos carboidratos, permite maximizar a sincronização das atividades microbianas sobre a proteína e carboidratos no rúmen, maximizando a produção microbiana, a extração de energia dos alimentos e, também, minimizar perdas nitrogenadas (PEREIRA, 1999).

Dentre as frações (A, B e C), a fração B é a mais variável, quanto ao intervalo de degradação dentro do rúmen, uma vez que se assume que a fração A é completamente degradada e que a fração C é completamente indisponível. Assim, ressalta-se que o fracionamento do nitrogênio, pura e simplesmente, não implica em condições de se poder prever todo o montante de nitrogênio que estará disponibilizado para a população microbiana.

É fundamental que, associadas à caracterização da fração protéica do alimento, sejam auferidas, também, as velocidades de degradação de cada uma das frações, a fim de permitir estimar o montante efetivo de proteína degradável (PDR) e não degradável no rúmen (PNDR).

Várias propostas têm sido feitas no sentido de se tentar combinar estimativas da taxa de desaparecimento (Kd) da fração B no rúmen com a taxa de passagem (Kp), com o intuito de se estimar a PDR e a PNDR. O NRC (2001), baseando-se em dados de 190 experimentos, propôs as equações:

$$PDR = A + \{Bi \times [KdBi / (KdBi + KpBi)]\}$$

$$PNDR = Bi \times [KpBi / (KpBi + KdBi)] + C$$

nas quais:

PDR: proteína degradável no rúmen;

PNDR: proteína não degradável no rúmen;

A: fração A da proteína (% da PB);

Bi: fração Bi da proteína, sendo i = 1, 2 e 3 (% da PB);

C: fração C da proteína (% da PB);

KdBi: taxa de degradação da fração Bi (% por hora);

KpBi: taxa de passagem da fração Bi (% por hora).

2.2 Valor nutritivo dos alimentos

O valor nutritivo dos alimentos é classificado pelos nutricionistas em três componentes: digestibilidade, consumo alimentar e eficiência energética. A aplicação prática da avaliação dos alimentos assume que eles são variáveis e as respostas animais são comparativamente reproduzíveis.

A digestibilidade é mais avaliada que a eficiência ou o consumo. No entanto, o consumo e a eficiência são mais responsáveis pela resposta animal total. Acontece que a eficiência e o consumo oferecem muitas variações entre os animais e, assim, o estabelecimento dos valores alimentares relativos para estes componentes é mais difícil que para a digestibilidade. Considera-se que a eficiência e o consumo relacionam-se com a digestibilidade. Porém, isto nem sempre é verdade. A resposta do animal a alimentos com diferentes digestibilidades pode ocorrer pela compensação de ingerir mais alimento de qualidade inferior. O volume e as lentas taxas de digestão limitam a quantidade ingerida deste tipo de volumoso (VAN SOEST, 1994).

2.2.1. Digestibilidade

O balanço de matéria perdida na passagem através do trato digestório é o que melhor mensura o aproveitamento de um alimento. Acontece que as fezes não contêm apenas o alimento não digerido, mas também produtos metabólicos como bactérias e perdas endógenas do metabolismo animal (VAN SOEST, 1994). A medida mais importante do valor de energia de um alimento para animais é a sua digestibilidade determinada *in vivo*; *in vitro* por incubação com líquido ruminal (TILLEY & TERRY, 1963) ou com pepsina e celulase (McLEOD & MINSON, 1978); ou pelo NIRS (*Near-infrared spectroscopy*) (COOLEMAN & HENRY, 2002). Todas as determinações por métodos indiretos devem incluir amostras de digestibilidade *in vivo* conhecidas como referências e, como há diminuição da digestibilidade com o aumento da ingestão de alimentos, os valores de referência devem ser obtidos em nível de manutenção.

A digestibilidade verdadeira é o balanço entre a dieta e os respectivos resíduos alimentares que escaparam da digestão e chegaram às fezes, excluindo os produtos metabólicos. O coeficiente de digestibilidade verdadeira é sempre mais alto que o da digestibilidade aparente (VAN SOEST, 1994).

2.2.2. Digestibilidade total

Para determinar a digestibilidade total é necessário medir a quantidade que um nutriente é consumido por dia e quanto desta substância correspondente é excretada nas fezes por dia. Se I representa a quantidade de um nutriente alimentar consumido por dia e F a quantidade de um nutriente correspondente excretado nas fezes por dia, em seguida, por definição, $(I - F)$ é a quantidade do nutriente digerido por dia (KLEIBER, 1975).

2.2.3. Digestibilidade aparente

A digestibilidade aparente é definida como o balanço dos alimentos menos as fezes $(I - F) / I$ ou $1 - (F / I)$, normalmente expressa em percentagem. Isto é, $[1 - (F / I)] 100$ indica a percentagem do componente de alimento ingerido que não é excretado como fezes.

2.2.4. Digestibilidade verdadeira

O cálculo da digestibilidade verdadeira depende de análise fecal adequada e da aplicação da equação de digestibilidade parcial em um sentido especial. No momento de excreção, a maior parte do material não dietético nas fezes são resíduos microbianos. É difícil distinguir o material endógeno a partir do material proveniente do processo de digestão e fermentação, já que a matéria endógena deve ter sido fermentada como, por exemplo, as mucinas e ureia que fluem para o rúmen. Consequentemente, a composição fecal pode ser dividida em duas frações que constituem o conjunto:

$$Pfr + Pmr = Pr \text{ ou } Cfr + Cmr = 1,$$

em que Cfr é a fração de resíduo alimentar não digerido, Cmr a concentração metabólica microbiana e material endógeno nas fezes e Pr a produção fecal. Esta divisão distingue-se do resíduo indigestível verdadeiro (Pfr) a partir da porção das fezes de origem não dietética (Pmr). O material indigestível aparente aparece intacto nas fezes (VAN SOEST, 1994).

2.3. Consumo de matéria seca

A fibra desempenha importante função no controle do consumo voluntário e, conseqüentemente, na ingestão de nutrientes (ALLEN, 2000), além de estimular um ambiente ruminal favorável ao desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela digestão de carboidratos fibrosos (NUSSIO et al., 2006).

O consumo de matéria seca (CMS) é a variável mais importante a afetar o desempenho animal, uma vez que engloba a ingestão de todos os nutrientes e determina a resposta animal (MERTENS, 1987; VAN SOEST, 1994). Se, por algum motivo, o CMS for muito baixo, ocorre redução da taxa de produção, fazendo a exigência de manutenção compreender grande parte do consumo energético total; por outro lado, se o CMS for muito elevado e exceder às exigências do animal, haverá uma grande deposição de reservas no corpo; portanto, o objetivo da predição do consumo é o fornecimento de uma quantidade diária de alimento para os animais, de modo a atender às exigências nutricionais para um determinado nível de produção (FORBES, 1995).

As variações no consumo resultam de uma interação complexa, a qual inclui a dieta (composição bromatológica e estruturas anatômicas), os microrganismos do rúmen (condições para um crescimento ótimo), o hospedeiro (idade, tamanho, sexo e estado fisiológico) (MERTENS, 1987; MERTENS, 1994) e, ainda, os mecanismos psicogênicos que integram o hospedeiro ao meio (MERTENS, 1987; 1994).

A regulação do consumo, segundo Mertens (1994), envolve sinais que operam por meio de vários mecanismos neuroendócrinos, tanto no curto como no longo prazo. É consensual a ideia de que os animais consomem o alimento para atender à demanda energética. Entretanto, quando dietas de baixa qualidade são fornecidas, o animal consome apenas uma quantidade de alimento que esteja de acordo com a capacidade do seu trato gastrintestinal em armazená-la e processá-la (MERTENS, 1987; 1994; FORBES, 1995).

Baseados nas observações de Lehman (citado por FORBES, 1995) e no desdobramento conceitual da celulose, proposto por Vieira et al. (1997) e Gonçalves et al. (2004), foi argumentado que o papel do resíduo indigerível da fibra, cuja estimativa pode ser obtida tanto *in vitro* como *in situ*, é marcante sobre o efeito de repleção ruminal. Teoricamente, a capacidade de consumo de fibra pode ser substituída pela capacidade de consumo ou de retenção de fibra indigerível, corrigida para a proporção de fibra efetiva, que atua na manutenção da estabilidade do ecossistema ruminal. A hipótese lançada por

Vieira et al. (1997) foi confirmada com novilhos em pasto, que apresentaram consumo de fibra indigerível constante e da ordem de 0,6 % do peso vivo, ou seja, independente da estação do ano (chuvosa ou seca) ou do grau de maturidade do pasto (VIEIRA et al., 2000). Com isso, estudos para a identificação do papel dos resíduos indigeríveis da fibra na regulação do CMS são extremamente necessários para o balanceamento de rações em programas de formulação, principalmente quando se trata de animais com elevada demanda por nutrientes (VAN SOEST, 1994; GONÇALVES et al., 2004).

Os eventos associados à regulação do consumo no curto prazo só podem ser descritos por meio de complexos modelos dinâmicos da função ruminal (MERTENS, 1994; FORBES, 1995). As soluções calculadas iterativamente para tais modelos, nas situações de equilíbrio, são praticamente idênticas às soluções do modelo mecanicista proposto por Mertens (1987). Nesse modelo, o CMS é uma função bifásica que varia em função da concentração energética ou do nível de repleção ruminal da dieta (GONÇALVES et al., 2004; Figura 1). Geralmente, expressa-se a energia da dieta em função da sua concentração em energia líquida de manutenção e produção, enquanto que o nível de repleção ruminal é dado pela concentração de fibra na dieta; a fibra, no presente trabalho, corresponde ao resíduo insolúvel após o tratamento da amostra de alimento com solução detergente neutro, de acordo com os procedimentos descritos por Van Soest et al. (1991).

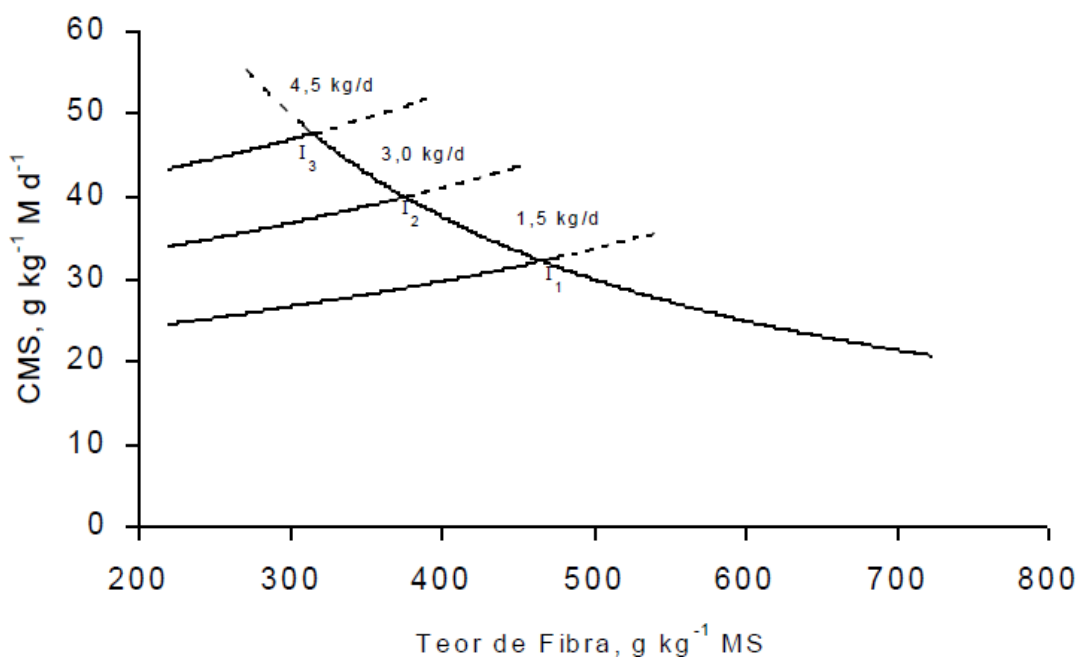


Figura 1 - Influência do teor de fibra da ração total sobre o consumo de matéria seca (CMS) de cabras leiteiras em lactação. I1, I2 e I3 são os consumos máximos de matéria seca para animais produzindo 1,5, 3,0 e 4,5 kg de leite ao dia, respectivamente.

2.4. Valor energético dos alimentos

2.4.1. Energia bruta (EB)

É o total de energia nos alimentos, medida em uma bomba calorimétrica que tem a função de mostrar a quantidade de calor liberada para elevar uma quantidade de água a uma temperatura específica.

2.4.2. Nutrientes digestíveis totais (NDT)

O NDT é um dos modos mais empregados de expressão de energia para avaliação de alimentos. Muitos componentes químicos são relacionados à concentração de energia disponível, sendo que os constituintes comumente avaliados são matéria orgânica (MO), extrato etéreo (EE), proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, amido e frações nitrogenadas (ROCHA JUNIOR et al., 2003b).

Alguns destes componentes, como gordura e proteína, têm sido especialmente correlacionados positivamente com NDT, enquanto que frações fibrosas têm apresentado correlações negativas com a disponibilidade energética dos alimentos (ROCHA JUNIOR et al., 2003b). A lignina, embora constitua somente pequena proporção dos alimentos (1 a 12%), possui alta correlação negativa com a digestibilidade (WEISS, 1998).

O teor de NDT dos alimentos está relacionado ao conteúdo energético dos mesmos. De acordo com o NRC (1989), o sistema de energia líquida fornece valores de disponibilidade de energia muito mais precisos que o NDT, mas este sistema ainda permanece porque os valores de EL são difíceis de serem obtidos. Tradicionalmente, o teor de NDT dos alimentos era calculado como:

$$\text{NDT} = \text{PBd} + 2,25 \times \text{EEd} + \text{FBd} + \text{ENNd},$$

em que PBd: proteína bruta digestível; EEd: extrato etéreo digestivo; FBd: fibra bruta digestível; ENNd: extrato não nitrogenado digestível.

