

ERICA BEATRIZ SCHULTZ

**SIMULAÇÕES DINÂMICAS DE DIGESTÃO E PASSAGEM DA FIBRA
NO TRATO GASTROINTESTINAL DE CABRAS LEITEIRAS**

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

Orientador: Marcelo Teixeira Rodrigues

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

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

T

S387s Schultz, Erica Beatriz, 1991-

2020 Simulações dinâmicas de digestão e passagem da fibra no
trato gastrointestinal de cabras leiteiras / Erica Beatriz Schultz. –
Viçosa, MG, 2020.

45f. : il. ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Marcelo Teixeira Rodrigues.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Caprinos. 2. Modelos Matemáticos. 3. Predição.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Zootecnia.
Programa de Pós-Graduação em Zootecnia. II. Título.

CDD 22 ed. 636.39

ERICA BEATRIZ SCHULTZ

**SIMULAÇÕES DINÂMICAS DE DIGESTÃO E PASSAGEM DA FIBRA
NO TRATO GASTROINTESTINAL DE CABRAS LEITEIRAS**

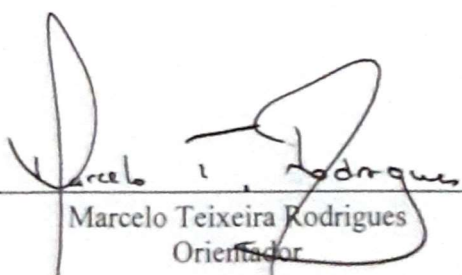
Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Zootecnia, para obtenção do título de
Doctor Scientiae.

APROVADA: 31 de janeiro de 2020.

Assentimento:



Erica Beatriz Schultz
Autora



Marcelo Teixeira Rodrigues
Orientador

“Toda conquista começa com a decisão de tentar”

“Não sabemos. Só podemos conjecturar”

Karl Popper

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

À Universidade Federal de Uberlândia, por ser a base desde início desta jornada.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Zootecnia, pela oportunidade de participar do Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

Ao meu orientador, professor Marcelo Teixeira Rodrigues pela liberdade na condução deste trabalho, pela confiança, apoio e incentivo na carreira acadêmica, pelos ensinamentos técnicos e de vida.

Aos professores Ricardo Augusto Mendonça Vieira, Fabyano Fonseca e Silva e Leonardo Siqueira Glória, que sempre estiveram à disposição para contribuir com este trabalho e na minha formação.

Aos professores Cristina Mattos Veloso, Fernando de Paula Leonel e Iran Borges, pela participação na banca e contribuições no aprimoramento deste trabalho.

Ao orientador de graduação e amigo, professor Gilberto de Lima Macedo Junior, pelo incentivo e carinho.

Aos meus pais Fátima e Gilberto, com todo amor e carinho, por não medirem esforços e incentivos durante essa jornada, amparando a minha ausência e festejando com minhas conquistas.

À minha irmã, Ana Karolina, e ao Pedro Samora, pelo amor, carinho e apoio.

Ao meu sobrinho, José Flávio, que com o olhar e a leveza de criança alegra minha vida, Tia Ecará te ama.

À minha avó Julia, pela doçura, orações, carinho e amor.

À Camila Cardoso e sua família, que considero como minha, pelo carinho, amor e paciência.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação e da UFRRJ pela atenção, ajuda e pelo carinho em vários momentos deste curso, tornando os dias mais felizes.

Aos meus amigos de longa data, Fofuchitos da Samara, Marina, Ricardo e Marcella por todo apoio.

À todos os colegas do Departamento de Produção Animal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela contribuição pessoal e profissional.

Aos alunos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pois, ensinar é aprender, ensinar é uma arte.

Aos setores de caprinocultura da Universidade Federal de Viçosa e da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, onde tive oportunidade de aprender e ensinar contribuindo para minha formação pessoal e profissional.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação profissional e pessoal.

BIOGRAFIA

ERICA BEATRIZ SCHULTZ, filha de José Gilberto Schultz e Fátima Marlene Morais Schultz, nasceu em 26 de julho de 1992, em Araguari, Minas Gerais.

Em julho de 2015, graduou-se em Zootecnia, pela Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

Em agosto de 2015, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, concentrando seus estudos na área de Produção e Nutrição de Ruminantes, concluindo em 17 de julho de 2017.

Em agosto de 2017, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, concentrando seus estudos na área de Produção e Nutrição de Ruminantes.

Em abril de 2019, foi aprovada em 1º lugar no concurso para professora substituta do Departamento de Produção Animal na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, onde ministra as disciplinas de caprinocultura, produção animal e manejo dos animais domésticos, em nível de graduação, e bioestatística aplicada ao software R, em nível de pós-graduação.

Submeteu à defesa de Doutorado na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, em 31 de Janeiro de 2020.

RESUMO

SCHULTZ, Erica Beatriz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2020. **Simulações dinâmicas de digestão e passagem da fibra no trato gastrointestinal de cabras leiteiras.** Orientador: Marcelo Teixeira Rodrigues.

Esta tese foi desenvolvida em três etapas de modelagem dinâmica. A primeira etapa da modelagem foi a construção de duas visões de modelos compartimentais utilizados para descrever a cinética de degradação e passagem da fibra pelo ambiente ruminal, com base na metodologia da dinâmica de sistemas. A segunda etapa da modelagem foi baseada na integração de um sub-modelo de consumo, para cabras no terço médio de lactação, a fim de realizar o *feedback* de controle físico do consumo. Integrando o submodelo aos modelos construídos, foram realizadas a avaliação dos mesmos quanto à predição da digestibilidade da fibra e o contraste entre os modelos. Para compreender o impacto dos parâmetros de taxa transferência (kr) e taxa de passagem (kp) na digestibilidade da fibra, em uma última etapa, foi verificada a sensibilidade dos parâmetros sobre este *output*. Os modelos dinâmicos foram capazes de prever a digestibilidade da fibra, com precisão de R^2 (0,39) para cabras leiteiras no terço médio de lactação. Ao contrastar os modelos, a diferença entre a divisão da fibra potencialmente digerível (FDN_{pd}) em rápida e lentamente transitável melhorou as estimativas de digestibilidade. Por outro lado, assumir taxas independentes e maiores para FDN_i leva a diferenças no *feedback* de consumo de matéria seca. A alteração nos parâmetros kr e kp demonstrou a importância dos parâmetros de taxa de transferência e passagem na predição da digestibilidade da fibra, confirmando a necessidade de estimativas precisas e acuradas para estes parâmetros da cinética de degradação e passagem ruminal da fibra. Os modelos de simulação dinâmica são úteis para o entendimento da cinética de degradação e passagem da fibra. No entanto, o maior número de informações e especificações quanto aos parâmetros deste processo precisam ser estudados para caprinos.

Palavras-chave: Caprinos. Modelagem. Predição.

ABSTRACT

SCHULTZ, Erica Beatriz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2020.
Dynamic simulations of digestion and passage of fiber in the gastrointestinal tract of dairy goats. Adviser: Marcelo Teixeira Rodrigues.

This thesis was composed of three-step modeling. The first went to built two compartment dynamic models for describe degradation and passage kinetics of fiber trough rumen. The second step was to build and integrate a sub-model of goats intake in the middle lactation, to accomplish feedback mechanism of intake physical control. After these steps, the models were evaluated to the ability to forecast the fiber digestibility and the contrast of fiber digestibility between models. In the last step, were performed the sensibility analysis to understand how parameters of transference rate (k_r) and passage rate (k_p) influence in the fiber digestibility. The compartmental dynamic rumen models for dairy goats in the middle lactation were able to predict fiber digestibility with a determination coefficient (R^2) of 0.39. By contrasting the models it was possible to find that the division of potentially digestible fiber (NDFpd) into rapidly and slowly improved digestibility estimates. On the other hand, assuming the independent passage rate for NFDi lead to differences in estimates of dry matter intake. The change in k_r and k_p parameters showed the importance of the passage rate parameters to predicting fiber digestibility, acknowledge the need for accurate estimates for these parameters of digestion and passage for describing fiber ruminal kinetics. Dynamic simulation models are usual for understanding fiber degradation and passage kinetics, however, the largest amount of information and specifications regarding the parameters need to be studied and tested for goats.

Keywords: Goats. Modeling. Prediction.

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Tabela 1: Descrição das unidades e abreviações das variáveis utilizadas no primeiro modelo

Tabela 2: Equações diferenciais utilizadas no primeiro modelo

Tabela 3: Descrição das unidades e abreviações das variáveis utilizadas no segundo modelo

Tabela 4: Equações utilizadas no segundo modelo.

Tabela 5: Resumo do banco de dados para o primeiro e segundo modelos

Tabela 6: Banco de dados usados na simulação dos modelos

Tabela 7: *Inputs* da cinética ruminal para os modelos de simulação

Tabela 8: Valores de *inputs*, observados, preditos e viés da digestibilidade da fibra em detergente neutro

Tabela 9: Valores de *inputs*, observados, preditos e viés da média de consumo de matéria seca

Tabela 10: Comparação entre os valores preditos pelos modelos

Tabela 11: Viés na sensibilidade dos parâmetros de taxa de transferência (kr) e taxa de passagem (kp) sobre a digestibilidade da fibra

Figura 1: Esquema do primeiro modelo para cinética de digestão e passagem da fibra

Figura 2: Diagrama do primeiro modelo e suas relações causais

Figura 3: Esquema do segundo modelo para cinética de degradação e passagem da fibra

Figura 4: Diagrama do segundo modelo e suas relações causais

Figura 5: Submodelo de consumo para cabras leiteiras em produção

Figura 6: Quantidade de fibra digerida em dez dias de lactação de acordo com o primeiro modelo

Figura 7: Quantidade de fibra digerida em dez dias de lactação de acordo com o segundo modelo

Figura 8: Estimativa da quantidade de fibra digerida no dia, dada oscilação no parâmetro kp do MOD1

Figura 9: Estimativa da quantidade de fibra digerida no dia, dada oscilação no parâmetro kp do MOD2

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	13
ARTIGO - AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA DA CINÉTICA RUMINAL DA FRAÇÃO FIBROSA PARA CABRAS LEITEIRAS NO TERÇO MÉDIO DA LACTAÇÃO	15
RESUMO	16
INTRODUÇÃO	17
MÉTODOS	18
<i>Estrutura do modelo para cinética ruminal da fibra</i>	<i>18</i>
<i>Primeiro modelo da cinética ruminal da fibra</i>	<i>19</i>
<i>Segundo modelo de cinética ruminal da fibra</i>	<i>24</i>
<i>Sub-modelo de consumo de matéria seca para cabras no terço médio de lactação</i>	<i>28</i>
<i>Procedimentos pré-simulação.....</i>	<i>28</i>
<i>Resumo do banco de dados e avaliação do modelo.....</i>	<i>29</i>
<i>Contrastando os modelos de cinética ruminal como ferramenta descritiva.....</i>	<i>30</i>
<i>Análise de sensibilidade.....</i>	<i>31</i>
RESULTADOS.....	31
<i>Predição dos modelos para digestibilidade da fibra</i>	<i>31</i>
<i>Contraste dos modelos como ferramenta descritiva.....</i>	<i>34</i>
<i>Análise de sensibilidade.....</i>	<i>35</i>
DISCUSSÃO	36
IMPLICAÇÕES NOS MODELOS.....	40
CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	41

INTRODUÇÃO GERAL

A modelagem matemática é uma ciência que promove um caminho lógico e sistemático para examinar sistemas complexos. Dentro dessa ciência, uma ferramenta de modelagem é a dinâmica de sistema, a qual permite integrar variáveis distantes no espaço-tempo e contrastar cenários, propondo, por exemplo, melhorias na formulação de dietas.

