

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIENCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**ESTUDO DA DINÂMICA DA CINÉTICA DE PRODUÇÃO
DE GASES *IN VITRO* PARA DIFERENTES TIPOS DE
ALIMENTOS**

Autor: Dheyne Alves Veira
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Kátia Cylene Guimarães

Rio Verde - GO
Setembro – 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**ESTUDO DA DINÂMICA DA CINÉTICA DE PRODUÇÃO
DE GASES *IN VITRO* PARA DIFERENTES TIPOS DE
ALIMENTOS**

Autor: Dheyne Alves Vieira
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Kátia Cylene Guimarães

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ZOOTECNIA, ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – campus Rio Verde – Área de concentração Zootecnia.

Rio Verde – GO
Setembro – 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

VV658e Vieira, Dheyne
 Estudo da dinâmica da cinética de produção de gases
 in vitro para diferentes tipos de alimentos /
 Dheyne Vieira; orientadora Kátia Cylene Guimarães;
 co-orientador Adriano Jakelaitis. -- Rio Verde, 2018.
 46 p.

 Dissertação (Mestrado em Pós-graduação em Zootecnia)
 -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2018.

 1. AGCC. 2. coproduto. 3. fermentação ruminal. 4.
 fração carboidrato. 5. fração proteína. I. Cylene
 Guimarães, Kátia, orient. II. Jakelaitis, Adriano,
 co-orient. III. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

ESTUDO DA DINÂMICA DA CINÉTICA DE PRODUÇÃO
DE GASES *IN VITRO* PARA DIFERENTES TIPOS DE
ALIMENTOS

Autor: Dheynne Alves Vieira
Orientadora: Kátia Cyrene Guimarães

TITULAÇÃO: Mestre em Zootecnia – Área de concentração Zootecnia
– Zootecnia e Recursos Pesqueiros.

APROVADO em 28 de setembro de 2018.

Francisco Ribeiro de Araujo Neto
Prof. Dr. Francisco Ribeiro de Araujo
Neto
Avaliador externo
IF Goiano/RV

Fabiana T. Santos
Prof.^a Dra. Fabiana Ramos dos Santos
Avaliadora interna
IF Goiano/RV

Kátia Cyrene Guimarães
Prof.^a Dra. Kátia Cyrene Guimarães
Presidente da banca
IF Goiano/RV

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Diogo e Eliene, pelo amor, cuidados, paciência, amizade, apoio e incentivo.

A minha irmã, Iomay, pelo apoio, incentivo e amizade.

A todos familiares pela torcida e apoio.

Aos professores do IF Goiano campus Morrinhos, Andréia Cezário, Wallacy Barbacena e Jefferson Ribeiro, pela confiança, incentivo e amizade.

Aos meus colegas e amigos de residência, Wender, Jose Franklin e Adriano Carvalho pela amizade e companheirismo.

Ao Wender e Eduardo pelo auxílio no período inicial do curso.

A todos meus amigos do laboratório de Nutrição Animal, João Euzébio, Fernanda, Jessyca, Jadineia, Mahara, Gabriel, Maura, Liliane, Maria, Nayane, Isadora, Deibity, Carol, Laura e Carlos.

As minhas amigas Camila e Mariana, que sempre estiveram comigo em qualquer situação.

A minha orientadora, pela oportunidade, amizade, ensinamentos, paciência. Foi um prazer trabalhar contigo.

Ao Francisco, pela amizade, incentivo e conhecimentos transmitidos.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia do IF Goiano-campus Rio Verde, Fabiana, Marco Antônio, Adriano Carvalho, Mariana pelo conhecimento transmitido durante o curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela bolsa de pesquisa.

A todos que contribuíram para que fosse realizada a concretização deste projeto.

Obrigado!