Weiss et al. (1992) propuseram uma equação de NDT com consumo de matéria seca em nível de manutenção (NDT_{manutenção}). O NDT do alimento é calculado usando a energia produzida pelas frações químicas do alimento (carboidratos fibrosos, carboidratos não-fibrosos, lipídeos e proteína bruta), medidas ou calculadas por meio de análise de laboratório, e da digestibilidade verdadeira (obtida através do ensaio de digestibilidade).

Para estimar os nutrientes digestíveis totais em nível de manutenção (NDT_{manutenção}), de acordo com o NRC (2001), a equação utilizada é:

$$\text{NDT}_{\text{manutenção}} = \text{PBd} + 2,25 * \text{AGd} + \text{FDN}_{\text{cpd}} + \text{CNFd} - 7 \quad \text{Eq.(1)}$$

em que:

Proteína bruta digestível para alimentos volumosos

$$\text{PBd} = \text{PB} * \exp(-1,2 * (\text{PIDA}/\text{PB})); \quad \text{Eq.(2)}$$

em que: PIDA = proteína insolúvel em detergente ácido;

Proteína bruta digestível para alimentos concentrados;

$$\text{PBd} = \text{PB} * (1 - (0,4 * \text{PIDA}/\text{PB})); \quad \text{Eq.(3)}$$

Ácido graxo digestível

$$\text{AGd} = (\text{EE} - 1) * 100; \quad \text{Eq.(4)}$$

Carboidrato não fibroso digestível

$$\text{CNFd} = 0,98 (100 - ((\text{FDN}_{\text{cp}} + \text{PB} + \text{EE} + \text{cinzas})) * \text{FAP}); \quad \text{Eq.(5)}$$

em que: FAP = fator de ajuste para processamento físico;

Fibra em detergente neutro (corrigida para cinzas e proteína) digestível

$$\text{FDN}_{\text{cpd}} = 0,75 (\text{FDN}_{\text{cp}} - \text{L}) * (1 - (\text{L}/\text{FDN}_{\text{cp}}) 0,667); \quad \text{Eq.(6)}$$

em que L = Lignina.

O valor 7 refere-se ao NDT fecal metabólico.

O extrato etéreo não representa uma fração uniforme nos alimentos, portanto não apresenta uma digestibilidade constante entre os alimentos. Entretanto, ácidos graxos representam uma fração constante com uma digestibilidade verdadeira variando de 95 a 100%, quando as dietas possuem 3% ou menos de EE (PALMQUIST, 1991, citado pelo NRC 2001). O conteúdo de AG pode ser calculado como $\text{AG} = \text{EE} - 1$ (ALLEN, 2000, citado pelo NRC, 2001).

As equações acima são baseadas em digestibilidade verdadeira, mas o NDT é baseado em digestibilidade aparente, portanto o NDT fecal metabólico deve ser subtraído. Weiss et al. (1992), citado pelo NRC (2001), determinou que em média o NDT fecal metabólico equivale a 7.

Além do uso do animal para a determinação dos valores de NDT dos alimentos, pode-se estimar o NDT através de equações de regressão. As equações de regressão possuem diversas limitações, sendo que umas delas é o alto erro de predição, pois dependendo da equação ela pode ser específica para uma dada população (WEISS et al., 1992).

2.4.3. Energia digestível (ED)

A Energia digestível é definida pelo AFRC (1993) como a diferença entre a EB e energia das fezes (FE). Normalmente há uma boa correlação entre os valores de (ED) e (EM) dos alimentos ou dietas, com (EM)/(ED) variando de 0,81 a 0,86 respectivamente. Segundo o NRC (1996), o uso de NDT não tem nenhuma vantagem ou desvantagem sobre a energia digestível (ED) para descrever o valor energético dos alimentos ou expressar as exigências dos animais. Considera-se que 1 kg de NDT equivale a 4,409 Mcal de ED, porque os nutrientes apresentam diferentes calores de combustão, por exemplo: os carboidratos fornecem 4,2Mcal/kg MS, a proteína 5,6 Mcal/kg MS, os ácidos graxos de cadeia longa 9,4 Mcal / kg MS e o glicerol 4,3 Mcal/kg MS (MAYNARD et al., 1979).

O valor da energia bruta de NDT não é constante entre os alimentos. A energia bruta de um alimento com elevada proporção de NDT fornecido pela proteína será maior do que 4,409. Inversamente, a energia bruta de um alimento com elevada proporção de NDT fornecido por carboidrato ou gordura será menor do que 4,409. Na edição anterior (NRC, 1989) essa equação foi abandonada. A Energia digestível pode ser calculada multiplicando-se as concentrações de nutrientes digestíveis estimados (Equação 5 e 6) por seus calores de combustão, (Equação 7). Desde que a ED baseie-se sobre a digestibilidade aparente e (Equações 2 a 6) são baseados em digestibilidade verdadeira, uma correção para energia fecal metabólica é necessária. O calor de combustão do NDT fecal metabólico foi assumido como sendo 4,4 Mcal kg;

$$\text{ED fecal metabólica} = 7 * 0,044 = 0,3 \text{ kg / Mcal.}$$

$$\text{ED (Mcal/kg)} = (\text{CNFd}/100) \times 4,2 + (\text{FDNd}/100) \times 4,2 + (\text{PBd}/100) \times 5,6 + (\text{AG}/100) \times 9,4 - 0,3$$

Eq.(7)

2.4.4. Energia metabolizável (EM)

A energia absorvida pelos animais não será completamente aproveitada pelo animal. A segunda perda de energia ocorre no metabolismo da energia absorvida (digestível), devido à perda de energia através da urina e gases de fermentação. A perda através dos gases (CH₄ e CO₂) é importante nos ruminantes, em decorrência da degradação ruminal (LAWRENCE & FOWLER, 1997).

Quando essas perdas de energia são subtraídas da energia digestível aparente, o saldo é chamado de energia metabolizável (EM) ou energia disponível às células dos tecidos corporais do animal, de modo que:

$$EM = EDa - \text{energia da urina} - \text{energia dos gases (CH}_4 \text{ e CO}_2\text{)}.$$

A EM é fortemente correlacionada a ED, porém é de difícil mensuração. A principal fonte de energia gasosa (gás metano) é obtida através da fermentação microbiana, o que resulta na produção de calor. Este calor é importante para manter a temperatura corporal dos animais, mas consiste em perda de energia não calculada pela EM (NRC, 2000). Para a maioria das forrageiras e misturas de forrageiras e cereais em grão, a proporção da EM para ED é cerca de 0,8, mas pode variar consideravelmente em função da ingestão, idade do animal e fonte dos alimentos (ARC, 1980).

De acordo com NRC (2000) a proporção da EM para ED é cerca de 0,82; como visto na equação: $EM \text{ (Mcal/kg)} = 0,82 \times ED \text{ (Mcal/kg)}$. Essa equação é, aproximadamente, equivalente a uma faixa de alimentos com valores de 2 a 4 Mcal/kg de ED (aproximadamente 49 - 97% NDT), mas tende a subestimar em alimentos com altos valores de ED

O consumo de energia metabolizável (CEM), obtido a partir do consumo de energia digestível, é utilizada tanto para produção de calor, representando a energia utilizada para manutenção, quanto para energia retida, na forma de crescimento, produção de carne, leite e outros. Com isso, a fórmula base para determinação da energia metabolizável de manutenção e energia líquida de ganho:

$$CEM = ER + PC, \text{ onde}$$

ER: energia retida

PC: produção de calor.

Porém, quando a $ER = 0$, representa que todo o consumo de EM está sendo utilizado para manutenção, logo $CEM = PC$, e conseqüentemente a PC representará a energia metabolizável de manutenção (EMm).

2.4.5. Metabolizabilidade

A metabolizabilidade em manutenção (q_m) da (EB) é definida pelo AFRC (1993) como a proporção de (EM) e (EB) em um alimento, expressa da seguinte forma:

$$q_m = (EM) / (EB) \quad \text{Eq.(9).}$$

É comum estimar a digestibilidade aparente da dieta usando a metabolizabilidade, para isso multiplica-se o fator de perdas de energia urinária e gasosa. Porém, a determinação do calor da combustão de urina é tecnicamente difícil, logo, as perdas proporcionais de energia na urina são frequentemente estimadas a partir da excreção de nitrogênio por unidade de alimento ingerido. A perda proporcional de metano é maior em ruminantes porque a fermentação é realizada nas partes anteriores do trato digestivo, mas também é considerável em espécies em que a fermentação microbiana é realizada no intestino posterior (BLAXTER, 1962).

Um termo alternativo, a concentração [EM] na matéria seca na ração ou dieta (M/D), foi proposto pelo ARC (1965), por causa da escassez de dados sobre [EB] em alimentos para ruminantes. A M/D está agora bem estabelecida como um método de valores de cálculo relevantes para a eficiência de utilização da EM para manutenção (k_m), ganho (k_f) e líquida (k_l), quando se utiliza o sistema de EM na prática. No entanto, AFRC (1990) recomendou que uma maior precisão fosse alcançada na formulação de dietas e predição de desempenho se a q_m fosse mais amplamente utilizada como a base para o cálculo das eficiências de utilização EM.

Para que a q_m da dieta possa ser convertida em valores de M/D, o ARC (1965) e MAFF (1976) assumiram um valor médio para o (EB) de 18,4 MJ/kg MS e 4,4 Mcal/kg MS, na conversão de valores q_m para valores M/D de dietas para ruminantes. Um valor médio utilizado frequentemente para a (EB) de dietas para ruminantes é de 18,8 MJ/kg MS.

2.4.6. Eficiência de utilização da EM

A Eficiência de utilização da EM (k), k_m , k_f , k_l , definida no ARC (1980), é preferencialmente estimada por equações lineares, envolvendo q_m , a relação de (EM) e (EB) de um alimento ou dieta. A eficiência de utilização da EM, para manutenção (k_m) é definida pelo AFRC (1993), por equação linear, envolvendo a metabolizabilidade:

$$k_m = 0,35q_m + 0,503$$

A eficiência de utilização da energia ingerida tende a ser maior para alimentos

concentrados, quando comparadas aos volumosos, devido à variação no Incremento calórico (IC) de manutenção e IC de produção (ARC, 1980). A adição de concentrado a dietas ricas em volumosos aumenta parcialmente os valores de k para manutenção e ganho (NRC, 1989), em virtude da redução da produção de CH₄, da ruminação e do incremento calórico. Também, alimentos volumosos de melhor qualidade são mais eficientes que os de pior qualidade (VAN SOEST, 1994).

2.5. Manutenção e metabolismo basal

A mínima produção de calor é obtida com o animal em jejum, mantido em um ambiente termo-neutro com um mínimo de atividade. Semelhantes medições são descritas como metabolismo basal ou metabolismo em jejum (LAWRENCE & FOWLER, 1997), o que permite a estimativa da produção de calor em jejum (PC_{jejum}) que equivale à exigência de energia líquida de manutenção (EL_m), conforme a expressão abaixo (NRC, 2000):

$$EL_m = PC_{\text{jejum}} / CEM; \text{ onde EM é energia metabolizável para ER} = 0.$$

O conceito nutricional de manutenção, embora relacionada ao metabolismo basal, não é o mesmo, pois o animal não está em jejum. A energia metabolizável para manutenção (EM_m) é definida como a taxa de produção de calor de um animal mantido em um ambiente termo-neutro quando a taxa de consumo de energia metabolizável é exatamente o saldo da taxa de perda de calor (LAWRENCE & FOWLER, 1997), logo a produção de calor correspondente a EM_m engloba a PC do animal alimentado, ou seja, considera o incremento calórico como uma forma de produção de calor, já a EL_m é obtida do animal em jejum, ou seja, sem a produção de calor vinda do incremento calórico.

A EM_m é sempre superior a EL_m, pois o processo de comer, digerir e metabolizar o alimento requer energia e este acaba sendo liberado do animal como calor.

Os principais contribuintes para produção de calor em um animal recebendo EM_m podem estar relacionados ao processamento da dieta pelo animal como o trabalho realizado para mastigação do alimento, movimento do aparelho digestivo, calor de fermentação e o incremento calórico associado à transformação dos nutrientes, contribuindo para manter a temperatura corporal, e outras atividades como o processo de circulação, respiração, locomoção e o custo energético para a renovação de tecidos (LAWRENCE & FOWLER, 1997).

2.5.1 Exigência de energia para manutenção

A exigência de energia para manutenção é baseada no consumo de oxigênio e produção de CO₂ e CH₄ de animais adultos, sendo a metade das necessidades utilizada pelas paredes do trato gastrintestinal e fígado para absorção e metabolismos de nutrientes digeridos, um terço pela pele, rins e tecido nervoso e o restante para as atividades musculares básicas (SEAL & REYNOLDS, 1993).

Segundo o AFRC (1998) as exigências de manutenção para caprinos, com base no peso metabólico, são maiores que para ovinos e similares a bovinos, concluindo que isto é devido ao maior metabolismo basal dos caprinos e bovinos, comparados aos ovinos. Com respeito a raças, parte das diferenças nas exigências de manutenção é explicada pela diferença no tamanho dos órgãos. A energia gasta pelas vísceras e a energia gasta pelo tecido muscular representam respectivamente 50 e 23% do total de energia para manutenção. Isso porque os tecidos viscerais como os do trato gastrintestinal e fígado apresentam maior renovação protéica que o músculo esquelético (SILVA et al., 2001).