Na nutrição de ruminantes, para aperfeiçoar a formulação de rações, o principal componente de estudo é a fibra, pois quantidades mínimas desta são necessárias para manutenção das funções ruminais, além de influenciar na regulação do consumo, por ser o constituinte inversamente proporcional à concentração de energia e responsável pelo efeito de repleção (Mertens, 1987).

Isto sugere que, ao conhecer a concentração e a digestibilidade da fibra, pode-se descrever a maior parte da variação no consumo, o qual é determinante na avaliação de dietas e do desempenho animal (Mertens, 2010).

Portanto, para compreender o aproveitamento deste componente, a fim de aprimorar a formulação de dietas, em virtude da sua heterogeneidade, como demonstrado por van Soest (1967) por meio do teste de Lucas (1965), os processos tempo dependentes de digestão e passagem da massa fibrosa pelo trato gastrointestinal dos ruminantes têm a modelagem como um método substancial de investigação.

Com propósito de facilitar a modelagem da digestão e passagem e, por conseguinte, as características heterogêneas da fibra, o conteúdo fibroso no trato gastrointestinal foi dividido em frações digeríveis e indigeríveis (Blaxter et al., 1956; Waldo, 1972). Logo, com o fracionamento da fibra, modelos de primeira ordem foram descritos por Waldo (1972) assumindo que as taxas de digestão (kd) e passagem (kp) são constantes, levando à premissa de que a massa fibrosa potencialmente digerível seria homogênea.

Contudo, Allen & Mertens (1988) que assumir a massa fibrosa no rúmen como homogênea, não representa matematicamente e biologicamente as funções ruminais. Ou seja, ruminantes consumindo acima de 28% de fibra ou fibra em detergente neutro (FDN), a massa fibrosa no rúmen apresenta comportamento heterogêneo.

Neste contexto, para explicar a heterogeneidade do conteúdo fibroso, modelos compartimentais têm sido apresentados como de Allen & Mertens (1988); Van Miglen et al. (1991); Ellis et al. (2005); Huhtanen et al. (2008) e Veira et al. (2008).

Em parte assumir a abordagem compartimental deve-se à inconsistência em assumir uma simples taxa de digestão (kd), como nos modelos de primeira ordem, para fibra potencialmente digerível, devido à necessidade de um tempo para preparação da fibra (ex: hidratação e colonização), conhecido como *lag-time* (Van Miglen et al.,1991). Mas, é principalmente fundada na estratificação da digesta em duas fases distintas: uma flutuante conhecida, também, por não escapável e, outra sólida, contendo partículas capazes de escapar do ambiente ruminal.

Desta forma, de acordo com Mertens & Ely (1979) os modelos multicompartimentais simulam com muito mais precisão os efeitos no tamanho das partículas para compreender a regulação do consumo, e devem ser a base para o desenvolvimento de modelos futuros, considerando a dinâmica da digestão e passagem da fibra.

Partindo desta premissa, a abordagem dinâmica dos modelos multicompartimentais para cinética de digestão e passagem da fibra foi apresentada como nos estudos de Huhtanen et al. (2010) e Rafrrenato. (2019).

No entanto, além dos modelos propostos por Huhtanen et al. (2010) e Rafrrenato. (2019), outros modelos compartimentais já foram apresentados, dividindo linhas de pensamento sobre como modelar o *lag-time*, os compartimentos e o fluxo das partículas no ambiente não escapável para o escapável.

De acordo Huhtanen et al. (2010) e Rafrrenato et al. (2019) os materiais potencialmente degradável e não degradável apresentam diferentes taxas de passagem, ou seja, a massa fibrosa seria lentamente ou rapidamente transitada do *pool* não escapável para o *pool* escapável.

Por outro lado, para Vieira et al. (2008) há uma visão considerando que material fibroso passa do *pool* não escapável para o *pool* escapável através de uma taxa global de passagem levando em consideração o tamanho geométrico das partículas.

Posto isso, é observado que no aspecto dos modelos de digestão e passagem da massa fibrosa e sua contribuição para regulação do consumo, ainda há pontos no conhecimento científico que não estão consolidados. E, que há a necessidade de contrastar o cenário, visto a oscilação em seus parâmetros a fim de verificar se existem pontos de convergência entre as teorias.

Para realizar essas verificações, Sterman (2000) propôs, dentro da modelagem dinâmica, a análise de sensibilidade, que permite quantificar a variação dos modelos,

dada uma mudança nos seus parâmetros, verificar o comportamento gerado na oscilação de parâmetros e a convergência entre modelos.

Porém, para contrastar cenários e teorias da cinética ruminal e sua dinâmica em relação à regulação do consumo, também é necessário considerar sub-modelos dentro da dinâmica que integrem o consumo do animal. Um simples exemplo dessa integração entre dinâmica ruminal e animal, para vacas leiteiras, foi demonstrado por Mertens (2010). No entanto, para nenhuma das teorias há abordagem da cinética ruminal para cabras leiteiras.

O rebanho caprino de acordo com a FAO, (2019) dentre os ruminantes domésticos é o que mais se desenvolveu nos últimos 20 anos, demonstrando a necessidade de aprimoramento na formulação de dieta para esta espécie.

Portanto, o objetivo com esta tese é: 1) descrever dois sistemas dinâmicos da cinética de digestão da fibra abordando as duas teorias contrastantes; 2) descrever um sub-modelo dinâmico de consumo de cabras no terço médio da lactação; 3) Unir os modelos dinâmicos de cinética ruminal ao de consumo do animal a fim de realizar um *feedback* na dinâmica de regulação do consumo; 4) Contrastar a sensibilidade na predição dos sistemas dinâmicos de cinética ruminal para cabras leiteiras no terço médio de lactação oscilando valores em seus parâmetros.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, M. S., & MERTENS, D. R. (1988). Evaluating constraints on fiber digestion by rumen microbes. *The Journal of Nutrition*, 118(2), 261-270.
- BLAXTER, K. L., GRAHAM, N. M., & WAINMAN, F. W. (1956). Some observations on the digestibility of food by sheep, and on related problems. *British Journal of Nutrition*, 10(2), 69-91.
- ELLIS, W. C., MAHLOOJI, M., & MATIS, J. H. (2005). Models for estimating parameters of neutral detergent fiber digestion by ruminal microorganisms. *Journal of animal science*, 83(7), 1591-1601.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2019. Acesso em: www.fao.org > home.
- HUHTANEN, P., SEPPALA, A., OTS, M., AHVENJARVI, S., & RINNE, M. (2008). In vitro gas production profiles to estimate extent and effective first-order rate of neutral detergent fiber digestion in the rumen. *Journal of animal science*, 86(3), 651-659.
- HUHTANEN, P., SEPPALA, A., OTS, M., AHVENJARVI, S., & RINNE, M. (2008).

In vitro gas production profiles to estimate extent and effective first-order rate of neutral detergent fiber digestion in the rumen. *Journal of animal science*, 86(3), 651-659.

MERTENS, D. R., & ELY, L. O. (1979). A dynamic model of fiber digestion and passage in the ruminant for evaluating forage quality. *Journal of Animal Science*, 49(4), 1085-1095.

MERTENS, D. R. (1987). Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function 1. *Journal of animal science*, 64(5), 1548-1558.DOI: 10.2527/jas1987.6451548x

MERTENS, D. R. (2010, OCTOBER). NDF and DMI—has anything changed. In *Proceedings of the 2010 Cornell nutrition conference for feed manufacturers*, East Syracuse, NY (pp. 160-174).

RAFFRENATO E., NICHOLSON, C. F., & VAN AMBURGH, M. E. (2019). Development of a mathematical model to predict pool sizes and rates of digestion of 2 pools of digestible neutral detergent fiber and an undigested neutral detergent fiber fraction within various forages. *Journal of dairy science*, 102(1), 351-364.

STERMAN, JD. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. 2000.

VAN MILGEN, J., MURPHY, M. R., & BERGER, L. L. (1991). A compartmental model to analyze ruminal digestion. *Journal of Dairy Science*, 74(8), 2515-2529.

VAN SOEST, P. J. (1967). Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. *Journal of animal Science*, 26(1), 119-128.

VIEIRA, R. A. M., TEDESCHI, L. O., & CANNAS, A. (2008). A generalized compartmental model to estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 1. Estimating parameters of digestion. *Journal of Theoretical Biology*, 255(4), 345-356.

WALDO, D. R., SMITH, L. W., & COX, E. L. (1972). Model of cellulose disappearance from the rumen. *Journal of Dairy Science*, 55(1), 125-129.

**ARTIGO - AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO
DINÂMICA DA CINÉTICA RUMINAL DA FRAÇÃO FIBROSA PARA
CABRAS LEITEIRAS NO TERÇO MÉDIO DA LACTAÇÃO**

E.B. Schultz¹, M.T. Rodrigues¹.