BIOGRAFIA DO AUTOR

Dheyne Alves Vieira, filho de Diogo Alves Rosa e Eliene Arantes Vieira Rosa, nasceu no município de Morrinhos-GO, no dia 24 de julho de 1991. Ingressou no curso de Bacharelado em Agronomia em 2011 pelo Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos, no município de Morrinhos-GO, concluindo a graduação com colação de grau em 2016. Ingressou no segundo semestre de 2016 no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. Em setembro de 2018 submeteu a banca avaliadora sua dissertação, intitulada: Estudo da dinâmica da cinética de produção de gases *in vitro* para diferentes tipos de alimentos.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	VII
INTRODUÇÃO GERAL.....	2
1.REVISÃO DE LITERATURA.....	3
1.1. História da técnica de produção de gases <i>in vitro</i>	3
1.2. Modelos não lineares.....	4
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	5
CAPÍTULO I – Artigo Científico: Animal - The International Journal of Animal Biosciences.....	10
Estudo da dinâmica da cinética de produção de gases <i>in vitro</i> para diferentes tipos de alimentos.....	10
Resumo.....	11
Abstract.....	12
Introdução.....	13
Material e métodos.....	13
Local de estudo e descrição dos alimentos.....	13
Preparo das amostras e determinação da composição química- bromatológica.....	14
Coleta, preparo do inóculo ruminal e incubação.....	15
Modelos não lineares avaliados e critérios de seleção.....	15
Taxa de produção de gases (RG).....	16
Resultados.....	17
Seleção de modelos não lineares.....	17
Perfil de produção de gases.....	17
Taxa de produção de gases (RG).....	18
Discussão.....	18
Seleção de modelos não lineares.....	18
Taxa de produção de gases (RG).....	20
Conclusões.....	21

Referências.....	22
------------------	----

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1 Composição química-bromatológica dos alimentos e coprodutos estudados.....	25
Tabela 2 Fração carboidrato (g/kg de CT) dos alimentos e coprodutos estudados.....	26
Tabela 3 Fração proteína (g/kg de PB) dos alimentos e coprodutos estudados.....	27
Tabela 4 Valores de critérios de seleção para cada modelo matemático para ajustar a cinética de produção de gases dos alimentos e coprodutos estudados.....	28
Tabela 5 Valores de critérios de seleção para cada modelo matemático para ajustar a cinética de produção de gases dos alimentos e coprodutos estudados.....	29
Tabela 6 Parâmetros estimados pelos modelos avaliados para ajuste da cinética de produção de gases dos alimentos e coprodutos estudados.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<p>Figura 1 Curvas observadas (•••), predita pelo modelo France (- - -) e pelo modelo com melhor (—) ajuste à cinética de produção de gás (mL) para sabugo de milho (A), palha de milho (B), coproduto milho doce (C), casca do grão de soja (D), casca de café (E) casca de abóbora (F), casca de pequi (G) e silagem de coproduto de milho doce (H).....</p>	31
<p>Figura 2 Curvas observadas (•••), predita pelo modelo France (- - -) e pelo modelo com melhor (—) ajuste à cinética de produção de gás (mL) para polpa cítrica (A), cDDGS (B), feijão extrusado (C), farelo de soja (D), farelo de milho (E), farelo de trigo (F), silagem de milho (G) e silagem de Tifton 85 (H).....</p>	32
<p>Figura 3 Taxa de produção de gás mL/h (—) e ponto de inflexão PI (----) para sabugo de milho (A), palha de milho (B), coproduto de milho doce (C), casca do grão de soja (D), casca de café (E) casca de abóbora (F), casca de pequi (G) e silagem de coproduto de milho doce (H).....</p>	33
<p>Figura 4 Taxa de produção de gás mL/h (—) e ponto de inflexão (----) para polpa cítrica (A), cDDGS (B), feijão extrusado (C), farelo de soja (D), farelo de milho (E), farelo de trigo (F), silagem de milho (G) e silagem de Tifton 85 (H)..</p>	34

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

A - fração solúvel da proteína (compostos não proteicos – NNP)