A idade também afeta a exigências de manutenção do animal. O metabolismo em jejum decresce com a idade em uma taxa de 8% ao ano, chegando à estabilização aos seis anos de idade. Assim sendo, aos seis anos o metabolismo basal será 16% do valor inicial. Devido às diferenças na composição corporal em função do sexo dos animais, normalmente são utilizadas correções para a condição sexual, sendo que é considerado que os machos inteiros apresentam metabolismo basal 15% maior que as fêmeas e machos castrados (NRC, 2006; CSIRO, 2007).

Também tem sido observado influência do nível de consumo nas exigências de EMm, a qual está em função da taxa metabólica dos órgãos e tecidos, devido às alterações no fluxo sanguíneo, oxigenação do fígado, transferência dos nutrientes do lúmen do intestino, *turnover* de proteína, transporte de íons de sódio-potássio e outros processos vitais (CSIRO, 2007).

2.6. Cinética de degradação ruminal

A produtividade dos ruminantes é diretamente influenciada pelo consumo de alimentos, e este, por sua vez, está ligado à degradabilidade do alimento e à capacidade da dieta em suprir os nutrientes exigidos pelos animais (PACHECO, 2002). Várias metodologias têm sido empregadas para estabelecer as quantidades e os teores de

nutrientes necessários para ótima resposta dos microrganismos e, conseqüentemente, dos animais (NOCEK, 1988; VIEIRA, 1995). Essas técnicas de avaliação dos parâmetros cinéticos de degradação compreendem estudos sobre desaparecimento da massa da amostra incubada ou a quantificação dos produtos finais da atividade microbiana, durante o período de incubação com os microrganismos ruminais (PELL et al., 1994).

A degradação de volumosos depende de diversos fatores, como a natureza química e dos aspectos físicos e morfológicos, os quais determinam a velocidade de degradação no rúmen. A retenção dos alimentos no rúmen-retículo permite uma relação simbiótica entre o animal e os microrganismos ruminais, capazes de utilizar esses alimentos ingeridos como substratos para o seu crescimento (HUNGATE, 1988). Esta estratégia tem como conseqüências: 1) longo tempo médio de retenção de partículas no retículo-rúmen, aumentando a utilização dos constituintes da parede celular; e, por outro lado, 2) longo tempo médio de retenção, que pode restringir o consumo voluntário, porque o consumo de volumoso é limitado principalmente pela capacidade do trato digestivo (LECHNER-DOLL et al., 1991, citados por PEREIRA et al., 2002).

Nos estudos de degradação têm se destacado a técnica do saco de náilon ou *in situ*, por sua facilidade e rapidez de execução, baixo custo e boa precisão dos resultados, não existindo melhor forma de simulação do rúmen para um dado regime de alimentação (temperatura, pH, tamponamento, substrato, enzimas etc.), embora o alimento não esteja sujeito a todos os eventos digestivos, como mastigação, ruminação e passagem (NOCEK, 1988; ROMERO, 1990); contudo, apresenta alta correlação com as técnicas *in vitro* e *in vivo* (ROMERO, 1990). Para realização do ensaio de digestão *in situ* há a necessidade de animais fistulados no rúmen para que as bolsas sejam inoculadas. A técnica, em essência, mede o desaparecimento de constituintes dos alimentos após serem incubados em 13 diferentes tempos em sacos de *náilon*, *dácron* ou *poliéster*. Entretanto, apesar do aumento na sua utilização, a técnica também tem sido sujeita a uma avaliação intensa e crítica com relação a muitos fatores que influenciam a digestão, como a porosidade do saco, o tamanho da amostra, posição do saco no rúmen, duração do tempo e o modo de lavagem dos sacos (NOCEK, 1988; ROMERO, 1990).

As técnicas *in vitro* vêm sendo utilizadas frequentemente, e apresenta como vantagens a rapidez, a uniformidade físico-química do microambiente de fermentação e a não manutenção de animais fistulados, o que aumenta o custo dos procedimentos de avaliação (MALAFAIA et al., 1998). Os métodos *in vitro*, apesar de ser muito utilizados, podem apresentar falhas, por não se utilizar adequadamente o inoculo ruminal, os

nutrientes essenciais, os tampões, ou os equipamentos que garantam as condições de pH e anaerobiose (VAN SOEST, 1994). A principal desvantagem desse método é a de não reproduzir o ambiente ruminal. Entretanto, esta desvantagem pode se reverter, quando o objetivo do ensaio é determinar as propriedades intrínsecas do alimento, pois as condições *in vitro* podem ser controladas prevenindo flutuações físicas- químicas do ambiente, permitindo isolar a característica de interesse do alimento, de modo que essa seja a variável limitante para o estudo de degradação (MERTENS & LOFTEN, 1980; MERTENS, 1993).

Os sistemas de avaliação de alimentos para ruminantes empregam modelos de primeira ordem para estimar a degradação e o escape ruminal dos compostos nitrogenados e dos carboidratos (SNIFFEN et al., 1992). O conhecimento atual dos padrões cinéticos dos nutrientes no rúmen baseou-se nas observações de Wilkins (1969), citado por Mertens (1993), ao verificar que certa quantidade de celulose permanecia indegradável após sete dias de incubação ruminal, resultando assim no desdobramento conceitual da celulose em duas frações: uma potencialmente degradável e outra indegradável (WALDO, 1970, citado por MERTENS, 1993). Waldo et al. (1972) relacionaram as taxas de degradação e de passagem desses componentes com o efeito de repleção ruminal (RR), sendo este fator determinante do consumo (VIEIRA et al., 1997a). A repleção ruminal é a expressão do tempo que o alimento permanece no rúmen, sofrendo os efeitos físicos de passagem, decorrentes da mastigação durante a ruminação e da digestão pelos microrganismos do rúmen (VAN SOEST, 1994), portanto é uma importante medida mecanicista utilizada para avaliar o efeito da fibra e suas frações sobre a retenção da digesta no rúmen (VIEIRA et al., 1997a).

O método mais comum para determinação da taxa de degradação foi proposto por Smith et al. (1971; 1972), que dividiram a fibra da forragem em frações potencialmente degradável e não degradável. Eles demonstraram a validade de expressar a degradação da parede celular como uma taxa constante, obedecendo à cinética de primeira ordem para uma ampla variedade de gramíneas e leguminosas temperadas.

Uma premissa associada com a cinética de primeira ordem é que a fração em questão é homogênea e que a velocidade de degradação é proporcional à quantidade de substrato presente no meio. Entretanto, esta premissa é violada quando a fração solúvel e a não degradável não são determinadas, ou quando uma mistura heterogênea de substratos potencialmente degradáveis está presente e sendo degradada simultaneamente a taxas diferentes (NOCEK & ENGLISH, 1986).

2.7. Taxa de passagem e tempo médio de retenção

A taxa de passagem refere-se ao escape de resíduos não digeridos e digeridos através do trato gastrintestinal. O escape inclui além da fibra indigestível, bactérias e outras frações não degradadas do alimento, devendo ser ressaltado que a composição da dieta (VAN SOEST, 1994; BÜRGER et al., 2000) animal e as condições climáticas (FAICHNEY, 1993) são as variáveis que influenciam a passagem da digesta. Os fatores dietéticos incluem o consumo voluntário, a quantidade e a forma física da fibra (MERTENS, 1977).

A lenta taxa de passagem da digesta pelo rúmen-retículo de animais alimentados com forragem de baixa qualidade tem sido atribuída a partículas grandes, com pequena probabilidade de escape do rúmen-retículo (HUNGATE, 1966; KENNEDY & MURPHY, 1988). Assim, a quebra das partículas da fibra deve ocorrer até que atinjam tamanhos e densidade que lhes possibilite passar no orifício retículo-omasal. A degradação física das forragens ingeridas pelos ruminantes, em fragmentos cada vez menores, dá-se pela combinação dos eventos: mastigação inicial durante a ingestão; mastigação durante a ruminação; fricção devido à movimentação da digesta; e digestão microbiana (FAICHNEY, 1986, citado por FONTES et al., 2001).

Em estudos com ovinos (POPPI et al., 1980) e com bovinos (ULYATT et al., 1986) constatou-se que para ocorrer a saída das partículas do rúmen é necessário que elas sejam reduzidas a um tamanho crítico, que seria cerca de 1 mm e de 1,5 a 2,0 mm, respectivamente. Caso todas as partículas, menores que o tamanho crítico, abandonassem o rúmen com a mesma facilidade, a proporção dos diversos tamanhos de partículas seria a mesma no conteúdo dos compartimentos rúmen-retículo e abomaso.

Se a taxa de passagem é um fator limitante no desaparecimento de material do rúmen (ULYATT et al., 1986), o entrelaçamento das partículas que constituem a malha filtrante do rúmen ou *raft* pode também assumir papel importante neste processo. Segundo Sutherland (1988), citado por Thiago & Gill (1990), essa malha filtrante funcionaria como uma espécie de peneira, que selecionaria partículas em movimento no rúmen, e sua formação dependeria do relacionamento entre o tamanho e a densidade das partículas que constituem a digesta e, conseqüentemente, do tempo após a alimentação e do tipo de forragem ingerida. Além disto, a presença do *raft* é também uma necessidade para manutenção normal das funções do rúmen, através da estimulação tátil de seu epitélio.

O conhecimento da dinâmica de fluxo da digesta é de fundamental importância em modelos de nutrição de ruminantes, que almejem acuradas predições de relacionamentos de dietas, suprimento de nutriente e específica performance animal (OFFER et al., 2000). Sua importância é grande, principalmente para definição de estratégias alimentares e para obtenção de suporte quantitativo para os estudos de nutrição (UDÉN et al., 1982).

2.7.1. Estimativa da taxa de passagem

A taxa de passagem (kp) pode ser estimada por meio de metodologias que preconizam o uso de marcadores e indicadores. Inúmeros são os indicadores com potencial para uso na determinação de estimativas de taxas de passagem, podendo ser classificados como indicadores de fase sólida e de fase líquida. (LIRA, 2000).

O óxido crômico (Cr_2O_3) tem sido o indicador mais amplamente utilizado para a estimativa da produção fecal, do consumo de forragem por meio da relação entre a produção fecal e a indigestibilidade da dieta. O Cr_2O_3 também possibilita estimar fluxo de matéria seca e matéria orgânica no aparelho digestório para posteriores inferências sobre o fluxo de proteína microbiana no duodeno, assim como sobre a partição da digestão dos nutrientes da dieta (VAN VUUREN et al., 1999; BURGER et al., 2000; FREGADOLLI, 2000). Suas vantagens residem no fato de não ser oneroso e na facilidade de incorporação à dieta e análise (LIMA et al., 1980; MERCHEN, 1988), somado à acurácia e precisão da técnica (PRIGGE et al., 1981; PEREIRA et al., 1983). Vários problemas têm sido relatados na literatura, com relação ao uso do óxido crômico, como incompleta homogeneização na digesta ruminal (SILVA & LEÃO, 1979), passagem mais rápida pelo rúmen que o material fibroso, possibilidade de acúmulo em algum segmento do aparelho digestório e variação diurna nas concentrações fecais (VAN SOEST, 1994).

Recentemente, o cromo tem sido utilizado na forma de dicromato ligado à parede celular, complexo determinado de cromo mordente (UDÉN et al., 1980; VAN SOEST, 1994). A técnica de utilização, conhecida como dose pulso, é amplamente empregada em estudos de cinética de trânsito, e consiste na aplicação de uma única dose e subsequente amostragem fecal em tempos definidos. Isso possibilita caracterizar a curva de excreção do indicador nas fezes (BURNS et al., 1994) e, posteriormente, o ajuste por meio de modelos matemáticos não lineares. RUIZ et al. (2001), em estudo com avaliação do cromo mordente, relata que o indicador estimou, com 96% de confiabilidade, os resultados referentes à ingestão de matéria seca.

Os lantanídeos (terras raras) são indicadores usados principalmente para estimativas de trânsito ou fluxo, marcando a fase sólida, ou a fase líquida.

ELLIS (1968) relata inúmeras propriedades das terras raras, e sugere vantagens no seu uso como indicador. Esses elementos têm afinidade pela parede celular das plantas e são empregados no estudo da taxa de passagem da digesta em ruminantes, sendo consideradas adequados indicadores de fluxo de resíduos indigestíveis (ELLIS et al., 2002). O itérbio (Yb) vem sendo um dos mais utilizados (COLEMAN, 1979; SALIBA, 1998). Entretanto, CROOKER et al. (1982) observaram solubilização do itérbio sob condições ácidas do abomaso. Segundo OWENS & HANSON (1992), ocorre variação diurna na concentração de indicador, porém a concentração fecal de itérbio tem sido constante durante 24 horas de amostragem, representando uma vantagem na sua utilização.

A disponibilidade do método de análise, frequentemente, dita se o indicador será utilizado, sendo os resultados dependentes do método de análise empregado (SALIBA, 1998).

A Espectrofotometria de Absorção Atômica (EAA) é o procedimento tipicamente empregado para determinar baixas concentrações de metais, portanto é a técnica utilizada para dosar Yb nas fezes de animais. Sabe-se que essa técnica é satisfatória, sendo o uso do Yb recomendado por PRIGGE et al. (1981) e BERCHIELLI et al. (1998).

O Cr-EDTA (ELLIS et al., 1980) e Co-EDTA (UDÉN et al., 1980) são indicadores de fase líquida, são totalmente solubilizados e têm sido utilizados para estimativa de volume de líquido ruminal e taxa de diluição. As análises desses indicadores são simples e muito precisas (MERCHEN, 1988). O cobalto ligado a EDTA (Co-EDTA) possui menor taxa de absorção em relação ao Cr-EDTA, possivelmente devido à formação de complexos, sendo a concentração do cobalto menos constante que a do cromo no Cr-EDTA.