¹ Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa, MG, Brazil

RESUMO

Objetivou-se avaliar e contrastar pela abordagem da dinâmica de sistemas, a predição da digestibilidade da fibra por meio de modelos de simulação da cinética de digestão e passagem da fibra pelo rúmen de cabras leiteiras no terço final da gestação. Os modelos compartimentais da cinética de degradação e passagem da fibra pelo rúmen foram construídos com base na metodologia da dinâmica de sistema, associando os componentes a fluxos, estoques e variáveis auxiliares. O primeiro modelo teve como pressuposições a divisão da fibra potencialmente digerível (FDNpd) em rápida ou lentamente transitável, e a independência da passagem da fibra indigerível (FDNi) pelo trato gastrointestinal. O segundo modelo pressupôs a FDNpd e FDNi com taxas de passagem globais, considerando o tamanho geométrico da partícula. Os *inputs* dos modelos foram fundados baseados em estudos da literatura. As simulações foram realizadas e os resultados foram comparados com um estudo independente para avaliação e contraste dos modelos. Após esta avaliação, foi feita a análise de sensibilidade dos modelos quanto aos parâmetros taxa de transição (k_r) e taxa de passagem (k_p) para predizer a digestibilidade da fibra. Os modelos foram capazes de predizer a digestibilidade da fibra, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,39. Os modelos demonstraram similaridade quanto aos resultados de digestibilidade da fibra, mesmo devido às diferentes pressuposições na modelagem. A análise de sensibilidade demonstrou, em ambos os modelos, a importância de se obter parâmetros precisos e acurados de taxa de passagem.

INTRODUÇÃO

A fibra é a principal fração alimentar nos modelos de regulação de consumo para ruminantes, por ser de lenta digestão ou indigerível, inversamente proporcional à concentração de energia da dieta e é responsável pelo efeito de enchimento ruminal (Mertens, 1994). Dada a sua relevância, os avanços na modelagem da digestibilidade da fibra no rumên-retículo tem contribuído para melhorias na formulação da dieta.

Estes avanços foram evidenciados por Van Miglen et al. (1991); Ellis et al. (2005); Huhtanen et al. (2008); e Vieira et al. (2008), demonstrando que os modelos multicompartimentais melhoram a estimativa da digestibilidade da fibra. E, portanto, elucidando a ocorrência da estratificação da fibra ruminal em duas fases distintas: uma fase com o *pool* de partículas não escapáveis e outra contendo partículas menores, capazes de escapar do ambiente ruminal.

Embora tenha avançado, duas abordagens têm se mostrado contrastantes na modelagem compartimental para descrever a massa de fibra ruminal, e para estimar a digestibilidade.

A primeira considera que a massa fibrosa potencialmente degradável passa lenta ou rapidamente do *pool* não escapável para o *pool* escapável, e que a fração não degradável assume taxa de passagem diferente da fibra potencialmente degradável (Huhtanen et al. 2008).

Por outro lado, há a visão de que o material fibroso potencialmente degradável e não degradável transitam dos compartimentos não escapável para o escapável por meio de uma taxa de passagem global, considerando o tamanho geométrico das partículas (Vieira et al. 2008).

Devido a essas teorias contrastantes, surgem, então, questionamentos sobre qual a melhor maneira de modelar a cinética ruminal de digestão e passagem da fibra, e se entre os modelos há diferença ou semelhanças na predição da digestibilidade da fibra.

Para responder a estes questionamentos, sendo a cinética ruminal da fibra um processo tempo-dependente, ou seja, dinâmico, os modelos de simulação têm se apresentando como uma excelente ferramenta (Mertens & Ely, 1979).

Deste modo, entre as ferramentas de simulação, a dinâmica de sistema é preponderante por ser capaz de modelar e simular fluxos, além de integrar variáveis distantes no espaço-tempo (Stermann, 2000).

Apesar de apresentada como uma boa ferramenta de modelagem, poucos modelos de simulação dinâmica para cinética da fibra ruminal são apresentados na literatura, em que os existentes são derivados da primeira teoria (Huhtanen et al., 2008; Raffrenato et al., 2010; Raffrenato et al., 2019). Carecendo, portanto, de uma abordagem dinâmica para a cinética da massa fibrosa, considerando uma taxa de passagem global no rumen-retículo.

Além desta lacuna, vale destacar que poucos modelos dinâmicos integram os requisitos nutricionais ou o consumo de matéria seca aos modelos de cinética ruminal, como demonstrado por Mertens & Ely (1989); Illus et al. (1991) e Mertens (2010) para vacas. Ressalta-se que, não há pesquisas de integração do consumo de matéria seca a modelos dinâmicos de cinética de digestão para ruminantes seletivos, como os caprinos.

A integração do consumo de matéria seca é importante porque, segundo Sauvante (2019), apoia a eficiência e a robustez dos modelos, fornecendo uma visão holística do problema estudado.

Portanto, nossa hipótese é verificar se os modelos multicompartimentais de simulação dinâmica da cinética de digestão e passagem da fibra pelo rumen-retículo são capazes de prever a digestibilidade da fibra e se há similaridade e dissimilaridade entre eles.

Logo, para aprimorar nossa compreensão da cinética ruminal, objetivou-se, na primeira etapa, modelar as duas teorias sobre a cinética ruminal da fibra pela dinâmica de sistemas. Em uma segunda etapa, integrar um submodelo dinâmico do consumo de matéria seca para cabras no terço médio da lactação a cinética ruminal. E, por fim, contrastar e analisar a sensibilidade dos parâmetros dos modelos na predição da digestibilidade da fibra.

MÉTODOS

Estrutura do modelo para cinética ruminal da fibra

A experimentação foi realizada *in silico*, tendo sido construídos modelos compartimentais com base na dinâmica de sistemas, para descrever o processo de digestão e passagem da massa fibrosa no trato gastrointestinal de cabras leiteiras ao longo do tempo.

A modelagem pela dinâmica de sistemas foi fundamentada em conjuntos de equações diferenciais ordinárias baseadas nas relações de causalidade entre variáveis

selecionadas, com o arranjo dos principais componentes, que são: estoques, fluxos, *feedbacks*, atrasos e regras de decisão (Sterman, 2000).

Primeiro modelo da cinética ruminal da fibra

Para descrever a cinética ruminal da fibra, o primeiro modelo foi construído semelhante ao proposto por Huhtanen et al. (2008), no qual a fibra em detergente neutro potencialmente degradável (FDNpd) pode transitar rápida ou lentamente do *pool* não escapável ao escapável, e a fibra não degradável (FDNi) assume taxa de passagem distinta à da potencialmente degradável.

A primeira etapa da modelagem foi determinanr a fração da fibra não degradável (FDNi) , estimada pela a equação 1:

$$FDN_i = Lignina \times 2,4 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que; FDNi é a fração da fibra indigerível em g . kg⁻¹ e a quantidade de lignina g . kg⁻¹.

A partir desta etapa foi possível calcular a fibra potencialmente degradável (FDNpd) pela equação 2:

$$FDNpd = FDN - FDNi \quad \text{Eq. 2}$$

Em que; FDN é a quantidade de fibra consumida em g . kg⁻¹ e FDNi a quantidade de fibra não degradável em g . kg⁻¹.

Após a determinação das frações da fibra para a simulação da cinética de degradação e passagem da fibra no rúmen, foram selecionadas as variáveis pertinentes ao modelo (Tablea 1).

Tabela 1: Descrição das unidades e abreviações das variáveis utilizadas no primeiro modelo

Variáveis	Unidade	Descrição
FDNd	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro degradada
PE	kg . dia ⁻¹	<i>Pool</i> escapável
R	*	Rapidamente
k1	dia ⁻¹	Taxa fracional de degradação rápida
k2	dia ⁻¹	Taxa fracional de degradação lenta
kr	dia ⁻¹	Taxa de transferência do pool não escapável para o escapável
kp	dia ⁻¹	Taxa de passagem do pool escapável para o intestino
Kp (0)	dia ⁻¹	Taxa de passagem da FDNi para o intestino
FDNc	kg . dia ⁻¹	Consumo de fibra em detergente
[LIG]	g . kg ⁻¹	Concentração de lignina
PNE	kg . dia ⁻¹	<i>Pool</i> não escapável
FDNpd	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro potencialmente degradável
L	*	Lentamente
FDNu	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro não digerida
FDNi	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro não degradável
FDNiu	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro não digerida que escapa do rúmen
[FDN]	g . kg ⁻¹	Concentração de fibra em detergente neutro da dieta
MC	kg	Massa corporal
PL	kg	Produção de leite
PLD	kg	Produção de leite no dia

* Adimensional

Com a determinação das variáveis, o modelo foi construído com base nas equações diferenciais para prever a digestibilidade da fibra (Tabela 2).

Tabela 2: Equações diferenciais utilizadas no primeiro modelo

Variável	Equação
FDNc	$= \text{Consumo} \times [NDF]$
FDNpdR	$= FDNpdR \times kd1$
FDNpdL	$= FDNpdL \times kd2$
FDNPNER	$= FDNpdR - FDNpdR \times k1 * FDNpdR \times kr$
FDNPNEL	$= FDNpdL - FDNpdL \times k2 - FDNpdL \times kr$
FDNPER	$= FDNpdR \times kr - (FDNpdR \times kr) \times k1 - (FDNpdR \times kr) \times kp$
FDNPEL	$= FDNpdR \times kr - (FDNpdL \times kr) \times k2 - (FDNpdL \times kr) \times kp$
FDNd	$= (FDNPNER \times k1) + (FDNPER \times k1) + (FDNPNEL \times k2) + (FDNPEL \times k2)$
FDNu	$= FDNPER \times kp + FDNPEL \times kp + FDNiu \times kp(0)$

Para execução das equações diferenciais, partiu-se das seguintes pressuposições: o total da fibra potencialmente degradável foi determinada por Raffrenato et al. (2019) em frações 80% rápida e 20% lenta para feno de gramíneas. As taxas de degradação das frações (k1 e k2) também foram multiplicadas pelo percentual de cada compartimento.

Para estimativa da taxa de passagem (kp (0)) da FDNi foi utilizada a recomendação de Huhtanen (2006) igual a 1,2 dia⁻¹.

Matematicamente, os principais fluxos para os estoques podem ser escritos como:

$$FDNd(t) = \int_{t0}^t FDNd_{(ti)} ds$$

$$FDNu(t) = \int_{t0}^t FDNu_{(ti)} ds$$

No qual; o FDNd é a fibra em detergente neutro degradada, FDNu é a fibra em detergente neutro não degradada, t0 é o tempo inicial, e ti é o tempo no momento i.

Para exemplificar o fracionamento da fibra e os fluxos o esquema do modelo é demonstrado na Figura 1.