A+B1 - fração prontamente degradável do carboidrato total

AGCC - ácido graxo de cadeia curta

B - constante de integração

B2 - fração potencialmente degradável do carboidrato total

BIC - Critério Bayesiano de Informação

C - fração indegradável do carboidrato total

CF - carboidratos fibrosos

CNCPS - Cornell Net Carbohydrate and Protein System

DL - Modelo Logístico Bicompartimental

ED - Distância euclidiana

EE - extrato etéreo

FDA - fibra insolúvel em detergente ácido

FDN - fibra insolúvel em detergente neutro

FDN_{cp} - fibra insolúvel em detergente neutro corrigida para proteína e cinzas

g - grama

K - taxa específica de produção de gases

k₁ - taxa específica de produção de gases da fração A+B1 do Sistema CNCPS

k₂ - taxa específica de produção de gases da fração B2 do Sistema CNCPS

kg - quilograma

LIG - lignina

mg - miligrama

mL - mililitro

MM - matéria mineral

MN - matéria natural

MO - matéria orgânica

NDT - nutrientes digestíveis totais

NIDA - nitrogênio insolúvel em detergente ácido

NIDN - nitrogênio insolúvel em detergente neutro

NNP - nitrogênio não proteico

PB - proteína bruta

PB1 - fração rapidamente degradável da proteína bruta

PB2 - fração de degradação intermediária da proteína bruta

PB3 - fração de degradação lenta da proteína bruta

PBC - fração indegradável da proteína bruta

PI - ponto de inflexão

R² - Coeficiente de determinação

t - tempo

TBF - tampão borato fosfato

TCA - ácido tricloroacético

V - volume total de gases produzidos no tempo

V_f - produção de gases assintótica

V_{f1} - produção de gases oriunda da fração A+B1 do carboidrato

V_{f2} - produção de gases oriunda da fração B2 do carboidrato

λ - tempo de colonização

INTRODUÇÃO GERAL

A técnica *in vitro* de produção de gases consiste em medir a produção de gases oriunda do processo de fermentação ruminal de uma amostra de alimento (Theodorou et al., 1994). A produção de gases é obtida então, por duas vias, a primeira sendo oriunda da degradação do alimento (via direta) e a segunda, oriunda da reação dos ácidos graxos de cadeia curta com o tampão (via indireta) presente no meio de incubação (Pell & Schofield, 1993). Neste sentido, a produção de gases é indicativo da fermentação do alimento por microrganismos ruminais, apresentando como produtos finais: energia para o manutenção e crescimento microbiano, ácidos graxos de cadeia curta, dióxido de carbono e metano (Theodorou et al., 1994). Trabalhos pioneiros como o desenvolvido por Menke et al. (1979) tinham como principal foco apresentar o volume total gases acumulados até o período final de incubação (24 horas).

Com o desenvolvimento da técnica com aplicação de vasos fermentadores e posteriormente, com emprego de transdutores de pressão, a produção de gases passou a ganhar maior precisão nas medições e com isso possibilitou a aplicação de modelos matemáticos a fim de determinar a cinética de fermentação dos alimentos (Theodorou et al., 1994). Assim, modelos matemáticos exponenciais como de Orskov et al., 1980 que já era amplamente empregado em estudo de degradação *in situ* passaram a ser utilizados para interpretar dados obtidos com a técnica de produção de gases.

Posteriormente, a automatização do processo permitiu aferir grande número de pontos durante o período de incubação do alimento, dificultando o ajuste de modelos exponenciais aos dados obtidos (Farias et al., 2011). Com isso, modelos que ajustavam a formas sigmóides foram propostos e desenvolvidos para ajustar a cinética de produção de gases (France et al., 1993; Schofield et al., 1994; Groot et al., 1996).

France et al. (1993) desenvolveram uma equação Mitscherlich generalizada que apresentava forma flexível ajustando bem a produção de gases. E desde a sua proposta o modelo tem sido empregado como padrão. Outros modelos foram propostos posteriormente como os modelos uni e multicompartimentais (Schofield et al., 1994; Groot et al., 1996). Entretanto, surge o questionamento sobre qual o melhor modelo para ajuste da técnica de produção de gases ou qual o modelo matemático mais adequado. France et al. (2005) relataram que um único modelo não deve ser empregado

para o ajuste da produção de gases, sendo necessário realizar o estudo para cada tipo de substrato.

Portanto, a seleção de modelos deve ser um passo fundamental no estudo da cinética de produção de gases *in vitro*.