Segundo Udén et al. (1980), a mensuração da taxa de passagem de partículas e fluidos exige a recuperação dos indicadores, que não são separados das respectivas frações lábeis. A suposição geral é que o indicador está em equilíbrio com a fração em que ele é lábil. Visto que nenhum indicador satisfaz totalmente estas condições, os indicadores de fase sólida são normalmente menos satisfatórios que os da fase líquida. Com a necessidade de determinar a taxa de passagem, torna-se desejável proceder às medições das taxas de passagem das duas fases em separado, visto que são relativamente independentes entre si.

Os fatores que influenciam a taxa de passagem da fase líquida, segundo Owens e Goetsch (1986), citados por Bürger et al. (2000), são o nível de ingestão, a proporção de concentrado, o indicador utilizado, bem como os locais de amostragem. Udén et al. (1980) verificaram que o Co-EDTA e o Cr-EDTA foram indicadores eficientes da fase líquida, produzindo resultados equivalentes.

O TMR é calculado pelo inverso da taxa de passagem, assumindo o valor $1/k$. A retenção do alimento no trato digestório permite a relação simbiótica entre o animal e os microrganismos, utilizando-se este último como substrato para crescimento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Formulação das dietas experimentais

O experimento foi conduzido em dois Quadrados Latinos simultâneos e balanceados para quatro tratamentos (LUCAS, 1957), no período de agosto a novembro de 2013. Foram utilizados quatro níveis de oferta diária de fibra insolúvel em detergente neutro escalonada para a massa corporal dos animais: 3, 6, 9 e 12 g/(kg.dia).

As dietas foram calculadas de modo a atingir os níveis de matéria orgânica fibrosa (aFDNom) e as necessidades de manutenção dos bovinos, sendo calculadas de acordo com o AFRC (1993).

A formulação de dietas com planos nutricionais crescentes e múltiplos do nível de oferta de fibra, foi tratado como um problema de programação não linear, conforme o procedimento descrito por Jardim et al. (2013). O algoritmo do modelo foi programado usando o Solver[®] do Microsoft Excel com o método de resolução de Newton (Lasdon et al., 1978).

A função objetivo mostrada na eq. (1) contém os custos individuais (c_j , \$/kg) de uma quantidade desconhecida x_j do j -ésimo ingrediente da ração a ser oferecida (kg.d). As restrições do problema são mostradas nas equações (2) - (10).

$$\min \sum_j c_j x_j, \text{ sujeito à:} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$L = 1, 1 \leq L \leq 2,5 \quad \text{Eq.(2)}$$

$$\Delta W \geq 0; \quad \text{Eq.(3)}$$

$$L = ME/M_m; \quad \text{Eq.(4)}$$

$$[peFDN] \geq 200; \quad \text{Eq.(5)}$$

$$aFDNom_{\text{oferecido}} = 3, 6, 9 \text{ ou } 12; \quad \text{Eq.(6)}$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{Eq.(7)}$$

O plano nutricional (L) foi planejado como mostrado na Eq. (2) e uma solução foi obtida para cada valor previsto de fibra a ser oferecida ($aFDNom_{\text{oferecido}}$) conforme a Eq. (6). O ganho de peso diário (ΔW , g/dia) não foi restrito. A metabolizabilidade da dieta ($q_m = [EM]/18,8$, adimensional) foi mantida dentro dos níveis planejados de consoante às Eqs. (2) e (4).

A energia metabolizável da dieta foi calculada como:

$$M/D = (\sum_j [MS]_j [EM]_j x_j) / (\sum_j [MS]_j x_j).$$

A quantidade de matéria seca oferecida ([MS], kg.dia) foi calculada como $\sum_j 0,001 [MS]_j x_j$.

A energia metabolizável fornecida pela dieta (EM, MJ/dia) foi igual a $\sum_j 0,001 [MS]_j [EM]_j x_j$. A matéria seca ([MS]_j, g/kg MS), a energia metabolizável ([EM]_j, MJ/kg MS), outros constituintes químicos dos alimentos de j-ésimo utilizados como *inputs* para o problema, bem como as quantidades diárias x_j oferecidos são mostradas nas Tabelas 1 e 2. As dietas dos quatro níveis de oferta de fibra foram mantidas isoprotéicas, sendo PB = 100 g/kg de MS.

Tabela 1 – Custo e composição química dos alimentos das dietas experimentais

Variável	Silagem de milho	Fubá de milho	Farelo de soja
cr ^a R\$/kg	0,12	0,60	0,60
[MS], g/kg	316,1	903,7	905,2
[FDN], g/kg	605,96	106,5	139,75
Pef	0,9	0,34	0,23
[GB], g/kg	21,03	45,96	11,04
[EB], MJ/kg	17,53	18,3	19,3
[EM], MJ/kg	10,1	13,8	12,6
[EMF], MJ/KG	8,0	12,4	12,0
[PB], g/kg	96,03	102,29	584,65
[NIDA]	1,2	-	2,2
a ^a , adms ^b	0,66	0,26	0,08
b ^a , adms ^b	0,19	0,69	0,92
u ^a , adms ^b	0,15	0,05	0
[QDP] ^a , g/kg MS	53	27	40
[SDP] ^a , g/kg MS	14	21	355
[ERDP] ^a , g/kg MS	56	42	386
[UDP] ^a , g/kg MS	14	54	103
[DUP] ^a , g/kg MS	5	49	80

^a cr, custo da ração; MS, matéria seca; FDN, fibra em detergente neutro; pef, fibra fisicamente efetiva; GB, gordura bruta; EB, energia bruta; EM, energia metabolizável; EMF, energia metabolizável fermentável; PB, proteína bruta, NIDA, nitrogênio insolúvel em detergente ácido; a, fração solúvel instantaneamente degradável; b, fração insolúvel potencialmente degradável; u, fração proteína não disponível; QDP, proteína rapidamente degradável, SDP, proteína lentamente degradável; ERDP, proteína efetivamente degradável no rúmen; UDP, proteína não degradável; DUP, proteína não degradável digestível.

^b adimensional

As restrições relacionadas à fibra são descritas pelas Eqs. (5)–(6), o que, desta forma, acomoda o problema da fibra ao modelo original do AFRC (Jardim et al., 2013). O conteúdo fibroso do j-ésimo alimento ([aFDNom], g/kg DM) e o seu respectivo fator de efetividade física (pef, adimensional) são mostrados na Tabela 1. O teor de fibra

fisicamente efetiva da dieta ([peFDN], g/kg de MS) foi calculado para uma quantidade mínima exigida, conforme mostrado na Eq. (5) para evitar distúrbios ruminais (CANNAS et al., 2004). Além disso, a capacidade máxima de oferta de fibra (Eq. (6)) foi restrita a 12 g/(kg.dia) (MERTENS, 1987; VIEIRA et al., 2008). A quantidade de fibra oferecida (aFDNom, kg.dia) foi definida como $10^{-6} \sum_j [MS]_j [FDN]_{j \times j}$.

Tabela 2 – Oferta de alimentos para cada nível de inclusão de fibra em função do peso vivo do animal (kg.dia).

Teor de fibra	Silagem de Milho		Fubá de Milho		Farelo de soja	
	219	298	219	298	219	298
3 g FDN	3,24	4,65	1,74	2,51	0,05	0,08
6 g FDN	7,72	11,15	0,77	1,11	0,14	0,20
9 g FDN	12,10	17,48	0	0	0,23	0,33
12 g FDN	16,14	23,31	0	0	0,50	0,44

FDN, fibra em detergente neutro.

3.2 Animais, alimentação e duração do experimento

Oito bovinos mestiços, quatro com 298 ± 27 kg e quatro com 219 ± 16 kg, foram divididos, aleatoriamente, no início do experimento como colunas nos quadrados latinos. Os animais foram mantidos em baias individuais, com livre acesso à água e as dietas experimentais, e as sequências de tratamentos foram sorteadas sem reposição entre as colunas, conforme Lucas (1957).

Os períodos experimentais consecutivos tiveram duração de 21 dias, assim distribuídos: período de adaptação de 14 dias e período de coleta de sete dias. Os animais foram alimentados duas vezes ao dia, às 8:00 e 16:00 horas e as sobras foram coletadas antes da oferta matinal de alimento, sendo que o oferecido, as sobras e as fezes foram coletadas diariamente durante o período de coleta. Os pesos frescos das dietas oferecidas, sobras e fezes foram registrados. As fezes foram coletadas três vezes ao dia, armazenadas em sacos plásticos e guardadas devidamente identificadas e homogêneas. No primeiro dia de cada período experimental, os pesos dos animais foram registrados e um peso médio foi calculado para cada combinação tratamento x animal x período.

3.3 Análises químicas das dietas oferecidas, sobras e fezes

Amostras das dietas oferecidas, sobras e fezes foram secas a 55 °C por 72 horas em estufa com circulação forçada de ar. As amostras individuais das dietas oferecidas, sobras

e fezes foram compostas com base no peso seco ao ar. As amostras compostas foram moídas em moinho tipo Wiley, com peneira com furos de 5 mm de diâmetro, e armazenadas. Aproximadamente, 0,1 kg das amostras armazenadas foram moídas empregando-se peneira com furos de 1 mm para as análises químicas.

As amostras das dietas, sobras e fezes foram analisadas para matéria seca ([MS], AOAC 967.03; AOAC, 1990) gordura bruta ([GB], AOAC 2003.06; THIEX et al., 2003) e cinzas (AOAC 942.05; AOAC, 1990).

Os teores de proteína bruta ([PB], g/kg de MS) das dietas oferecidas, sobras e fezes foram obtidos por digestão, de aproximadamente, 0,25 g de amostras em tubos de 100 mL, aos quais foram adicionados 5 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e 1 g de mistura catalítica de 56:1 de sulfato de sódio (Na₂SO₄) e sulfato de cobre pentahidratado (Cu₂SO₄).5H₂O. Este método foi realizado de acordo com as orientações descritas nos métodos 984.13 e 2001.11, incluindo a recuperação de nitrogênio com fosfato de amônio monobásico (NH₄H₂PO₄) certificado e lisina -HCl de pureza conhecida (AOAC, 1998; THIEX et al., 2002).

O teor de fibra insolúvel ([aFDNom], g/kg de MS) foi determinado com sulfito de sódio (Na₂SO₃) e duas adições de uma solução padronizada de amilase estável ao calor, e com cinzas excluídas de acordo com o método 2002.04 (MERTENS, 2002).

A energia bruta dos alimentos oferecidos, sobras e fezes foi determinada em bomba calorimétrica, seguindo o manual 1341 da Parr Instrument Company (1984). Os compostos solúveis em detergente neutro ([SDN], g/kg DM) e os carboidratos não-fibrosos ([CNF], g/kg de MS) foram estimados como as diferenças [SDN] = 1000 - [FDN], e [CNF] = 1000 - [PB] - [GB] - [Cinzas], respectivamente.

3.4 Quantidades computadas

O consumo e a quantidade de nutrientes e energia digeridos foram computados da seguinte maneira:

$$\forall \text{Nut}_D (\text{kg.d}) = \text{Nut}_{\text{Oferecido}} - \text{Nut}_{\text{Sobras}} - \text{Nut}_{\text{Fezes}}; \quad \text{Eq. (8)}$$

$$[\text{ED}] (\text{Mj/kg}) = (\text{ED}_{\text{Oferecido}} - \text{ED}_{\text{Sobras}} - \text{ED}_{\text{Fezes}}) / C. \quad \text{Eq. (9)}$$

O consumo de matéria seca efetivo (CMS, kg.dia) das dietas foi computado como $\text{CMS} = 0.001 (\sum_j [\text{MS}]_j x_j - [\text{MS}]_s S)$. A quantidade de sobras diárias (S, kg.dia), o teor de MS das sobras ([MS]_S, g/kg MS), e a MS fecal produzida diariamente (F, kg.dia) foram utilizados para o cálculo da digestibilidade da matéria seca ingerida ([MS] (D, kg.dia))

com a finalidade de cômputo das quantidades diárias de matéria seca, nutrientes e energia consumidos.

3.5 Análise estatística

O consumo de nutrientes, nutrientes digestíveis, energia digestível e a quantidade de fezes produzida diariamente foram escalonadas para o tamanho metabólico, ou seja, dividindo-se o respectivo consumo ou quantidade excretada por $W^{0,75}$ (g ou kJ/(kg^{0,75}.dia)). As exceções foram para a ingestão de fibra e lignina, as quais foram corrigidas para W^1 (g/(kg.dia); VAN SOEST, 1994).

O modelo linear misto, descrito pela equação (10), foi ajustado às variáveis escalonadas após transformação logarítmica, pois pressupôs-se que as variáveis do presente estudo seguiram distribuição log-normal. No entanto, as variáveis estimadas foram apresentadas em sua escala natural, ou seja, em MJ ou kJ/(kg^{0,75} ou kg.dia). O seguinte modelo linear misto foi adotado (TEMPELMAN, 2004):

$$y_{ikl} = \mu + \alpha_i + a_k + p_l + e_{ikl} \quad \text{Eq. (10)}$$

no qual y_{ikl} é a observação medida no k-ésimo bovino alimentado segundo a i-ésima oferta de fibra durante o l-ésimo período. Os efeitos fixos da Eq. (10) são a média (μ) e a oferta diária de fibra (α_i). Os períodos (p_l) comuns, aos dois quadrados latinos balanceados e simultâneos, os animais (a_k) e o erro (e_{ikl}) foram considerados fatores aleatórios e, conforme análises *a priori* e cômputo de critérios de verossimilhança, a interação aleatória tratamento \times período foi considerada negligenciável.

O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o procedimento PROC MIXED de SAS (versão 9; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), por meio do método de máxima verossimilhança restrita (REML). O fator aleatório a_k foi utilizado no comando *REPEATED* como *SUBJECT*.