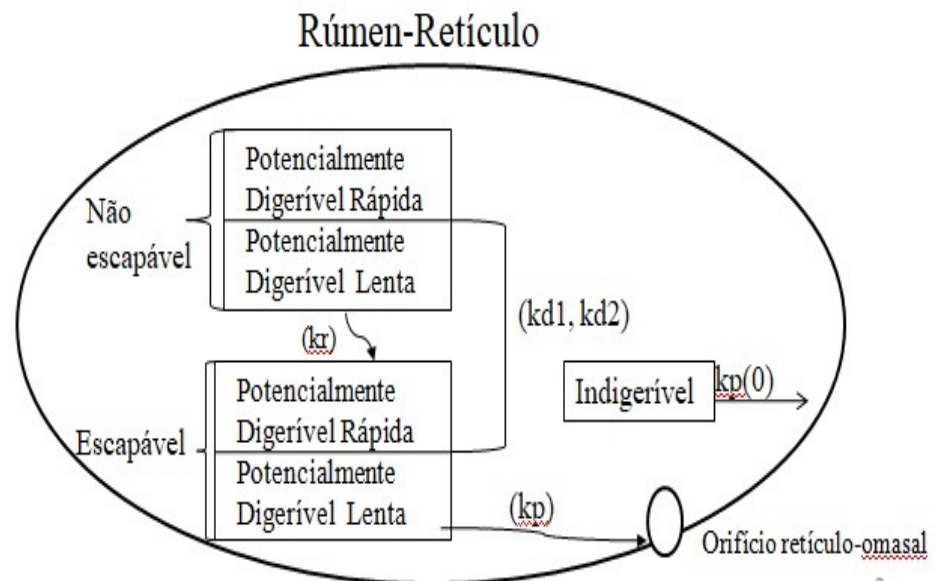
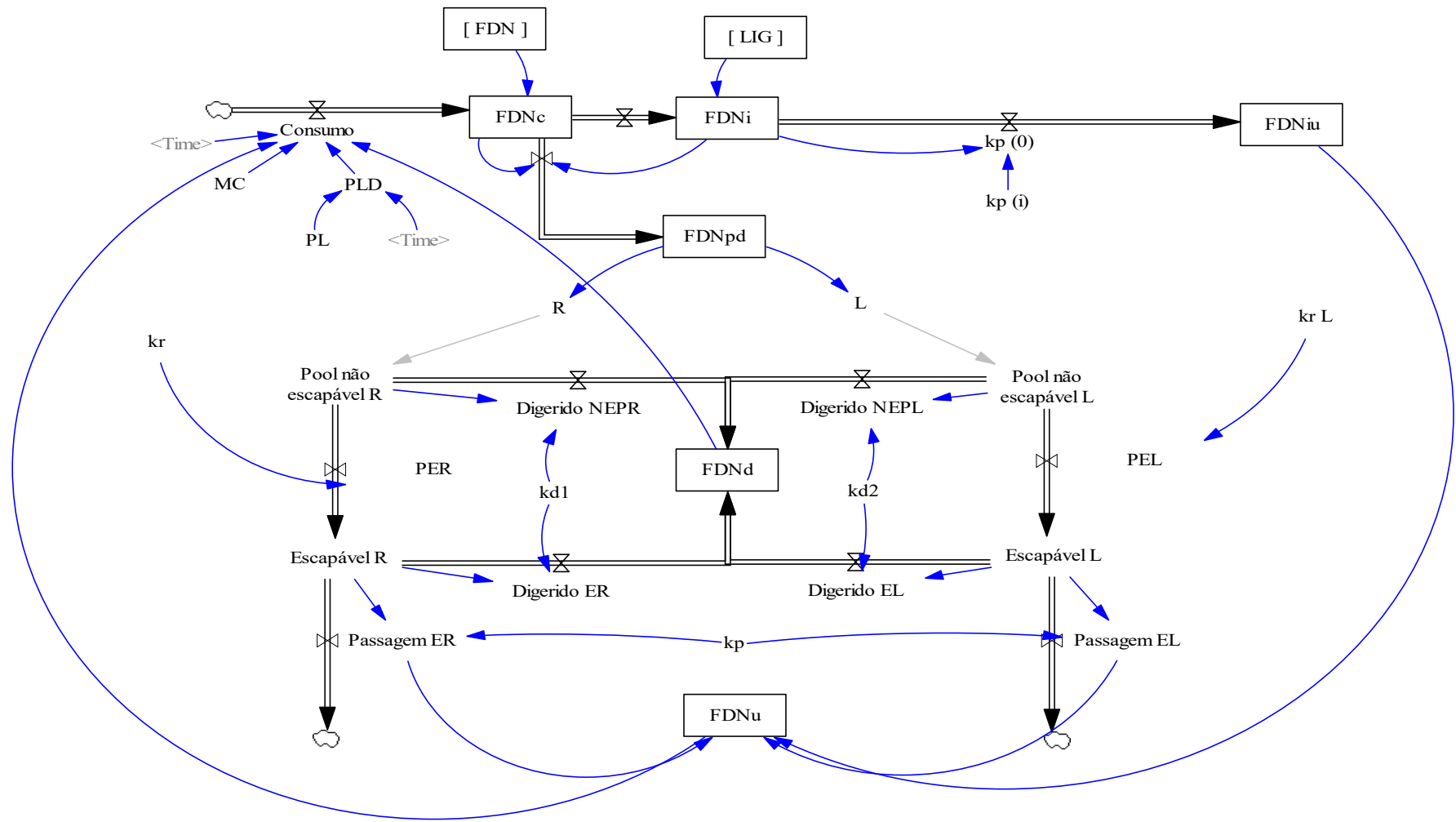


Figura 1: Esquema do primeiro modelo para cinética de digestão e passagem da fibra

O diagrama do modelo estabelece as relações entre as variáveis e a estrutura de *feedback* (Figura 2).



1

2 Figura 2: Diagrama do primeiro modelo e suas relações causais

3 *Segundo modelo de cinética ruminal da fibra*

4 O modelo foi construído similar ao sugerido por Vieira et al. (2008), no qual
5 para estimar os parâmetros de digestão e passagem leva em consideração o tamanho
6 geométrico das partículas do material fibroso que passa pelos compartimentos do trato
7 gastrointestinal.

8 Assim como no modelo anterior, a primeira etapa na modelagem foi determinar
9 as frações da fibra utilizando as equações 1 e 2.

10 Após a definição das frações potencialmente degradável e não degradável da
11 fibra, as variáveis do modelo foram selecionadas (Tabela 3).

12
13 Tabela 3: Descrição das unidades e abreviações das variáveis utilizadas no segundo
14 modelo

Variáveis	Unidade	Descrição
[FDN]	g . kg ⁻¹	Concentração de fibra em detergente neutro na dieta
FDNd	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro degradada
PE	kg . dia ⁻¹	Pool escapável
PNE	kg . dia ⁻¹	Pool não escapável
kd	dia ⁻¹	Taxa fracional de degradação
kp	dia ⁻¹	Taxa de passagem do pool escapável
kr	dia ⁻¹	Taxa de transferência do pool não escapável para o escapável
λ	dia ¹	Constante de preparação da fibra potencialmente degradável
[LIG]	g . kg ⁻¹	Concentração de lignina na dieta
FDNc	kg . dia ⁻¹	Consumo de fibra em detergente neutro
FDNpd	kg . dia ⁻¹	Fibra em detergente neutro potencialmente degradável
FDNpdu	kg . dia ⁻¹	Fibra potencialmente digerível não degrada
FDNu	kg . dia ⁻¹	Total de fibra em detergente neutro não degrada
MC	kg	Massa corporal
PL	kg	Produção de leite
PLD	kg	Produção de leite no dia

15 *Adimensional.

16 Ao determinar as variáveis do modelo, as equações diferenciais para predição da
17 digestibilidade da fibra foram utilizadas (Tabela 4).

18

19 Tabela 4: Equações utilizadas no segundo modelo

Variável	Equação
FDNc	$= \text{Consumo} \times [FDN]$
Tempo lag	$= \lambda * (FDNpd)$
FDNpdPNE	$= FDNpd \times \lambda - (FDNpdPNE \times kd) - (FDNpd \times kr)$
FDNpdPE	$= FDNpdPNE - (FDNPE \times kd) - (FDNpdPE \times kp)$
FDNd	$= FDNpdPNE \times kd + FDNPE \times kd$
FDNi	$= FDNi \times kr + FDNiPE \times kp$
FDNu	$= FDNiu + FDNpdu$

20

21 Para execução das equações diferenciais, partiu-se da premissa dos resultados
 22 encontrados para a taxa de degradação, tempo de preparação (λ), taxa de transferência e
 23 taxa de passagem pelos compartimentos conforme estimado por Vieira et al. (2008) e
 24 Regadas Filho et al. (2014).

25

26 Os principais fluxos e estoques podem ser matematicamente escritos como:

27

$$28 \quad FDNd(t) = \int_{t_0}^t FDNd_{(t_i)} ds$$

29

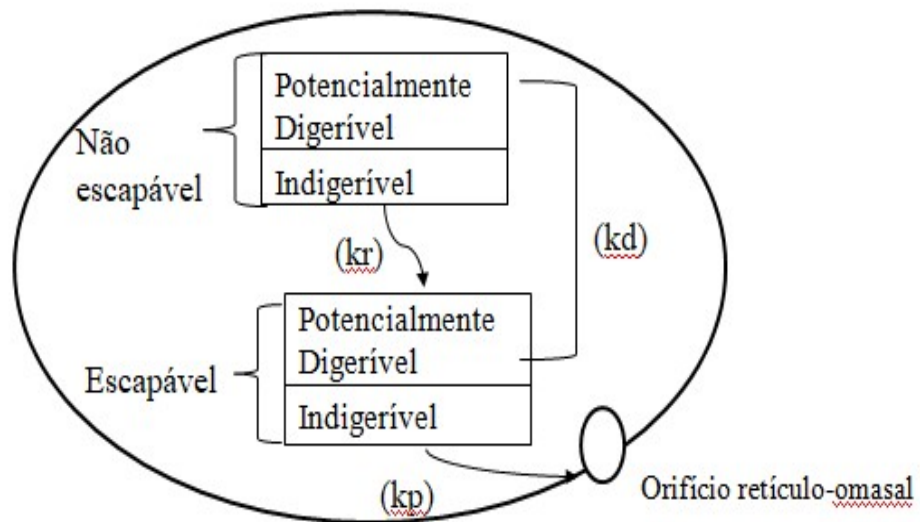
$$30 \quad FDNu(t) = \int_{t_0}^t FDNu_{(t_i)} ds$$

31

32 No qual; o FDNd é a fibra em detergente neutro degradada, FDNu é a fibra em
 33 detergente neutro não degradada, t_0 é o tempo inicial, e t_i é o tempo no momento i .