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. História da técnica de produção de gases *in vitro*

A técnica *in vitro* de produção de gases foi desenvolvida para prever a fermentação de alimentos para ruminantes (Akinfemi et al., 2009). Uma amostra de alimento é incubada em líquido ruminal tamponado e o gás produzido acumulado no espaço vazio é aferido em intervalos de tempo sendo, portanto, um indicador indireto da cinética de fermentação (Pell & Schofield, 1993). Após a incubação, os microrganismos ruminais aderem às partículas do alimento e iniciam o processo de degradação, produzindo gás, ácidos graxos de cadeia curta e biomassa microbiana (Krishnamoorthy et al., 2005).

O desenvolvimento da técnica teve início na década de 1950 (McBee, 1953), nas décadas seguintes foram realizadas adaptações de manômetro de deslocamento de água para medir o gás produzido (Hungate, 1966; Trei et al., 1970). Posteriormente, Beuvink et al. (1992) automatizou a técnica de deslocamento de água. Concomitantemente, em meados da década de 1970 foi desenvolvida uma vertente da técnica acumulativa de produção de gases *in vitro* por meio do deslocamento do êmbolo de uma seringa de vidro (Czerkawski & Breckenridge, 1975), esta sendo a base para a técnica “Hohenheim Gas Test” (Menke et al., 1979). O protocolo desenvolvido por Menke et al. (1979) tinha como objetivo principal determinar a fermentabilidade final do alimento (24 horas), sendo essa incorporada ao sistema de avaliação de alimentos nacional da Alemanha.

Ainda na década de 1970 a técnica sofreu adaptações, em que as incubações e medições eram realizadas em vasos selados e o gás produzido no espaço vazio era medido usando um transdutor de pressão (Wilkins, 1974). A princípio essa medição era realizada por meio manual, sendo realizadas poucas leituras durante o processo de incubação (Theodorou et al., 1994). Posteriormente, foram desenvolvidos sistemas semiautomáticos e automáticos para a medição do gás acumulado no espaço livre dos

frascos de incubação (Pell & Schofield, 1993; Cone et al., 1996; Mauricio et al., 1999).

A produção de gases vem sendo bastante utilizada e estudada em sistemas de avaliação de alimentos para ruminantes. Vários trabalhos foram desenvolvidos a fim de melhorar e elucidar fatores relacionados à metodologia empregada, como: efeito da ventilação dos vasos durante a incubação (Pell et al., 1998; Theodorou et al., 1998), pressão máxima (7 psi) no interior do vaso fermentador para que não ocorra perturbação do sistema (Pell et al., 1998), mudanças de pressão atmosférica (Schofield, 2000), agitação do meio (Rymer et al., 1998) e diferenças entre aparelhos de medição (Rymer et al., 2005).

Outros trabalhos focaram em fatores relacionados aos alimentos como: tamanho de amostra (Schoner, 1981; Theodorou et al., 1994), preparo da amostra (Sanderson et al., 1997; Lowman et al., 2002) e hidratação da amostra (Rymer et al., 1999); fatores relacionados ao inóculo como: o tipo de inóculo (Aderinboye et al., 2016), volume do inóculo (Pell & Schofield, 1993; Wood et al., 1998), preparo do inóculo (Senshu et al., 1980), emprego de bancos (Williams, 2000), condição dos animais doadores (Cone, 1998; Williams, 2000), dieta do animal doador (Trei et al., 1970; Mertens et al., 1998), tempo da coleta à incubação (Nagadi et al., 1999; Payne et al., 2002) e conteúdo de N no meio de incubação (Debersaques et al., 1998).

Além de fatores relacionados a interpretação dos dados obtidos e sua aplicação, desenvolvimento e seleção de modelos não lineares (France et al., 1993; Schofield et al., 1994; Groot et al., 1996; Dhanoa et al., 2000; France et al., 2005) e a ligação com a produção animal (Menke et al., 1979; France et al., 2000; Wang et al., 2013; 2016).

1.2. Modelos não lineares

Os modelos matemáticos não lineares proporcionam a interpretação simples dos fenômenos estudados por meio de poucos parâmetros com interpretação biológica (Emiliano et al., 2014). Neste sentido, a produção de gases quando ajustada com um modelo matemático não linear fornecem informações, como: a taxa de produção de gases, tempo de colonização e a produção de gases assintótica.