A matriz de variância-covariância foi modelada como componentes de variância, simetria composta, correlações auto regressivas de primeira ordem ou, ainda, como a estrutura de variâncias e covariâncias irrestrita e os modelos de variâncias e covariâncias *power-of-the-mean* (Littell et al., 2006).

A probabilidade de verossimilhança das diferentes estruturas de variâncias e covariâncias foi avaliada a partir do critério de informação de Akaike (1974) corrigido para pequenas amostras (AICc; Sugiura, 1978). O AICc é um *output* do SAS obtido após o ajuste da Eq. (17) com diferentes estruturas de variâncias e covariâncias

(WOLFINGER, 1993).

As probabilidades das diferentes estruturas de variâncias e covariâncias (BURNHAM & ANDERSON, 2004) foram calculadas a partir do AICc, observadas as recomendações sugeridas por Vieira et al. (2012). Os critérios de informação computados (BIC, probabilidade de verossimilhança e razão evidência) também foram utilizados para verificar a probabilidade da Eq. (10), ajustada aos dados por meio da introdução da sentença *group* para tratamentos no comando REPEATED do programa SAS para verificar a hipótese de homocedasticidade (WOLFINGER, 1993; LITTELL et al., 2006). Hipóteses nulas sobre o fator tratamentos e seus respectivos componentes linear e quadrático foram rejeitadas sempre que $P < 0,05$.

A relação entre o consumo de energia digestível e o consumo de fibra foi analisada considerando-se o modelo alométrico descrito por Brody (1945) e as seguintes hipóteses:

$$H.1) F_{NDF} = \alpha_1 W^1 \text{ (Van Soest, 1994) e } F_{DE} = \alpha_2 W^{0,75};$$

$$H.2) F_{NDF} = \alpha_1 W^1 \text{ (Van Soest, 1994) e } F_{DE} = \alpha_2 W^{0,842} \text{ (Hui e Jackson, 2007);}$$

$$H.3) F_{NDF} = \alpha_2 W^{0,842} \text{ e } F_{DE} = \alpha_2 W^{0,842};$$

$$H.4) F_{NDF} = \alpha_2 W^{0,75} \text{ e } F_{DE} = \alpha_2 W^{0,75};$$

$$H.5) F_{NDF} = \alpha_1 W^{\beta_1} \text{ e } F_{DE} = \alpha_2 W^{\beta_2} \text{ quaisquer que sejam } \alpha_1, \alpha_2, \beta_1 \text{ e } \beta_2.$$

Estas hipóteses foram acomodadas no modelo linear da equação (10) da seguinte forma:

$$H.1.1) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,75}) = \mu + \delta \ln(X_{ijk}/W_{jk}) + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.1.2) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,75}) = \mu + \delta_1 \ln(X_{ijk}/W_{jk}) + \delta_2 (\ln(X_{ijk}/W_{jk}))^2 + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.2.1) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,842}) = \mu + \delta \ln(X_{ijk}/W_{jk}) + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.2.2) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,842}) = \mu + \delta_1 \ln(X_{ijk}/W_{jk}) + \delta_2 (\ln(X_{ijk}/W_{jk}))^2 + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.3.1) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,842}) = \mu + \delta \ln(X_{ijk}/W_{jk}^{0,842}) + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.3.2) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,842}) = \mu + \delta_1 \ln(X_{ijk}/W_{jk}^{0,842}) + \delta_2 (\ln(X_{ijk}/W_{jk}^{0,842}))^2 + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.4.1) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,75}) = \mu + \delta \ln(X_{ijk}/W_{jk}^{0,75}) + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.4.2) \ln(y_{ijk}/W_{jk}^{0,75}) = \mu + \delta_1 \ln(X_{ijk}/W_{jk}^{0,75}) + \delta_2 (\ln(X_{ijk}/W_{jk}^{0,75}))^2 + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.5.1) \ln(y_{ijk}) = \mu + \delta \ln X_{ijk} + \gamma \ln W_{jk} + a_j + p_k + e_{ijk};$$

$$H.5.2) \ln y_{ijk} = \mu + \delta_1 \ln X_{ijk} + \delta_2 (\ln X_{ijk})^2 + \gamma_1 \ln W_{jk} + \gamma_2 (\ln W_{jk})^2 + \gamma_3 (\ln X_{ijk})(\ln W_{jk}) + a_j + p_k + e_{ijk}$$

Nas hipóteses H.1.1 até H.5.2, $y_{ijk} = F_{DEijk}$ ou $y_{ijk} = F_{PBijk}$, $X_{ijk} = F_{aFDNomijk}$ e W_{jk} é a massa corporal média do k-ésimo animal durante o l-ésimo período experimental. Os modelos constantes nestas hipóteses foram ajustados por meio do programa PROC MIXED do SAS. Foram consideradas as mesmas estruturas de variâncias e covariâncias listadas anteriormente e empregados os mesmos critérios de verossimilhança, já descritos para escolha da(s) melhor(es) hipótese(s) a representar(em) a realidade dos dados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste das variáveis utilizando diferentes estruturas de variância-covariância mostrou que a estrutura de componentes de variância foi a melhor escolha entre as estruturas testadas para as variáveis F_{FDN} , F_{MS} , F_{Cinza} , R_{Cinza} , R_{FDN} , F_{Lig} , F_{MO} , F_{CF} , D_{CF} e R_{GB} . A estrutura de variância-covariância não estruturada foi a melhor escolha para R_{Lig}/F_{Lig} , F_{SDN} , D_{SDN} , F_{CNF} e F_{EB} . F_{GB} , R_{Lig} e R_{MO} apresentaram estrutura heterogênea como melhor escolha de estrutura de variância-covariância. A estrutura de simetria composta melhor se ajustou para as variáveis R_{MS} , F_{PB} e R_{EB} . *Spatial power* e *Spatial gaussian* foram as melhores escolhas, respectivamente, para D_{PB} e D_{CNF} .

Tabela 3 –Variáveis analisadas para o efeito do nível de inclusão de fibra na dieta, e respectivos p-valores

Variável	Linear	Quadrático	σ^2	Delta	W
$F_{MS}/W^{0,75}$	<0,001	0,582	VC	1	0,253
$R_{MS}/W^{0,75}$	<0,001	0,147	CS	0	0,312
$F_{OM}/W^{0,75}$	<0,001	0,711	VC	1.3	0,215
$D_{OM}/W^{0,75}$	<0,001	0,766	Heter.	0	0,843
$F_{CINZAS}/W^{0,75}$	<0,001	<0,001	VC	0	0,487
$R_{CINZAS}/W^{0,75}$	<0,001	<0,001	VC	0	0,256
$F_{GB}/W^{0,75*}$	0,168	0,017	Heter.	0	0,489
$R_{GB}/W^{0,75**}$	0,506	0,688	VC	0	0,345
$F_{PB}/W^{0,75}$	<0,001	0,161	CS	0	0,391
$D_{PB}/W^{0,75}$	<0,001	0,620	Sp(pow)	0	0,284
$F_{EB}/W^{0,75}$	0,001	0,769	Un.	0	0,393
$R_{EB}/W^{0,75}$	<0,001	0,151	CS	0	0,394
F_{FDN}/W	<0,001	<0,001	VC	0	0,371
R_{FDN}/W	<0,001	0,003	VC	0	0,348
$F_{SDN}/W^{0,75}$	0,002	0,074	Un.	0	0,971
$D_{SDN}/W^{0,75}$	0,002	0,218	Un.	0	0,811
$F_{CF}/W^{0,75}$	<0,001	<0,001	VC	0	0,504
$D_{CF}/W^{0,75}$	<0,001	<0,001	VC	0.7	0,258
$F_{CNF}/W^{0,75*}$	0,179	0,050	Un.	0	0,538
$D_{CNF}/W^{0,75*}$	0,179	0,073	Sp(Gau)	0.8	0,356
F_{Lig}/W	<0,001	<0,001	VC	0	0,346
R_{Lig}/W	<0,001	<0,001	Heter.	0	0,773
R_{Lig}/F_{Lig}	<0,001	0,039	Un.	0	1,000

VC, componentes de variância; CS, simeria composta; Heter, variância heterogênea; Sp(Pow), spatial power; Um, variância não estruturada; Sp(Gau), spatial gaussian.

F: Consumo; R: Produção fecal; D: Digestibilidade

*modelo linear foi o mais adequado, porém, não significativo

**modelo que melhor se ajustou foi sem intercepto

As variáveis F_{Cinza} , R_{Cinza} , R_{Lig} , F_{Lig} , F_{CF} e D_{CF} apresentaram efeito quadrático, enquanto as demais variáveis apresentaram efeito linear, o que pode ser observado nas equações mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Equações quadráticas e lineares relacionadas com as variáveis analisadas para o efeito do nível de inclusão de fibra na dieta

$$\begin{aligned}
 F_{MS}/W^{0,75} &= \exp(3,701 + 0,060x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{MS}/W^{0,75} &= \exp(2,714 + 0,054x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{MO}/W^{0,75} &= \exp(3,675 + 0,058x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 D_{MO}/W^{0,75} &= \exp(3,236 + 0,061x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{Cinza}/W^{0,75} &= \exp(-0,449 + 0,317x - 0,013x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{Cinza}/W^{0,75} &= \exp(-0,617 + 0,331 - 0,014x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{GB}/W^{0,75} &= \exp(0,461 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{GB}/W^{0,75} &= \exp(-1,131 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{PB}/W^{0,75} &= \exp(1,443 + 0,077x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 D_{PB}/W^{0,75} &= \exp(0,679 + 0,103x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{EB}/W^{0,75} &= \exp(-0,284 + 0,004x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{EB}/W^{0,75} &= \exp(-0,047 + 0,004x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{FDN}/W &= \exp(0,302 + 0,344x - 0,014x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{FDN}/W &= \exp(0,228 + 0,009x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{SDN}/W^{0,75} &= \exp(3,251 + 0,031x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 D_{SDN}/W^{0,75} &= \exp(2,876 + 0,033x + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{CF}/W^{0,75} &= \exp(1,645 + 0,34x - 0,014x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 D_{CF}/W^{0,75} &= \exp(0,472 + 0,485x - 0,021x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{CNF}/W^{0,75} &= \exp(3,031 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 D_{CNF}/W^{0,75} &= \exp(2,897 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 F_{Lig}/W &= \exp(-2,64 + 0,430x - 0,021x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{Lig}/W &= \exp(-2,642 + 0,425 - 0,021x^2 + \frac{1}{2} \sigma^2) \\
 R_{lig}/F_{lig} &= \exp(4,644 - 0,023x + \frac{1}{2} \sigma^2)
 \end{aligned}$$

F: Consumo; R: Produção fecal; D: Digestibilidade

Digestibilidade de algumas variáveis foi calculada pela diferença entre o consumido e

o excretado: $D_a F_{nut} = F_{nut} - R_{nut}$

À medida que aumentou-se o teor de fibra na dieta, observa-se um crescente aumento para os valores observados para variáveis FDN (Figura 2.2.g), CF (Figura 2.2.i), cinzas (Figura 2.1.c) e lignina (Figura 2.2.l). No entanto, próximo ao nível de 12 g, observa-se uma tendência de estabilização dos valores preditos. Em relação a essas variáveis, apenas a curva de excreção de cinzas nas fezes apresenta comportamento diferente, sendo mais estável do nível 3 g até o 6 g, e crescendo a partir desse nível.

As variáveis SDN (Figura 2.2.h), MO (Figura 2.1.b), MS (Figura 2.1.a), PB (Figura 2.1.e) e EB (Figura 2.1.f) apresentaram valores preditos com crescimento linear, o que indica uma não limitação do consumo dessas variáveis pelo aumento do teor de fibra na dieta. Contudo, as variáveis CNF (Figura 2.2.j) e GB (Figura 2.1.d) apresentaram resultados constantes de consumo e digestibilidade, indicando que o aumento do teor de fibra na dieta não influenciou esses dados.