34 Para exemplificar o fracionamento da fibra e os fluxos o esquema do modelo é
 35 demonstrado na Figura 3.

Rúmen-Retículo



36

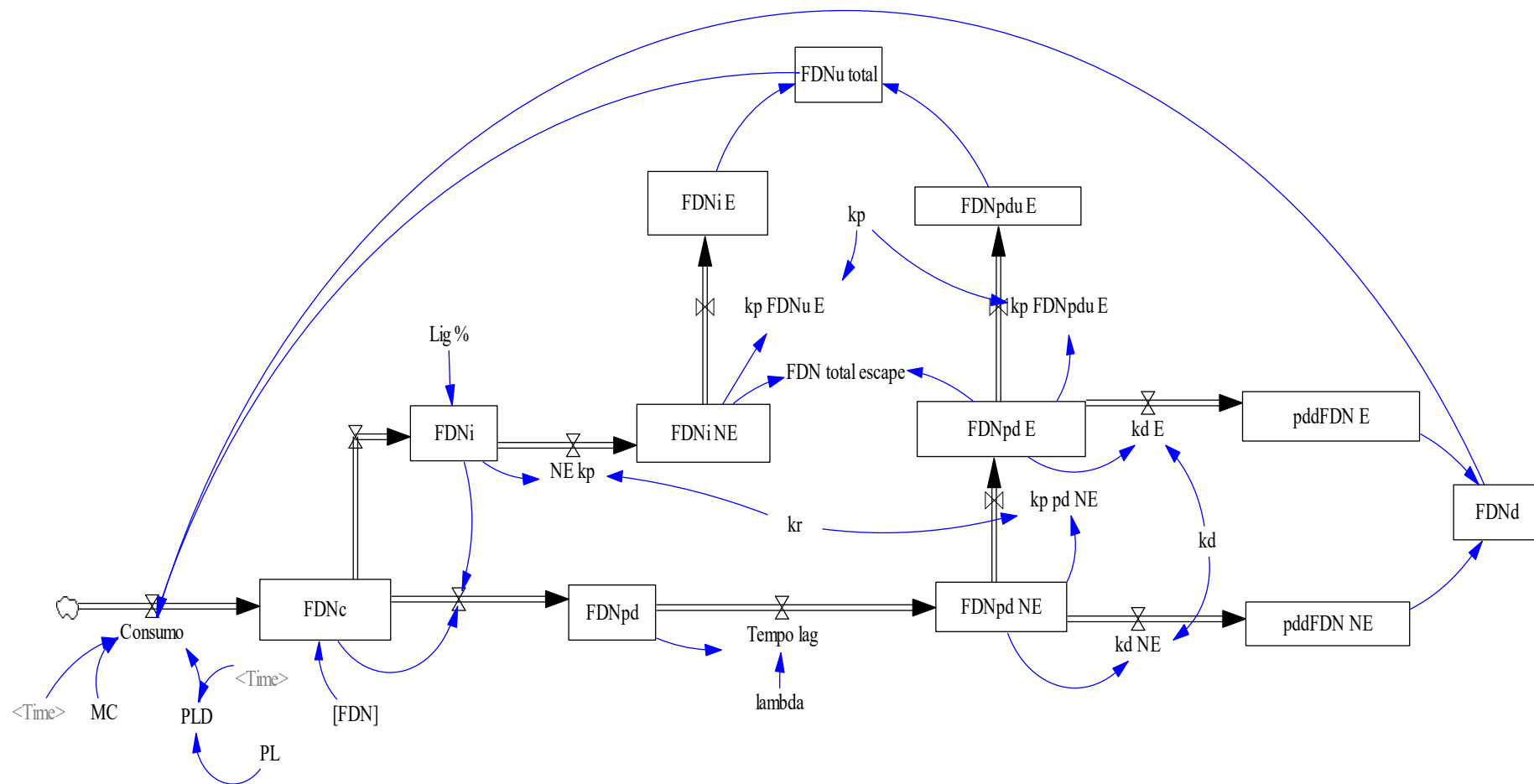
37 Figura 3: Esquema do segundo modelo para cinética de degradação e passagem da fibra

38

39 Para este modelo, uma relação de diagrama entre as variáveis e a estrutura de

40 *feedback* (Figura 4).

41



42

43 Figura 4: Diagrama do segundo modelo e suas relações causais

Sub-modelo de consumo de matéria seca para cabras no terço médio de lactação

O sub-modelo foi construído com base no AFRC (1993), em que a ingestão de matéria seca foi alterada de acordo com a produção de leite, seguindo a equação:

$$CMS = 0,062 * MC^{0,75} + 0,305 * PLD \quad \text{Eq. 3}$$

Em que, CMS é o consumo de matéria seca no dia (kg. dia^{-1}); MC é a massa corporal do animal (kg); PLD é a produção de leite não corrigida no dia (kg) (Figura 5).

Para ajustar a produção de leite diária (PLD) no terço médio da lactação foi utilizada a equação exponencial: $PLD = PL + PL^{-t}$; em que PL é a produção de leite inicial da simulação, e a exponencial representando a queda da produção ao longo do tempo i . Os animais foram considerados não gestantes e após o pico de produção, ocorrido por volta de ± 60 dias de lactação.

O consumo foi condicional ao tempo e à digestão da fibra, representando um mecanismo de retroalimentação. Este modelo foi construído de acordo com a teoria apresentada por Mertens (1994) em que o consumo é regulado pelos efeitos físicos. Logo, o consumo no tempo $t=0$ foi equivalente à equação 3. Para os demais i tempos simulados, o consumo foi equivalente à capacidade de consumo.

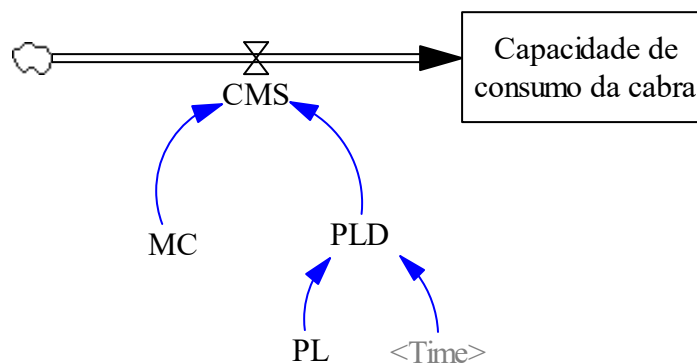


Figura 5: Submodelo de consumo para cabras leiteiras em produção

Procedimentos pré-simulação

Os modelos foram desenvolvidos com base no *software* Vensim PLE. Antes de executar os modelos integrando o submodelo de consumo de matéria seca, a unidade de simulação foi estabelecida em dia, com tempo inicial zero e tempo final de 10 dias de produção de leite após o pico de lactação, ou seja, aos 70 dias de lactação. O método de

integração de Euler foi utilizado considerando um intervalo de tempo de um dia, ou seja, integrando a cada tempo simulado.

Procedimento de simulação

1. Os *inputs* iniciais para o consumo foram: a massa corporal, a produção de leite, a concentração de fibra em detergente neutro e lignina da dieta, além das taxas de degradação e passagem.
2. Sequencialmente, o modelo calculou a quantidade de fibra não degradável e potencialmente degradável que passa pelos compartimentos ruminais.
3. Baseada na quantidade de fibra potencialmente degradável e não degradável, associando as taxas de degradação e passagem, foi calculada a quantidade acumulada por dia do componente fibra em cada compartimento do ambiente ruminal.

Resumo do banco de dados e avaliação do modelo

Uma análise com estudos independentes foi conduzida para avaliar a habilidade dos modelos em prever a digestibilidade da fibra ao longo de um período de produção de leite pós-pico de lactação utilizando: a massa corporal dos animais, a média de produção de leite, a concentração de fibra em detergente neutro e lignina da dieta e os parâmetros de degradação e passagem (Tabela 5; Tabela 6).

Tabela 5: Resumo do banco de dados para o primeiro e segundo modelos

Variável	Média	Mínimo	Máximo
Massa corporal (kg)	52,23	44,33	60,19
Produção de leite (kg. dia ⁻¹)	1,14	0,82	4,18
Fibra em detergente neutro (g. kg ⁻¹)	47,12	27,25	67,00
Lignina (g. kg ⁻¹)	36,85	25	48,7
Taxa de transferência (kr; dia ⁻¹)	0, 86	0, 41	1,31
Taxa de passagem (kp; dia ⁻¹)	2,84	0, 43	5, 25
Taxa de degradação (kd; dia ⁻¹)	1,17	0,16	2,13
Preparo da fibra (λ ; dia ⁻¹)	1,47	0,25	1, 89

O conjunto de dados das taxas fracionais foi retirados de cinco estudos (Huhtanen et al. 2008; Vieira et al. 2008; Vieira et al. 2012; Regadas Filho et al. 2014 e Raffrenato et al. 2019). Os dados dos animais e das

dietas foram retirados de um estudo com cabras leiteiras no terço médio de lactação (Felisberto, 2012), totalizando mensurações individuais de 48 animais.

Tabela 6: Banco de dados usados na simulação dos modelos

Variáveis*			
FDN (%)	Lignina (%)	MC (kg)	PL (kg)
46	2,53	52,23	1,14
52	3	52,23	1,14
60	3,43	52,23	1,14
67	3,9	52,23	1,14

*Felisberto, (2012); MC: Massa corporal; PL: Produção de leite.

A avaliação estatística dos modelos foi realizada pela comparação entre os valores preditos e observados para a digestibilidade total da fibra. Para avaliar exatidão e precisão dos modelos foram utilizados: viés médio (VM) (Eq. 4); erro quadrático médio (EQM) (Eq. 5) e coeficiente de determinação (Eq. 6) (Tedeschi et al., 2006).

$$VM = \sum_{i=0}^n (Y_i - X_i) / n \quad \text{Eq 4.}$$

$$EQM = \sum_{i=0}^n (Y_i - X_i)^2 / n \quad \text{Eq 5.}$$

$$R^2 = \left(\frac{s_f(X_1 \dots X_i)Y_i}{s_y s_f(X_1 \dots X_i)} \right)^2 \quad \text{Eq 6.}$$

Em que; $(X_1 \dots X_i)$ são os valores preditos; n é o tamanho da amostra; Y_i são os valores observados; $s_f(X_1 \dots X_i)Y$ é a covariância entre os valores preditos e os observados; $s_f(X_1 \dots X_i)$ é o desvio dos valores preditos e s_y é o desvio dos valores observados.