No início do desenvolvimento da técnica, os modelos exponenciais apresentavam bom ajuste (Orskov et al., 1980; pois, as medições eram realizadas de forma manual em intervalos longos e apresentavam baixa precisão (seringa e vasos) (Menke et al., 1979; Czerkawski & Breckenridge, 1975; Wilkins, 1974). Com a

automatização da técnica modelos exponenciais passaram a apresentar baixo ajuste aos dados de produção de gases, já que, as curvas de produção de gases passaram a apresentar uma forma sigmoide, sendo distintas em três fases: fase inicial (baixa produção), fase exponencial (rápida produção) e uma fase assintótica (lenta ou inexistente) (Farias et al., 2011).

Com isso vários modelos foram propostos e desenvolvidos para melhor ajustar aos dados de produção de gases, como: Mitscherlich generalizada (France et al., 1993), logístico mono e bicompartimentado (Schofield et al., 1994), modelo multifásico (Groot et al., 1996) e Gompertz (Laird, 1965). Todos estes modelos vêm sendo empregados em vários trabalhos de forma única (Santo et al., 2017; Kang et al., 2018; Mengistu et al., 2017; Deutschmann et al., 2017; Elberg et al., 2018; Budel et al., 2017; Salem et al., 2017. Nascimento et al., 2018) ou conjuntamente em trabalhos que avaliam qual o melhor modelo a ser utilizado (Wang et al., 2016; Dhanoa et al., 2000)

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aderinboye, R. Y., Akinlolu, A. O., Adeleke, M. A., Najeem, G. O., Ojo, V. O. A., Isah, O. A., & Babayemi, O. J. (2016). In vitro gas production and dry matter degradation of four browse leaves using cattle, sheep and goat inocula. **Slov. J. Anim. Sci**, 49(1), 32.
- Akinfemi, A., Adesanya, A. O., & Aya, V. E. (2009). Use of an in vitro gas production technique to evaluate some Nigerian feedstuffs. **American-Eurasian Journal of Scientific Research**, 4(4), 240-245.
- Beuvink, J. M. W., Spoelstra, S. F., & Hogendorp, R. J. (1992). An automated method for measuring time-course of gas production of feed-stuffs incubated with buffered rumen fluid. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, 40, 401-401.
- Budel, J. C.C., Ramos, A. F O., Araújo, G. S., Lima, A. C. S., Martorano, L. G., Nahúm, B. S., ... & Lourenço Junior, J. B. (2017). Fermentation kinetics and ruminal parameters of animals fed diets containing Brazil nut cake inclusion levels. **Semina: Ciências Agrárias**, 38.
- Cone, J. W., van Gelder, A. H., Visscher, G. J., & Oudshoorn, L. (1996). Influence of rumen fluid and substrate concentration on fermentation kinetics measured with a

- fully automated time related gas production apparatus. **Animal Feed Science and Technology**, *61*(1-4), 113-128.
- Czerkawski, J. W., & Breckenridge, G. (1975). New inhibitors of methane production by rumen micro-organisms. Development and testing of inhibitors in vitro. **British Journal of Nutrition**, *34*(3), 429-446.
- Debersaques, F. M., Williams, B. A., & Tamminga, S. (1998). Effect of nitrogen source of fermentation characteristics of citrus pulp. **Animal Science**, 174-174.
- Deutschmann, K., Phatsara, C., Sorachakula, C., Vearasilp, T., Phunphiphat, W., Cherdthong, A., ... & Südekum, K. H. (2017). In vitro gas production and in vivo nutrient digestibility and growth performance of Thai indigenous cattle fed fresh and conserved pangola grass. **Italian Journal of Animal Science**, *16*, 521-529.
- Dhanao, M. S., Lopez, S., Dijkstra, J., Davies, D. R., Sanderson, R., Williams, B. A., ... & France, J. (2000). Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed in vitro: comparison of models. **British Journal of Nutrition**, *83*(2), 131-142.
- Elberg, K., Steuer, P., Habermann, U., Lenz, J., Nelles, M., & Südekum, K. H. (2018). A small scale in vitro system for high throughput gas production analysis—A comparison with the Hohenheim gas test. **Animal Feed Science and Technology**, *241*, 8-14.
- Farias, L. N., Vasconcelos, V. R., Carvalho, F. F. R., & Sarmiento, J. L. R. (2011). Avaliação dos modelos logístico bicompartimental e de Gompertz na estimativa da dinâmica de fermentação ruminal in vitro do farelo e da torta de babaçu (*Orbignya martiana*). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, *63*(1), 136-142.
- France, J., Dhanao, M. S., Theodorou, M. K., Lister, S. J., Davies, D. R., & Isac, D. (1993). A Model To Interpret Gas Accumulation Profiles Associated With. **J. Theor. Biol**, *163*, 99-1.
- France, J., Dijkstra, J., Dhanao, M. S., Lopez, S., & Bannink, A. (2000). Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed in vitro: derivation of models and other mathematical considerations. **British Journal of Nutrition**, *83*(2), 143-150.
- France, J., Lopez, S., Kebreab, E., Bannink, A., Dhanao, M. S., & Dijkstra, J. (2005). A general compartmental model for interpreting gas production profiles. **Animal Feed Science and Technology**, *123*, 473-485.