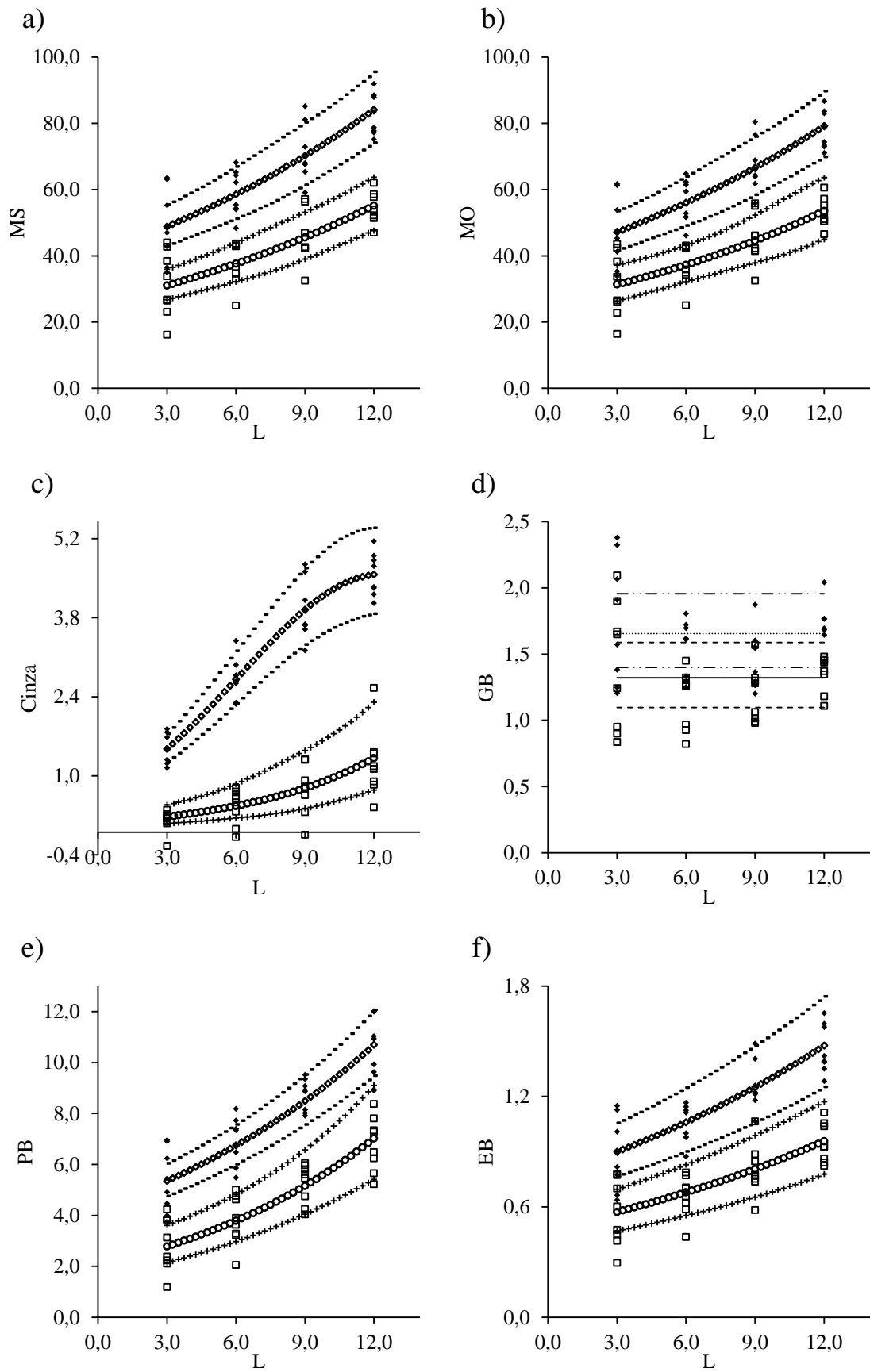


Figura 2.1 - Tendências observadas para as variáveis analisadas em função do plano nutricional (L).

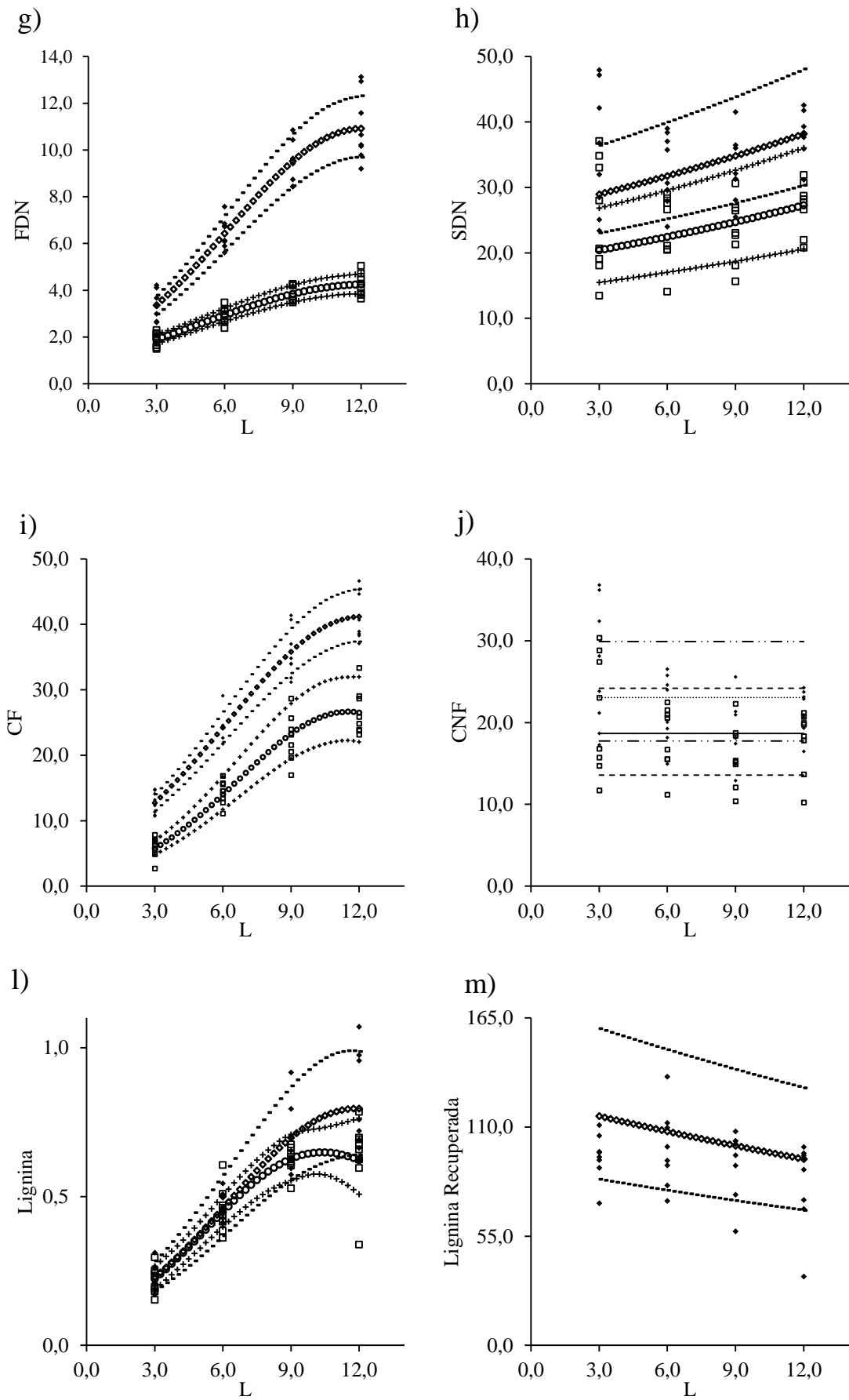


Figura 2.2 - Tendências observadas para as variáveis analisadas em função do plano nutricional (L).

Nas figuras, os limites superiores e inferiores para cada variável consumida são representados por (-), enquanto que os mesmos limites para a digestibilidade das variáveis são representados por (+). Os valores preditos (\diamond) e observados (\blacklozenge) de consumo, os preditos (\circ) e observados (\square) de digestibilidade em função do nível crescente de fibra, também estão representados.

A relação entre o consumo de energia digestível e o consumo de fibra foi analisada segundo as hipóteses descritas na metodologia, e a que mais se ajustou aos dados do presente trabalho foi a hipótese 5, quaisquer que sejam α_1 , α_2 , β_1 e β_2 . A estrutura de variância-covariância que melhor se ajustou à hipótese foi componentes de variância, sendo significativo o efeito quadrático do nível de FDN efetivamente consumido (F_{FDN}). No entanto, outra estrutura de variância-covariância, isto é, a estrutura de simetria composta, foi ajustada com verossimilhança equivalente para esta hipótese. Ainda assim, a primeira estrutura foi a escolhida, devido à sua simplicidade, pois há um menor número de parâmetros no modelo como um todo.

A relação entre consumo de proteína digestível e consumo de fibra também foi analisada e apresentou o mesmo resultado para as hipóteses testadas anteriormente e as estruturas de variância-covariância. As análises dessas relações apresentaram, respectivamente, os seguintes valores de diferença entre os critérios de Akaike corrigidos (Akaike, 1974; Sugiura, 1978): 0,0 e 0,598 para a energia digestível (Figura 3.a); e 0,0 e 0,440 para o consumo de proteína digestível (Figura 3.b). Os modelos ajustados para o consumo de energia digestível e proteína digestível foram:

$$\begin{aligned} \ln y_{ijk} = & 28.803 - 9.63 \ln X_{ijk} + 0.508(\ln X_{ijk})^2 + 3.419 \ln W_{jk} - 0.628(\ln W_{jk})^2 \\ & + 0.456(\ln X_{ijk})(\ln W_{jk}) \end{aligned} \quad \text{Eq.(11)}$$

$$\begin{aligned} \ln y_{ijk} = & 11.741 - 7.642 \ln X_{ijk} + 0.546(\ln X_{ijk})^2 + 7.784 \ln W_{jk} - 0.804(\ln W_{jk})^2 \\ & + 0.048(\ln X_{ijk})(\ln W_{jk}) \end{aligned} \quad \text{Eq.(12)}$$

Pode-se observar, ao analisar as estimativas dessas equações, que os parâmetros envolvendo o escalonamento da massa não satisfizeram as hipóteses tradicionais H.1 até H.4, o que as tornaram menos verossímeis para interpretação dos dados do presente estudo.

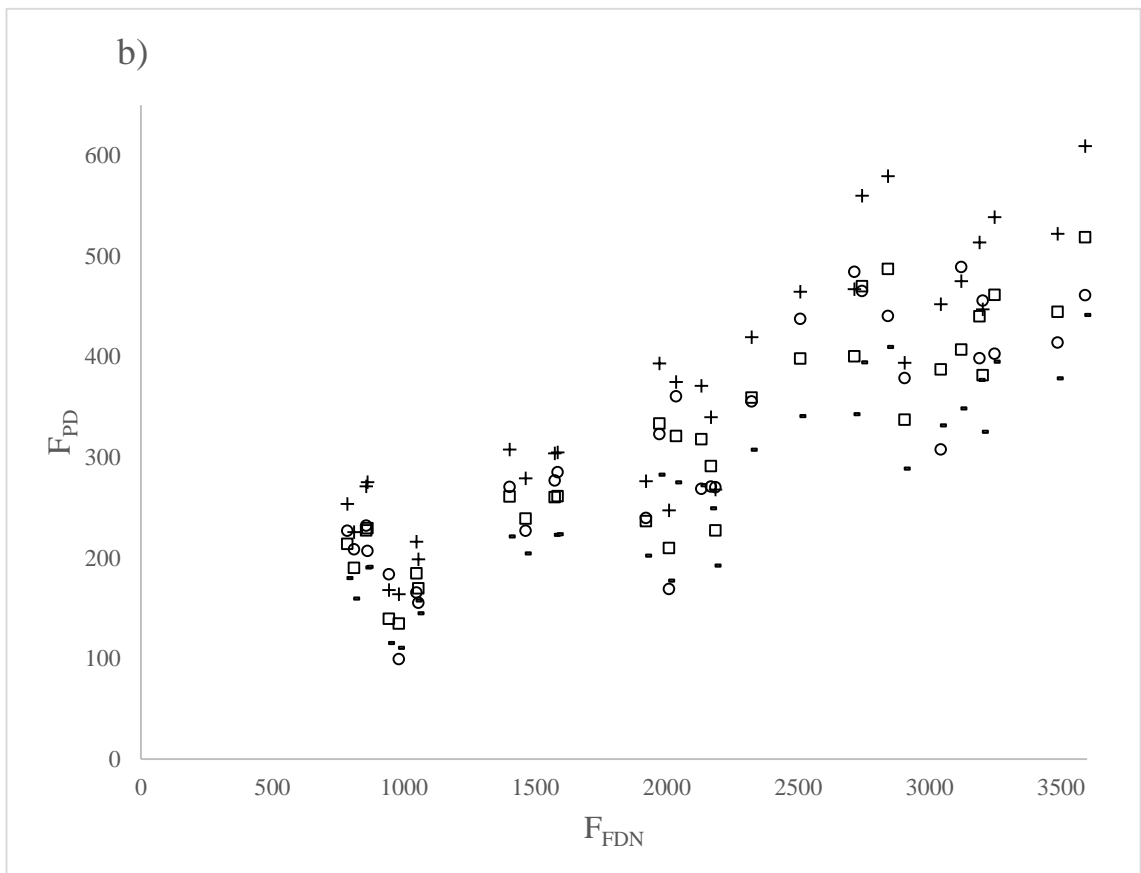
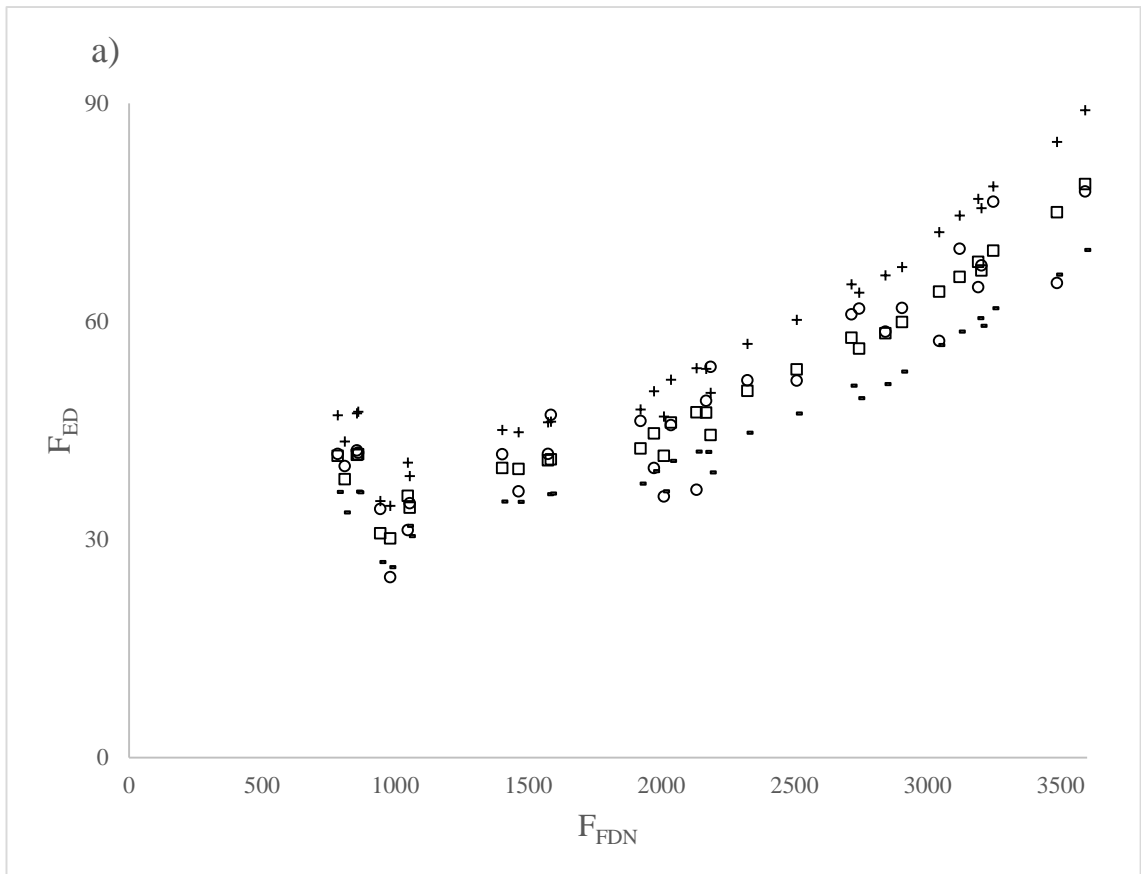


Figura 3- Tendências observadas para relação consumo de energia digestível e consumo de fibra, e consumo de proteína digestível e consumo de fibra.