Contrastando os modelos de cinética ruminal como ferramenta descritiva

Após a avaliação dos modelos, os dados preditos da cinética de degradação e passagem da fibra, com os dois modelos propostos, foram comparados a fim de identificar pontos de similaridade e quantificar a dissimilaridade.

Os dados contrastados foram: total acumulado de massa fibrosa digerida e média de consumo de matéria seca.

Para quantificar as similaridades e diferenças entre os modelos, foram utilizadas as equações: 4, 5 e 6.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade, de acordo com Sterman (2000) é uma técnica na simulação quantitativa de modelos que foi utilizada para identificar, por meio da alteração dos parâmetros, as variações significativas quanto aos valores numéricos de determinadas variáveis e padrões de comportamento.

Para realização da sensibilidade dos parâmetros de taxa de transferência e taxa de passagem dos modelos, foram utilizados somente os *inputs* de Felisberto (2012) para concentração de 46% de FDN na dieta.

Seguindo as recomendações de Sterman (2000) os *inputs* de taxa de transferência (kr) e taxa de passagem (kp) foram oscilados $\pm 20\%$ do valor utilizado na simulação inicial para verificar as variações significativas quanto aos valores numéricos e padrões de comportamento quanto à digestibilidade da fibra.

A avaliação da sensibilidade com a mudança dos parâmetros foi verificada pela análise gráfica e pela utilização da equação 4, comparando os valores preditos iniciais e os valores após a alteração nos parâmetros.

RESULTADOS

Predição dos modelos para consumo de matéria seca e digestibilidade da fibra

Os *inputs* iniciais para a simulação da cinética ruminal de ambos os modelos são demonstrados na Tabela 7. Os valores dos parâmetros foram ajustados em função da digestibilidade da fibra.

Tabela 7: *Inputs* da cinética ruminal para os modelos de simulação

Modelo	kd	PL	kp	ke	λ
1	0,46	1,14	0,86	0,52	-
2	0,46	1,14	0,86	0,43	0,35

kd: taxa de degradação (dia^{-1}); kr: taxa de transferência para o *pool* escapável (dia^{-1}); kp: taxa de passagem da fração escapável (dia^{-1}); PL: produção de leite na equação (kg. dia^{-1}); λ : tempo de preparação da fibra (dia^{-1}).

Os valores de concentração de fibra na dieta e os dados observados, preditos e viés da simulação para os diferentes modelos de cinética ruminal da fibra são demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8: Valores de *inputs*, observados, preditos e viés da digestibilidade da fibra em detergente neutro

Modelo	[FDN]	Predito	Observado*	Viés
1	46	71,20	67,93	-3,27
1	52	72,04	67,69	-4,35
1	60	73,36	66,88	-6,48
1	67	74,13	67,55	-6,59
2	46	65,35	67,93	2,58
2	52	66,51	67,69	1,18
2	60	68,15	66,88	-1,27
2	67	69,16	67,55	-1,62

*Felisberto (2012). MOD1: $Y = 196,9 - 1,84x$ $R^2 = 0,39$; MOD2: $Y = 226,5 - 2,35x$ $R^2 = 0,39$.

Ao aumentar a concentração de fibra na dieta de cabras leiteiras no terço médio da lactação, para o segundo modelo, ou seja, para taxas de passagens iguais para FDN_{pd} e FDN_i, houve aumento no viés das estimativas de digestibilidade (Tabela 8).

Em relação à quantidade de fibra digerida ao longo de dez dias de simulação, os valores em kg foram crescentes conforme o aumento de fibra na dieta em ambos os modelos (Figura 6, Figura 7).

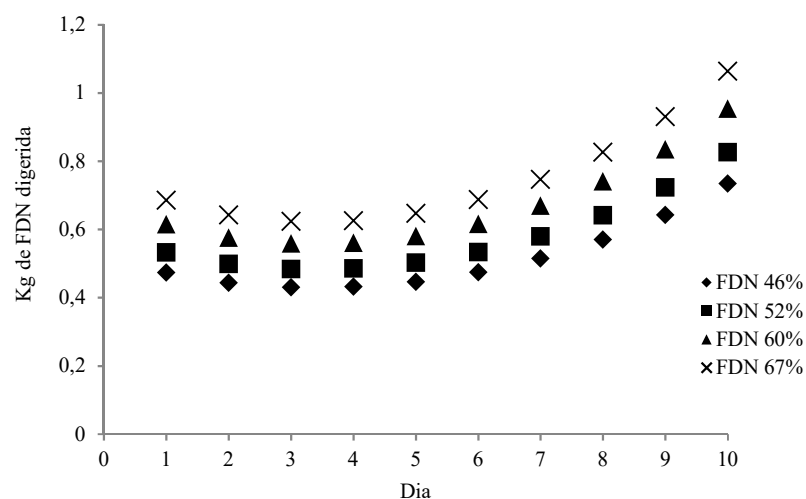


Figura 6: Quantidade de fibra digerida em dez dias de lactação de acordo com o primeiro modelo

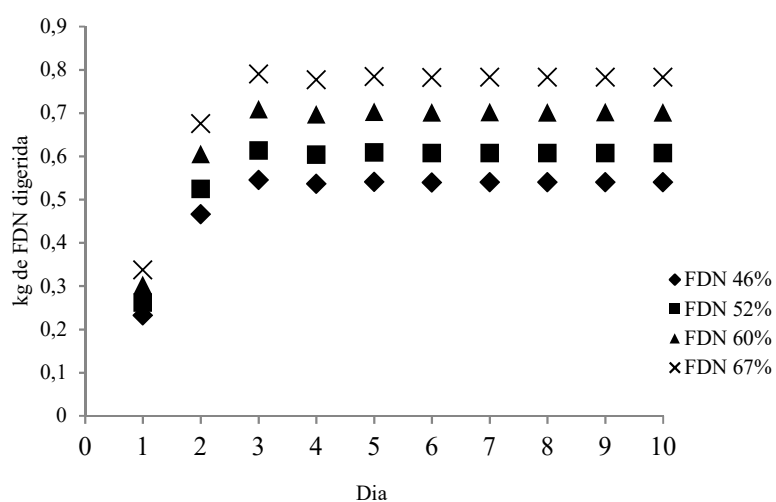


Figura 7: Quantidade de fibra digerida em dez dias de lactação de acordo com o segundo modelo

As comparações entre os valores médios de consumo de matéria seca predito ao longo de dez dias e observados encontram-se na Tabela 9.

Apesar do viés das estimativas, à medida que os valores de fibra em detergente neutro na dieta aumentaram, o consumo de matéria seca diminuiu em ambos os modelos, assim como os valores observados por Felisberto (2012) (Tabela 9).

Tabela 9: Valores de *inputs*, observados, preditos e viés da média de consumo de matéria seca

Modelo	[FDN]	Predito	Observado*	Viés
1	46	1,577	1,691	0,144
1	52	1,551	1,486	-0,064
1	60	1,524	1,212	-0,312
1	67	1,506	1,131	-0,375
2	46	1,673	1,691	0,018
2	52	1,636	1,486	-0,149
2	60	1,598	1,212	-0,386
2	67	1,572	1,131	-0,441

*Felisberto (2012); MOD1: $y = 0,119x + 1,374$; $R^2 = 0,986$; MOD2: $y = 0,170x + 1,384$; $R^2 = 0,986$.

Ambos os modelos subestimaram o consumo de matéria seca na concentração de 46% de FDN na dieta. Por outro lado, superestimaram para as demais concentrações de fibra (Tabela 9).

Contraste dos modelos como ferramenta descritiva

A comparação entre os valores preditos pelo modelo 1 e modelo 2 para consumo de matéria seca e total de fibra digerida estão demonstrados na Tabela 10.

Tabela 10: Comparação entre os valores preditos pelos modelos

Variáveis	MOD 1	MOD 2	Viés	EQM	R ²
Fibra digerida acumulada (kg)	6,29 ± 1,01	6,13 ± 0,98	0,17	0,03	0,99
Consumo de matéria seca (kg)	1,54 ± 0,03	1,62 ± 0,04	-0,12	0,01	0,19

R²: coeficiente de determinação; EQM: erro quadrado médio; Viés = MOD 1 – MOD2; MOD1: taxa de passagem independente para FDNi; MOD2: taxa de passagem igual para FDNpd e FDNi.

Houve similaridade quanto aos valores do acumulado de fibra digerida ao longo de dez dias de simulação. O ponto de dissimilaridade entre os modelos foi para os valores de consumo médio de matéria seca, sendo que o modelo 1 apresentou valores menores de consumo médio de matéria seca em comparação ao modelo 2.

Análise de sensibilidade

Os valores do viés da análise de sensibilidade dos parâmetros de taxa de transferência e passagem em relação aos valores preditos para a digestibilidade da FDN com 46% de FDN na dieta estão demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11: Viés na sensibilidade dos parâmetros de taxa de transferência (kr) e taxa de passagem (kp) sobre a digestibilidade da fibra

	Viés (%)				
	-20	-10	0	10	20
kp					
MOD1	-37,94	-16,49	0,00	12,47	22,30
MOD2	-8,27	-8,41	0,00	-5,91	5,54
kr					
MOD1	-1,75	0,24	0,00	-2,41	-6,03
MOD2	6,69	3,32	0,00	-3,33	-6,73

MOD1: taxa de passagem independente para FDNi; MOD2: taxa de passagem igual para FDNpd e FDNi.

Ao oscilar os valores de kp o MOD1 mostrou-se mais sensível, aumentando o viés nas estimativas em comparação ao MOD2. Para kr o aumento na oscilação dos parâmetros aumentou o viés nas estimativas para ambos os modelos.

Dado o maior viés na oscilação do parâmetro kp, este foi selecionado para análise gráfica. Para o MOD, é possível observar que, apesar da alteração do parâmetro manteve-se o padrão comportamental da quantidade de fibra digerida por dia (Figura 8).

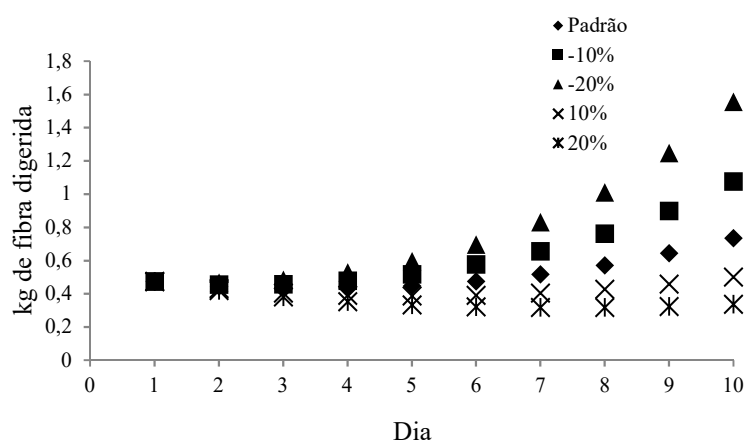


Figura 8: Estimativa da quantidade de fibra digerida no dia, dada oscilação no parâmetro kp do MOD1

Da mesma forma que o modelo anterior, para o MOD2 a oscilação no parâmetro k_p não alterou o padrão sigmoidal da resposta de fibra digerida por dia (Figura 9).