Nas figuras, estão representados o limite superior (+) e inferior (-), bem como os valores preditos (□) e os valores observados (○).

A dieta foi formulada baseada em restrições para proteína bruta. Caso a dieta tivesse sido formulada para proteína digestível, talvez os dados observados apresentassem comportamento diferente do mostrado na figura 3.b.

A oferta de forragem foi aumentada e, após um determinado nível, verificou-se aumento das sobras e estabilização do consumo (Figura 2.2.g). O intervalo de confiança do valor predito englobou a estimativa de consumo de FDN na ordem de 12 g/(kg.dia) proposta por Mertens (1987) para vacas pluríparas em lactação; o mesmo autor propôs um desconto para novilhas e primíparas e estimou um consumo de FDN de 12 g/(kg.dia). O autor manteve este mesmo resultado após ampla revisão (Mertens, 1994). Pontualmente, a estimativa para os novilhos do presente estudo foi muito próxima. Contudo, a estimativa por intervalo (95%IC) englobou o valor proposto originalmente por Mertens (1987), pois IC95%: [9,7; 12,3].

A lignina pode ser considerada uma entidade nutricional, pois sua digestibilidade verdadeira é nula (Van Soest, 1994). Observou-se uma coincidência sistemática entre os valores preditos para o consumo e a perda fecal de lignina para ofertas diárias de FDN entre 3 e, aproximadamente, 7 g/(kg.dia), conforme é possível depreender da Figura 2.2.i. Para ofertas maiores de FDN, o consumo efetivo e a perda fecal de lignina seguiram tendências díspares. A seleção de partes mais nutritivas pelos animais pode ter sido uma consequência da redução do consumo de lignina, quando ocorreu maior oferta de alimento. Jardim et al. (2013) observaram o mesmo efeito em carneiros.

A lignina pode sofrer solubilização no trato digestório e não ser completamente recuperada nas fezes (VAN SOEST, 1994; HUHTANEN, 2006; MERTENS, 2002). No presente estudo tomou-se a precaução de se empregar *filter aid* nos cadinhos filtrantes para a análise de lignina, conforme salientado por Mertens (2002). Ainda assim, observou-se redução significativa da recuperação fecal da lignina consumida (Figura 2.2.m). Contudo, em ensaios de metabolismo, espera-se, que para níveis de consumo de fibra relatados no presente estudo, quando se verificou concordância entre os valores preditos, a lignina comportou-se como entidade nutricional ideal.

O consumo de energia e de proteína digestíveis foi influenciado pelo consumo efetivo de FDN (Figura 3). Como é possível verificar, as equações de predição do consumo de energia e proteína digestíveis mais verossímeis foram aquelas cujos parâmetros escalonadores da massa não foram restritos, o que significa dizer que o

escalonamento para a massa corporal foi significativo. Demment e Van Soest (1985) empregaram o expoente 0,75 para escalar o consumo de energia para a massa corporal.

Mertens (1987) empregou o expoente um para escalar o consumo de fibra para a massa corporal; no entanto, Clauss et al. (2007) verificaram a possibilidade de ausência de escalonamento da massa sobre a taxa de passagem em herbívoros. O ajuste de parâmetros escalonadores foi significativo no presente estudo e o emprego dos critérios de verossimilhança levou à rejeição das hipóteses de que eles fossem iguais a um ou iguais a 0,75, sendo o ajuste de um parâmetro *ad hoc* eficiente para o emprego da massa dos animais como covariável (Vieira et al., 2008).

5. CONCLUSÃO

O consumo de fibra (FDN) por bovinos mestiços leiteiros apresenta tendência à estabilização, próximo ao nível de oferta de FDN na dieta da ordem de $10,9 \pm 2,6$ g/(kg.dia). Tal limite evidencia que o nível de repleção ruminal causado pela FDN da dieta causa a estabilização do consumo de alimento. Porém, até o nível de oferta de FDN na ordem de 12 g/(kg.dia), o consumo de energia digestível foi crescente, o que demonstra que, na faixa de oferta de fibra entre 3 a 12 g/(kg.dia) e com dietas isoprotéicas e sem adição de alimentos ricos em energia, o limite de consumo imposto pela saciedade energética não se verifica.

O consumo e a excreção de lignina são coincidentes dentro da faixa de 3 a 7 g/(kg.dia) de oferta de FDN na dieta. Tal fato pode explicar o porquê de a lignina ser caracterizada como entidade nutricional em ensaios de digestão conduzidos em nível de manutenção, cuja oferta de FDN encontra-se situada nos limites encontrados no presente estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. Energy and protein requirements of ruminants. Cambridge University Press, 159p. 1993.

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. Technical Committee on Responses to Nutrients, No. 5, Nutritive Requirements of Ruminant Animals: Energy. Nutr. Abstr. Rev. 60:729–802, 1990.

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. The nutrition of goats. Nutrition Abstracts and Reviews (Series B) 67, 765-830. 1997.

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. The nutrition of goats. 116p. 1998.

AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL - ARC. The nutrient requirements of ruminant livestock. London: ARC, 351 p. 1980.

AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL - ARC. The nutrient requirements of ruminant livestock: technical review. London: Agricultural Research Council Working Party. 264p. 1965.

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, v.19, p.716-723, 1974.

ALLEN, M.S. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. Journal of Dairy Science, v.83, p.1598-1624, 2000.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY - AOAC. Official methods of analysis. 15. ed. Arlington: AOAC International, 1990. 1117p.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY - AOAC. Official methods of analysis of AOAC International: Agricultural chemicals, contaminants, drugs. 16. ed., v. 1. Gaithersburg: AOAC International, 1998.

BALDWIN, R. L.; DONOVAN, K.C. Modelling the lactating dairy cow. In: THEODOROU, M. K.; FRANCE, J. (Eds). Feeding systems and feed evaluation models. Wallingford: CAB International, p. 323-342. 2000.

BERCHIELLI, T. T. et al. Comparação de indicadores de fase sólida para medir fluxo de matéria seca e matéria orgânica no duodeno. Arquivo Brasileiro de Veterinária e Zootecnia. v. 50, n. 2, p.147-152, 1998

BLAXTER, K.L. The Energy Metabolism of Ruminants. Hutchinson & Co., Ltd., London. pp. 187, 169, 1962.

BRODY, S., Bioenergetics and Growth. With Special Reference to the Efficiency Complex in Domestic Animals. Reinhold Publishing Co., New York. 1945.

BÜRGER, P.J.; et al. Taxas de passagem e cinética da degradação ruminal em bezerros holandeses alimentados com dietas contendo diferentes níveis de concentrado. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.29, n.1, p.225-235, 2000.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociol. Methods Res.* 33:261-304. 2004.

BURNS, J. C. et al. Measurement of forage intake. In: FAHEY JUNIOR, G. C. Forage quality, evaluation, and utilization. *Winsconsin: American Society of Agronomy*, p. 494-532. 1994.

BURROUGHS, W.; NELSON, D. K.; MERTENS, D. R. Evaluation of protein nutrition by metabolizable protein and urea fermentation potential. *Journal of Dairy Science*, Champaign, v. 58, p. 611-219, 1975.

CANNAS A. et al. A mechanistic model for predicting the nutrient requirements and feed biological values for sheep. *Journal Animal Science*, v.82, p149-169, 2004.

CLAUSS, M. et al. The relationship of food intake and ingesta passage predicts feeding ecology in two diferente megaherbivore groups. *Oikos* 116, 209-216. 2007

COLEMAN, S. W. The use of ytterbium as a rumen kinetic marker. *Journal Animal Science*. v. 49, n.1, p. 38, 1979.

COLEMAN, S. W., HENRY, D. A. Nutritive value of herbage. In *Sheep Nutrition* (Eds M. Freer & H. Dove), pp. 1-26. Wallingford, UK: CAB international. 2002.

COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION - CSIRO PUBLISHING. Nutrient requirements of domesticated ruminants. Collingwood, Autralia.. 270p. 2007

CROOKER, B. A. et al. Rare earth elements as markers for rate of passage measurements of individual feedstuffs through the digestive tract of ruminants. *Journal Nutrition*. v. 112, n. 7, p. 1353-1361, 1982.

DIJKSTRA, J.; FRANCE, J. Modeling and methodology in animal science. In: DANFAER, A.; LESCOAT, P. (Eds.) *FOURTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON MODELING NUTRIENT UTILIZATION IN FARM ANIMALS*, 1995, Foulum. *Proceedings...*, Foulum, Denmark: National Institute of Animal Science, p. 9-18. 1995.

ELLIS, W. C. Dysprosium as an indigestible marker and its determination by radioactivation analysis. *Journal Agricultural Food Chemists*, v. 16, n. 2, p. 220-228, 1968.

ELLIS, W. C. Solute and particulate flow markers. In: OWENS, F. N. *Protein requirements for cattle: symposium, 1980, Oklahoma: Symposium Oklahoma: Press*, p. 37-56. 1980.

ELLIS, W.C.; BEEVER, K.C. Methods for binding rare earths to specific feed particles. In: KENNEDY, C.M.P. (Ed.) *Techniques in particles size analysis of feed and digest in ruminants*. Edmonton: Canadian Society of Animal Science, p.154-165. 1984.

FONTES, C.A.A. et al. Influência do nível de consumo sobre a degradabilidade das partículas e características ligadas à cinética ruminal, em novilhos pastejando capim-elefante. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.30, n.6, p.2134-2144, 2001.

FORBES, J. M. Voluntary food intake and diet selection by farms animals. Cambridge: CAB International, 1995

FOX, D.G., SNIFFEN, C.J.; O'CONNOR., J.D. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: III. Cattle requirements and diet adequacy. *Journal of Animal Science*, v.70, n. 12, p. 3578-3596, 1992.

FREGADOLLI, F. L. Efeito das fontes de amido e nitrogênio de diferentes degradabilidades ruminais sobre o pH e concentração de amônia no líquido ruminal e eficiência de síntese microbiana. 69 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.

GOERING, H.K.; VAN SOEST, P.J. Forage fiber analysis (Apparatus, reagents, procedures and some applications). Washington, DC: USDA.(Agricultural Handbook, 379). 1970.

GONÇALVES, J. S. et al. Valor nutritivo de capim-elefante (*Penisetum purpureum* Schum.) com adição de diferentes níveis dos subprodutos do processamento de acerola (*Malpighia glabra* L.) *Revista Ciência Agronômica*. v. 35, n. 1, p. 131-137, 2004.

HUI D.; JACKSON R.B.Uncertainty in scaling exponent estimation: a case study in basal metabolic rate and body mass. *J Theor Biol* 249:168–177. 2007.

HUNGATE, R.E. Introduction: the ruminant and the rumen. In: HOBSON, P.N. The rumen microbial ecosystem. London. p.1-19. 1988.

HUNGATE, R.E. The rumen and its microbes. New York, Academic Press, 533p. 1966.

JARDIM, J. G., et al. Application of a nonlinear optimization tool to balance diets with constant metabolizability. *Livestock Science* 158(1–3): 106-117. 2013.

JARRIGE, R. (Ed.), Alimentation des bovins, ovins & caprins, INRA, Paris. 1988.

KENNEDY, P.M.; MURPHY, M.R. The nutritional implications of differential passage of particles through the ruminant alimentary tract. *Nutrition Research Reviews*, v.1, n.1, p.189-208, 1988.

KLEIBER, M. The fire of life: an introduction to animal energetics. 2.ed. New York: Robert E. Krieger Publishing Co., 453p. 1975.

LASDON, L.S., et al. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nolinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 4, 34 – 50. 1978.

LAWRENCE, T.L.J.; FOWLER, V.R. Growth of farm animals. CAB International, 321p. 1997.

LIMA, M. A. et al. O uso do óxido crômico para estimar a produção fecal de novilhos zebu em pastejo. Rev. Soc. Bras. Zootec. v. 9, n. 2, p. 188-202, 1980.

LIRA, V. M. C. et al. Avaliação de marcadores e modelos matemáticos para o estudo das cinéticas de trânsito e de degradação ruminal em novilhos mantidos em pastagem de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.). Revista Brasileira de Zootecnia, Viçosa, v.35, n.3. 2006.

LITTELL, R.C.; MILLIKEN, G.A.; STROUP, W.W. et al. SAS system for mixed models. Cary: 633p. 1996.

LUCAS, H.L. Extra-period Latin-square change-over designs. Journal of Dairy Science. 40: 225, 1957.

M.A.F.F. Technical Bulletin 33 - "Energy Allowances and Feeding Systems for Ruminants". (HoMeS.0. : London). 1976.

MALAFAIA; P. A. M. et al. Cinética ruminal de alguns alimentos investigada por técnicas gravimétricas e metabólicas. Revista Brasileira de Zootecnia, v.27, n.2, p.370-380. 1998.

MAYNARD L. A. et al. Animal Nutrition. 7th edition. McGraw-Hill Book Co., New York. 1979.

McLEOD, M. N.; MINSON, D. J. The accuracy of the pepsin-cellulase technique for estimating the dry matter digestibility in vivo of grasses and legumes. Anim. Feed Sci. Technol. 3: 277-87. 1978.

MERCHEN, N. R. Digestion, absorption and excretion in ruminants. In: D. C. CHURCH. The ruminant animal digestive physiology and nutrition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, p. 172-201. 1988.

MERTENS, D.R. Dietary fiber components: relationship to the rate and extent of ruminal digestion. Federation Proceedings, v.36, n.2, p.187-192, 1977.

MERTENS, D.R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beaker or crucibles: collaborative study. Journal of AOAC International, v.85, p.1217-1240, 2002.

MERTENS, D.R. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. Journal Animal Science, Savoy, v.64, n.6, p.1548-1558, 1987.

MERTENS, D.R. Principles of modeling and simulation in teaching and research. Journal of Dairy Science, v. 60, n. 7, p. 1176-1186. 1976.

MERTENS, D.R. Rate and extent of digestion. In: FORBES, J.M.; FRANCE, J. Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. CAB International, Cambridge, p.13-51. 1993.

MERTENS, D.R. Regulation of forage intake. In: FAHEY JR., G.C. (Ed.). Forage quality, evaluation and utilization. American Society of Agronomy.450-493. 1994.

MERTENS, D.R.; LOFTEN, J. R. The effects of starch on forage fiber digestion kinetics in vitro. *Journal of Dairy Science*, v.63, p.1437-46. 1980.

MONOD, J. Recherche sur la croissance des cultures bactériennes. In: Hermann, editor. Paris (France); 1942.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of dairy cattle. 7.rev.ed. Washinton, D.C.: 381p. 2001.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of dairy cattle. 6.rev.ed. Washinton, D.C.: 157p. 1989.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirement of beef cattle. 7.rev. ed. National Academy Press, D.C.: 42p. 2000.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of small ruminants. 362p. 2006.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrient requirements of small ruminants, The National Academies Press, Washington, DC. 2007.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. Nutrients requirements of beef cattle. 7. ed. Washington, DC: National Academy Press, 242 p. 1996.

NOCEK, J.E. In situ and other methods to estimate ruminal protein and energy digestibility. A review. *J. Dairy Sci.*, v.71, p.2051-2069, 1988.

NUSSIO, L. G. Produção de silagem de milho de alta qualidade para animais de alta produção. IV Simpósio sobre nutrição de bovinos. Anais... Piracicaba, 1991.

NUSSIO, L.G. et al. Cana-de-açúcar como alimento para bovinos. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 3, 2006, Viçosa. Anais... Viçosa: FUNARBE, p. 277-328. 2006.

OFFER, N.W., DIXON, J. Factors affecting outflow rate from the reticulo- rumen. *Nut. Abs. e Rev. (Series B)*, v.70, n.11, p.833-844. 2000.

OWENS, F. N.; HANSON, C. F. External and internal markers for appraising site and extent of digestion in ruminants. *Journal of Dairy Science*. v. 75, n. 9, p. 2605-2617, 1992.

OWENS, F.N.; GOETSCH, A.L. Fermentación ruminal. In: CHURCH, D.C. El ruminante, fisiología digestiva y nutrición: Zaragoza: Acríbia, p.159-190. 1993.

PALMQUIST, D.L. Influence of source and amount of dietary fat on digestibility in lactating cows. *Journal of Dairy Science*, v.74, p.1354-1360, 1991.

PELL, A.N. et al. Rates of digestion of feeds measured in vitro with computers. *Cornell Nutrition Conference. Proceedings...* Cornell University, p.74-81, 1994.

PEREIRA, E. S. Dinâmica ruminal e pós-ruminal da proteína e de carboidratos: aplicação de um modelo matemático para avaliação de dietas à base de cana-de-açúcar. 95p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1999.

PEREIRA, E.S. et al. Determinação das frações protéicas e de carboidratos e taxas de degradação in vitro da cana-de-açúcar, da cama de frango e do farelo de algodão. Revista Brasileira de Zootecnia, v.29, n.6, p. 1887-1983. 2000.

PEREIRA, J.C. et al. Dinâmica da degradação ruminal por novilhos mantidos em pastagem natural em diferentes épocas do ano. Revista Brasileira de Zootecnia, v.31, n.2, p.740-748, 2002.

PRIGGE, E. C. et al. Comparison of ytterbium chloride and chromium sesquioxide as fecal indicators. J. Anim. Sci. v. 53, n. 6, p. 1629-1633, 1981.

PRIGGE, E.C. et al. Comparison of ytterbium chloride and chromium sesquioxide as fecal indicators. Journal of Animal Science, v.53, n.6, p.1629-1633, 1981.

ROCHA JUNIOR, V.R. et al. Estimativa do valor energético dos alimentos e validação das equações propostas pelo NRC (2001). Revista Brasileira de Zootecnia, v.32, n.2, p.480-490, 2003.

ROMERO, F. Utilización de la técnica de digestión in situ para la caracterización de forrajes. In: RUIZ, M.E.; RUIZ, A. (Ed.). Nutrición de Ruminantes: guía metodológica de investigación, Cap. II. Analisis biológico y tasa de digestión., 1990, San José, Costa Rica, IICA-RISPAL, 1990, p.105-114. 1990.

RUIZ, R. et al. Use of chromium mordanted neutral detergent residue as a predictor of fecal output to estimate intake in grazing high producing Holstein cows. Animal Feed Science and Technology. v. 89, n 3/4, p. 155-164, 2001.

RUSSELL, J. B. Rumen microbiology and its role in ruminant nutrition Ithaca, NY, 119p. 2002.

RUSSELL, J.B. Minimizing ruminant nitrogen losses. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia / Simpósio Internacional de Nutrição de Ruminantes, 29, Lavras. Anais... Lavras: UFLA, 1992, p.47-64. 1992.

SALIBA, E. O. S. Caracterização química e microscópica das ligninas dos resíduos agrícolas de milho e de soja expostos à degradação ruminal e seu efeito sobre a digestibilidade dos carboidratos estruturais. 1998. 236 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal)- Escola de Veterinária da UFMG, Belo Horizonte, 1998.

SALVADOR, F.A. Desempenho e digestibilidade em ovinos da raça santa inês alimentados em diferentes condições de balanços de proteína degradável no rúmen e proteína metabolizável. 135 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2007.

SANTOS, F. A. P. Metabolismo de proteínas. In; BERCHIELLI, T. T.; PIRES, A. V.; OLIVEIRA, S. G. de.(Ed.) Nutrição de ruminantes. Jaboticabal: FUNEP, p. 255-286. 2006.

SAUVANT, D. La modélisation systémique en nutrition. Repr Nutr Dev, v.32, p.217-230, 1992.

SAUVANT, D. Analyse systémique et modélisation: introduction. Cours Supérieur d'Alimentation des Animaux Domestiques. Paris : INAPG-DSA, 9p. 1999.

SILVA, J.F.C.; LEÃO, M.I. Fundamentos de nutrição dos ruminantes. Piracicaba: Livroceres, 380p. 1979.

SILVA, R.M.N. et al. Uréia para vacas em lactação. 2. Estimativas do volume urinário da produção microbiana e da excreção de uréia. Revista Brasileira de Zootecnia, v.30, n.6, p.1948-1957, 2001.

SMITH, L.W. et al. Relationships of forage compositions with rates of cell wall digestion and indigestibility of cell walls. Journal of Dairy Science, v.55, n.8, p.1440-1447, 1972.

SNIFFEN, C. J.; ROBINSON, P. H. Protein and fiber digestion, passage and utilization in lactating cows: microbial growth and flow as influenced by dietary manipulations. Journal of Dairy Science, Champaign, v. 70, n. 2, p. 425-441, 1987.

SNIFFEN, C.J. et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: carbohydrate and protein availability. Journal of Animal Science, v.70, n.12, p.3562-3577, 1992.

SPEDDING C.R.W. General aspects of modelling and its application in livestock production In: Korver S, Van Arendonk JAM, editores. Modelling of livestock production systems. Brussels (Belgium): Kluwer Academic Publishers; p. 3-9. 1988.

SUGIURA, N. Further analysis of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections. Comm. Statist. A 7, 13-26. 1978.

SUTHERLAND, T.M. Particle separation in the forestomachs of sheep. In: DOBSON, A., DOBSON, M. J. (Eds).Aspects of digestive physiology in ruminants. Ithaca: Ithaca Comstock Publishing associates. p.43-73. 1988.

TEDESCHI, L.O. et al. A nutrition mathematical model to account for dietary supply and requirements of energy and other nutrients for domesticated small ruminants: The development and evaluation of the Small Ruminant Nutrition System. Small Ruminant Research 89, 174-184. 2010.

TEMPELMAN, R.J. Experimental design and statistical methods for classical and bioequivalence hypothesis testing with na application to dairy nutrition studies. J. Anim. Sci. 2 E162-E172. 2004.

THIAGO, L.R.L.S.; GILL, M. Consumo voluntário: fatores relacionados com a degradação e passagem da forragem pelo rúmen. Campo Grande, EMBRAPA-CNPGC, 65p. (EMBRAPA-CNPGC. Documentos, 43). 1990.

THIEX, N. J., et al. Crude fat, hexanes Extraction, in feed, cereal grain, and forage (Randall/Soxtec/Submersion Method): collaborative study. J. Assoc. Off. Anal. Chem.

86, 899-908. 2003.

THIEX, N.J. et al. Determination of crude protein in animal feed, forage, grain, and oilseeds by using block digestion with a copper catalyst and steam distillation into boric acid: collaborative study. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 85, 309-317. 2002.

TILLEY, J. M. A.; TERRY, R.A. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *J. Brit. Grassland Soc.* 18:104. 1963.

UDÉN, P. et al. Investigation of chromium, cerium and cobalt as markers in digesta. Rate of passage studies. *Jornal Science Food Agricultural*, v.31, n.7, p.625-632, 1980.

UDÉN, P. et al. The measurement of liquid and solid digesta retention in ruminants, equines and rabbits given timothy (*Phleum pratense*) hay. *British Journal of Nutrition.*, v. 48, n.2, p. 329-339. 1982.

ULYATT, M.J.; et al. Contribution of chewing during eating and rumination to the clearance of digesta from the ruminoreticulum. In: MILLIGAN, L.P.; GROVUN, W.L.; DOBSON, A. (Ed.). *Control of digestion and metabolism in ruminants*. Reston, Reston Publishing, p.498-515. 1986.

VAN SOEST, P.J. et al. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, v.74, n.10, p.3583-3597, 1991.

VAN SOEST, P.J. *Nutritional ecology of the ruminant*. 2.ed. Ithaca: Cornell University Press. 476p. 1994.

VAN VUUREN, A. M. et al. Starch and stage of maturity of grass silage: site of digestion and intestinal nutrient supply in dairy cows. *J. Dairy Sci.* v. 82, n. 1, p. 143-152, 1999.

VIEIRA, R.A.M. et al. Fracionamento e cinética de degradação in vitro dos compostos nitrogenados da extrusa de bovinos a pasto. *Revista Brasileira de Zootecnia / Brazilian Journal of Animal Science*, Viçosa-MG, v. 29, n.3, p. 880-888, 2000.

VIEIRA, R.A.M. et al. Heterogeneity of the digestible insoluble fiber of selected forages in situ. *Anim. FeedSci. Technol.* 171, 154-166. 2012.

VIEIRA, R.A.M. et al. The influence elephant-grass (*Pennisetum purpureum* Schum., Mineiro variety) growth on the nutrient kinetic in the rumen. *Animal Feed Science and Technology*, v.67, p.151-161, 1997.

VIEIRA, R.A.M. Modelos matemáticos para estimativa de parâmetros da cinética de degradação do capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum., cv. mineiro) em diferentes idades de corte. Viçosa, MG: UFV, 1995. 88p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, 1995.

VIEIRA, R.A.M., et al. A generalized compartmental model to estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 2. Integrating digestion and passage. *J. Theor. Biol.* 255, 357-368. 2008.

WALDO, D. R. Factors influencing the voluntary intake of forages. In: NATIONAL CONFERENCE ON FORAGE QUALITY EVALUATION AND UTILIZATION, 1970, Lincoln: Proceeding... Lincoln: Nebraska Center for Continuing Education, p. F1-E12. 1970.

WALDO, D.R. et al.. Model of cellulose disappearance from the rumen. Journal of Dairy Science, v.55, n.1, p. 125-129, 1972.

WEISS, W.P. Estimating the availability energy content of feeds for dairy cattle. Symposium: energy availability. Journal Dairy Science, v.81, p.830-839, 1998.

WEISS, W.P. et al. A theoretically- based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. Animal Feed Science Technology, v.39, p.95-110, 1992.

WEISS, W.P. Predicting energy values of feed. In. Symposium: prevailing concepts in energy utilization by ruminants. Journal Dairy Science, v.76, p.1802-1811, 1993.

WILKINS, R.J. The potential digestibility of cellulose in forages and feaces. J. Agric. Sci., 73:57-64. 1969.

WOLFINGER, R. Covariance structure selection in general mixed models. Communications in Statistics, Simulation and Computation, v.22, n.4, p.1079-1106. 1993.