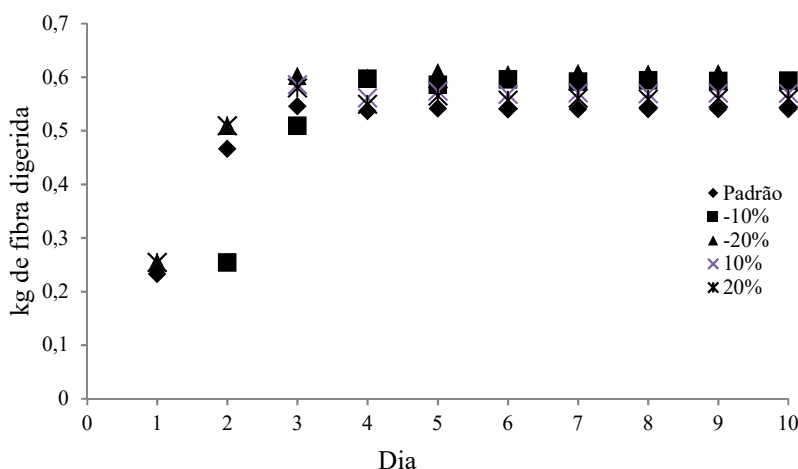


Figura 9: Estimativa da quantidade de fibra digerida no dia, dada oscilação no parâmetro k_p do MOD2

DISCUSSÃO

O primeiro objetivo da modelagem da cinética ruminal da fibra foi de avaliar a capacidade de predição dos modelos quanto à digestibilidade deste componente.

O coeficiente de determinação (R^2) indicando a precisão quanto aos valores de digestibilidade da fibra foi de 0,39 para ambos os modelos. Este coeficiente está abaixo do demonstrado por Illius et al. (1991) de 0,68, com modelo de simulação cinética ruminal da parede celular, avaliando dados para ovinos e bovinos.

A diferença entre a precisão dos modelos (MOD1 e MOD2) apresentados e o proposto por Illius et al. (1991) está relacionada às teorias de regulação de consumo. Os modelos abordados neste estudo foram construídos com base na teoria de regulação física.

A teoria de regulação física do consumo reporta que, o consumo é inversamente relacionado com o enchimento do trato gastrointestinal, representado pela massa de fibras (Campling, 1964).

Já no controle fisiológico, a regulação do consumo é relacionada à concentração de energia na dieta que atenda às exigências nutricionais dos animais de acordo com a categoria (Allen, 2000).

Desta forma, em comparação aos modelos propostos, ao conectar ambas as teorias físicas e fisiológicas, o modelo proposto por Illius et al. (1991) capta a maior variação do consumo, melhorando a predição da digestibilidade, por associar as características da dieta às exigências nutricionais dos animais.

Ainda em relação à precisão dos modelos propostos, Allen (1996) pontua que apesar de a concentração de fibra em detergente neutro ser a característica da dieta pra prever o enchimento do ambiente ruminal, este componente isolado pode ser inadequado, pois além da concentração da fibra é preciso considerar o tamanho da partícula, fragilidade da partícula e extensão de digestão.

Além da heterogeneidade do conteúdo e da forma física da fibra, a concentração e a ligação ou *cross-linking* da lignina, também são fatores determinantes da digestibilidade (Casler, 2001). Relações como, FDN/Lignina ou ponderação da lignina por fatores de correção, visam corrigir estes efeitos. Porém, não foram considerados nestes modelos, podendo também ser responsável pelo na predição viés dos valores de digestibilidade da fibra.

Embora haja viés nos valores preditos e observados para ambos os modelos, o padrão de % de FDN digerida à medida que aumenta a concentração de fibra na dieta foi similar ao observado por Felisberto (2012) que não encontrou diferença na digestibilidade da FDN ao aumentar a concentração de fibra na dieta.

As mudanças no consumo e na digestibilidade da fibra de acordo com Dado & Allen (1994), estão relacionadas com a concentração deste componente na dieta. Dietas com mais de 28% de FDN podem limitar a capacidade ruminal, o consumo e consequentemente afetar a digestibilidade.

No entanto, Branco et al. (2011) utilizando níveis crescente de fibra na dieta para cabras leiteiras, não encontrou significância na digestibilidade da fibra, isto acontece pois, ao se atingir um platô de fibra no *pool* ruminal, assim como apresentado na Figura 7, mesmo aumentando as as concentrações de fibra na dieta, a digestibilidade permanece constante, justificando os resultados preditos pelos modelos.

No que se refere ao consumo de fibra, poucos dados na literatura têm abordado recomendações em relação aos caprinos. Os caprinos por serem classificados como seletores intermediários diferindo dos bovinos (pastejadores) de acordo com Hoffman (1989), tem maior habilidade em selecionar partes dos alimentos com maior digestibilidade. Esta habilidade de seleção leva estes animais a consumirem fibras de

melhor qualidade e, portanto, aumentar a proporção de fibra consumida pelo peso corporal.

A capacidade de seleção das cabras e o aumento da capacidade de consumo de fibra em relação ao peso corporal foi demonstrando por Carvalho et al. (2006) em estudo com níveis crescentes de fibra para cabras leiteiras, em que o consumo de fibra em relação ao peso corporal atingiu até 1,94% para um total de 55,85% de FDN na dieta.

Em relação ao consumo de matéria seca, ambos os modelos obtiveram um alto valor de R^2 (0,98), ou seja, apresentaram alta precisão. No qual, o aumento na concentração de fibra na dieta reduziu o consumo de matéria seca observado e predito. Este mesmo padrão de redução de consumo, ao aumentar a concentração de FDN na dieta, foi encontrado por Fisher et al. (1987) ao simular a cinética de digestão e passagem no trato gastrointestinal.

A redução no consumo acontece, pois o consumo de matéria seca é limitado por fatores físicos, químicos, metabólicos, psicogênicos e neuro-hormonais (Dougherty & Collins, 2003). Portanto, de acordo com van Soest (1994) ao aumentar a concentração de fibra, componente indigerível ou de lenta digestão na dieta, conseqüentemente há aumento do conteúdo de parede celular no trato gastrointestinal dos animais, levando ao enchimento ruminal e redução do consumo de matéria seca.

Após a avaliação, os modelos da cinética ruminal da fibra foram contrastados. O uso da modelagem para contrastar teorias é possível, pois, de acordo France & Kebreab (2007) a modelagem matemática é uma ciência utilizada para descrever ou simular fenômenos, simplificando a realidade e fornecendo um meio de aplicar o conhecimento, expressar a teoria e avançar no entendimento.

O contraste entre os modelos para o total de fibra de digerida foi similar para ambos os modelos, com coeficiente de determinação de 0,99. Os valores próximos de digestibilidade são relacionados à abordagem compartimental do ambiente ruminal, ao estratificar o rumen em *Raft* ou *pool* de partículas não escapáveis e o escape ou o *pool* de partículas capazes de deixar o ambiente ruminal, de acordo com Mertens (1993) os modelos representam matematicamente e biologicamente a cinética de digestão e passagem da fibra no rumen.

Assim como de Van miglen et al. (1991) e Ellis et al. (2005), que demostraram um melhora no ajuste ao dividir as frações da fibra potencialmente digerível, por

representar melhor a complexidade dos tecidos vegetais, aumentar a fração digerida e diminuir a fração não digerida.

Embora as previsões para o total de massa fibrosa digerida sejam similares, na estrutura do MOD1, é fundado nas premissas descritas por Huhtanen et al. (2008) em contrapartida ao MOD2 por Vieira et al. (2008).

Nas premissas abordadas por Vieira et al. (2008) uma das diferenças e a consideração do tempo *lag* ou tempo de preparo, este é computado pelo tempo de colonização microbiana necessária para digestão. A similaridade entre os modelos corrobora com Allen & Mertens (1988) que justificam que o tempo de preparo não tem efeito direto na digestibilidade da fibra.

Outra diferença entre os modelos é a divisão da taxa de degradação: no MOD1 esta taxa assume valores distintos, considerando o *pool* de fibra que transita rápida ou lentamente pelo ambiente ruminal, ao contrário do MOD2.

Ao apresentar alta similaridade entre a massa digerida, a pressuposição de uma única taxa de degradação assumida pelo MOD2 prevalece, pois reduz o número de parâmetros a serem calculados no modelo. Uma única taxa assim com reportado por Blaxter (1956) pode ser considerada uma simplificação. No entanto, parece descrever razoavelmente bem os resultados.

Além das degradação, chama-se atenção para a cinética de passagem da fibra indigerível. Trabalhos como de Firkins et al. (1998) e Allen & Mertens (1988), abordam a necessidade de assumir taxas independentes para fibra não degradável, assim como no MOD1.

No entanto, assumir diferentes taxas de passagem torna-se inconsistente com a teoria da dinâmica ruminal, pois, como reportado por Mertens (2010) considerar a taxa de passagem para a FDNpd menor torna-se inconsistente visto que a FDNi está presente no mesmo tecido vegetal.

Porém, esta diferente taxa de passagem para FDNi não influenciou na digestibilidade, tanto pela proporção da FDNi na dieta, quanto pela divisão das frações da FDNpd no MOD1. Portanto, esses modelos são úteis, pois, os efeitos da divisão das frações da FDNpd podem mascarar a dinâmica da passagem da FDNi.

Por fim, após contrastar os modelos, este estudo propôs avaliar a sensibilidade dos parâmetros de passagem para ambos os modelos. De acordo com Hekimoğlu & Barlas (2010), na simulação os *inputs* assumem premissas baseadas em incertezas. O efeito das incertezas nos *inputs* em relação aos *outputs* é dado pela análise de

sensibilidade, a qual pode demonstrar o impacto do parâmetro no modelo, poupando esforços para estimativas de parâmetros sem importância.

A análise de sensibilidade para os modelos de digestão, absorção e passagem de nutrientes pelo ambiente ruminal já foi abordada por Neal et al. (1992) e Illus et al. (1991) a fim de identificar os padrões e relevância dos parâmetros nestes modelos.

Nos modelos de cinética de digestão e passagem da fibra o viés nas estimativas de digestibilidade da fibra, as oscilações na taxa de passagem do material fibroso é explicada, pois, de acordo com Fox et al. (2004) a digestão ruminal é um processo de competição entre digestão e passagem.

Dada a importância da passagem na digestão ruminal da fibra, Seo et al. (2009) destacam que acuradas predições dos parâmetros de passagem são necessários para melhor predição da digestibilidade da fibra. Portanto, neste estudo, embora os padrões gráficos se mantenham, há aumento do viés das estimativas quando oscilados os parâmetros, demonstrando a necessidade de valores acurados e precisos na para estimativa de passagem.

Embora todas as abstrações, os modelos foram capazes de predizer a digestibilidade, pois, de acordo com Box (1979), todos os modelos estão errados, porém, alguns são úteis. Logo, de acordo com Allen (2011), o rúmen não é uma caixa, mas é bem obscuro e pode ser iluminado por meio da modelagem.

IMPLICAÇÕES NOS MODELOS

Os modelos de simulação dinâmica têm sido capazes de descrever teorias e auxiliar no entendimento de processos biológicos. Os modelos apresentados neste trabalho assumiram pressuposições e valores de outras espécies, vista a escassez de trabalhos com caprinos. Portanto, futuros estudos com esta espécie podem ser aplicados.

Observa-se que há necessidade de obter parâmetros específicos para o tipo de dieta e estágio fisiológico do animal. Ajustes como, fator de correção para lignina ou relações de fibra e lignina também podem ser incluídas, devido à heterogeneidade do conteúdo de fibra.

Ressalta-se que estes modelos também podem ser aprimorados com a representação da exigência nutricional dos animais ao longo do tempo. Porém, é necessário avaliar a complexidade deste processo e o número de parâmetros envolvidos, em especial para a espécie caprina.

CONCLUSÃO

Os modelos predizem de forma similar o consumo de matéria seca e a digestibilidade da fibra em relação aos valores observados. Assumir uma taxa de passagem independente para FDNi não influencia no total de fibra digerida, e subestima o consumo de matéria de cabras no terço médio de lactação. A digestibilidade da fibra é sensível á oscilações no parâmetro de taxa de passagem. Portanto, valores acurados e precisos devem ser considerados para estes parâmetros.

REFERÊNCIAS

- AFRC, 1993. Energy and Protein Requirements of Ruminants. CAB International, Wallingford, UK, pp. 1–122.
- ALLEN, M. S., & MERTENS, D. R. (1988). Evaluating constraints on fiber digestion by rumen microbes. *The Journal of Nutrition*, 118(2), 261-270.
- ALLEN, M. S. (1996). Physical constraints on voluntary intake of forages by ruminants. *Journal of Animal Science*, 74(12), 3063-3075.
- ALLEN, M. S. (2000). Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *Journal of dairy science*, 83(7), 1598-1624.
- ALLEN, M. S. (2011). Mind over models. In *Proc. Tri-State Dairy Nutrition Conf., Dept. Dairy Sci., Ohio State University, Columbus, Ohio* (Vol. 43210).
- BRANCO, R. H., RODRIGUES, M. T., SILVA, M. M. C. D., RODRIGUES, C. A. F., QUEIROZ, A. C. D., & ARAÚJO, F. L. D. (2011). Performance of lactating goats fed diets containing different fiber levels from forage with advanced maturity. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(5), 1061-1071.
- BOX, G.E.P. (1979). Robustness in statistics. Academic Press, London, p. 201.
- CAMPLING, R. C. (1964). Factors affecting the voluntary intake of grass. *Proceedings of the Nutrition Society*, 23(1), 80-88.
- CARVALHO, S., RODRIGUES, M. T., BRANCO, R. H., & RODRIGUES, C. A. F. (2006). Consumo de nutrientes, produção e composição do leite de cabras da raça Alpina alimentadas com dietas contendo diferentes teores de fibra. *Revista brasileira de Zootecnia*, 35(3), 1154-1161.
- CASLER, M. D. (2001). Breeding forage crops for increased nutritional value. *Advances in agronomy*, 71(51-107).

- DADO, R. G., & ALLEN, M. S. (1994). Variation in and relationships among feeding, chewing, and drinking variables for lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 77(1), 132-144.
- DOUGHETY C.T. AND COLLINS M. (2003). Forage utilization. In: Forages: An introduction to Grassland Agriculture, 6th eds Volume I. Iowa state press. pp. 391-414.
- ELLIS, W. C., MAHLOOJI, M., & MATIS, J. H. (2005). Models for estimating parameters of neutral detergent fiber digestion by ruminal microorganisms. *Journal of animal science*, 83(7), 1591-1601.
- FELISBERTO, N.R.O. (2012). Tamanho de particular da forragem em dietas com níveis crescentes de fibra para cabras leiteiras. Tese. Universidade Federal de Viçosa.
- FISHER, D. S., BURNS, J. C., & POND, K. R. (1987). Modeling ad libitum dry matter intake by ruminants as regulated by distension and chemostatic feedbacks. *Journal of Theoretical Biology*, 126(4), 407-418.
- FIRKINS, J. L., ALLEN, M. S., OLDICK, B. S., & ST-PIERRE, N. R. (1998). Modeling ruminal digestibility of carbohydrates and microbial protein flow to the duodenum. *Journal of Dairy Science*, 81(12), 3350-3369.
- FRANCE, J.; KEBREAB, E. (Ed.). *Mathematical modelling in animal nutrition*. Cabi, 2007.
- HEKIMOGLU, MUSTAFA & BARLAS, YAMAN. (2010). Sensitivity Analysis of System Dynamics Models by Behavior Pattern Measures.
- HOFMANN, R. R. (1989). Evolutionary steps of ecophysiological adaptation and diversification of ruminants: a comparative view of their digestive system. *Oecologia*, 78(4), 443-457.
- HUHTANEN, P., AHVENJÄRVI, S., WEISBJERG, M. R., & NØRGAARD, P. (2006). Digestion and passage of fibre in ruminants. In *Ruminant physiology: digestion, metabolism and impact of nutrition on gene expression, immunology and stress* (pp. 87-138). Wageningen Acad. Publ, Wageningen, the Netherlands.
- HUHTANEN, P., SEPPALA, A., OTS, M., AHVENJARVI, S., & RINNE, M. (2008). In vitro gas production profiles to estimate extent and effective first-order rate of neutral detergent fiber digestion in the rumen. *Journal of animal science*, 86(3), 651-659.
- ILLIUS, A. W., & GORDON, I. J. (1991). Prediction of intake and digestion in ruminants by a model of rumen kinetics integrating animal size and plant characteristics. *The Journal of Agricultural Science*, 116(1), 145-157.

- LEEK, B. F.; HARDING, R. H. Sensory nervous receptors in the ruminant stomach and the reflex control of reticulo-ruminal motility. *Digestion and Metabolism in the Ruminant*, p. 60-76, 1975.
- MERTENS, D. R., & ELY, L. O. (1979). A dynamic model of fiber digestion and passage in the ruminant for evaluating forage quality. *Journal of Animal Science*, 49(4), 1085-1095.
- MERTENS, D.R., 1994. Regulation of Forage Intake. In: Fahey Jr. G.C., M. Collins, D.R. Mertens and L.E. Moser (eds.). Forage quality, evaluation, and utilization. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc. and Soil Science Society in America, Inc., Madison, WI, USA, pp. 450–493.
- MERTENS, D. R. (2010, OUTUBRO). NDF and DMI—has anything changed. In *Proceedings of the 2010 Cornell nutrition conference for feed manufacturers', East Syracuse, NY* (pp. 160-174).
- NEAL, H. D. S. C., DIJKSTRA, J., & GILL, M. (1992). Simulation of nutrient digestion, absorption and outflow in the rumen: model evaluation. *The Journal of nutrition*, 122(11), 2257-2272.
- RAFFRENATO, E., & VAN AMBURGH, M. E. (2010, OCTOBER). Development of a mathematical model to predict sizes and rates of digestion of a fast and slow degrading pool and the indigestible NDF fraction. In *IN: Proc. Cornell Nutr. Conf., Syracuse, NY* (pp. 52-65).
- RAFFRENATO, E., NICHOLSON, C. F., & VAN AMBURGH, M. E. (2019). Development of a mathematical model to predict pool sizes and rates of digestion of 2 pools of digestible neutral detergent fiber and an undigested neutral detergent fiber fraction within various forages. *Journal of dairy science*, 102(1), 351-364.
- REGADAS FILHO, J. G. L., TEDESCHI, L. O., CANNAS, A., VIEIRA, R. A. M., & RODRIGUES, M. T. (2014). Using the Small Ruminant Nutrition System to develop and evaluate an alternative approach to estimating the dry matter intake of goats when accounting for ruminal fiber stratification. *Journal of dairy science*, 97(11), 7185-7196.
- STERMAN, J. (2000). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.
- TEDESCHI, L. O. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural systems*, 89(2-3), 225-247.
- VAN MILGEN, J., MURPHY, M. R., & BERGER, L. L. (1991). A compartmental model to analyze ruminal digestion. *Journal of Dairy Science*, 74(8), 2515-2529.

VAN SOEST, P.J. Nutritional ecology of theruminents. Corvallis, Oregon: O & Books, 1982. 373p. VAN SOEST, P.J. *Nutritional ecology of the ruminant*, 2nd ed. Ithaca, NY: Cornell University, 1994. 476p

VIEIRA, R. A. M., TEDESCHI, L. O., & CANNAS, A. (2008). A generalized compartmental model to estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 1. Estimating parameters of digestion. *Journal of Theoretical Biology*, 255(4), 345-356.

VIEIRA, R. A. M., TEDESCHI, L. O., & CANNAS, A. (2008). A generalized compartmental model to estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 2. Integrating digestion and passage. *Journal of Theoretical Biology*, 255(4), 357-368.

APÊNDICE

Os modelos da cinética de degradação e passagem integrando o consumo de matéria seca ao longo de um período do terço médio da lactação de cabras leiteiras podem ser baixados através do link:

<https://drive.google.com/open?id=1f588v-49QrWhzn1IjAi7U8iEp8CxjSBt>

Para a execução do modelo é necessário o *software* Vensim PLE disponível em:

<https://vensim.com/free-download/>

O manual para execução do programa encontra-se disponível em português em:

<https://vensim.com/portuguese-documentation/>