- Groot, J. C., Cone, J. W., Williams, B. A., Debersaques, F. M., & Lantinga, E. A. (1996). Multiphasic analysis of gas production kinetics for in vitro fermentation of ruminant feeds. **Animal Feed Science and Technology**, *64*(1), 77-89.
- Hungate, R.E., 1966. The Rumen and its Microbes. Academic Press, New York, NY, USA.
- Kang, S., & Wanapat, M. (2018). Rumen-buffering capacity using dietary sources and in vitro gas fermentation. **Animal Production Science**, *58*, 862-870.
- Krishnamoorthy, U., Rymer, C. & Robinson P. H. (2005). The in vitro gas production technique: limitations and opportunities. **Animal Feed Science and Technology**, *123*, 1-7.
- Laird, A. K. (1965). Dynamics of relative growth. **Growth**, *29*, 249-263.
- Lowman, R. S., Theodorou, M. K., & Cuddeford, D. (2002). The effect of sample processing on gas production profiles obtained using the pressure transducer technique. **Animal Feed Science and Technology**, *97*(3-4), 221-237.
- Mauricio, R. M., Mould, F. L., Dhanoa, M. S., Owen, E., Channa, K. S., & Theodorou, M. K. (1999). A semi-automated in vitro gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. **Animal Feed Science and Technology**, *79*(4), 321-330.
- McBee, R. H. (1953). A Manometric Method for the Evaluation of the Microbial Activity of the Rumen with an Application to the Utilization of Cellulose and Hemicelluloses. **Applied Microbiology**, *1*(2), 106.
- Mengistu, G., Hendriks, W. H., & Pellikaan, W. F. (2018). In vitro methane and gas production with inocula from cows and goats fed an identical diet. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, *98*, 1332-1338.
- Menke, K. H., Raab, L., Salewski, A., Steingass, H., Fritz, D., & Schneider, W. (1979). The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor in vitro. **The Journal of Agricultural Science**, *93*(1), 217-222.
- Mertens, D. R., & Weimer, P. (1998). Method for measuring gas production kinetics. **BSAP Occasional Publication**, *22*, 209-211.
- Nagadi, S., Herrero, M., & Jessop, N. S. (1999). Effect of frequency of ovine ruminal sampling on microbial activity and substrate fermentation. **Proc. Br. Soc. Anim. Sci.** *154*.
- Nascimento, T. V. C., Bezerra, L. R., Menezes, D. R., Lucena, A. R. F., Queiroz, M. Á., Trajano, J. S., & Oliveira, R. L. (2018). Condensed tannin-amended cassava silage:

- fermentation characteristics, degradation kinetics and in-vitro gas production with rumen liquor. **The Journal of Agricultural Science**, 156, 83-91.
- Ørskov, E. R., De b Hovell, F. D., & Mould, F. (1980). The use of the nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. **Tropical Animal Production**, 5: 195-213.
- Payne, J. S., Hamersley, A. R., Milligan, J. C., & Huntington, J. A. (2002). The affect of rumen fluid collection time on its fermentative capacity and the stability of rumen conditions in sheep fed a constant diet. In **Proc. Br. Soc. Anim. Sci** (Vol. 165).
- Pell, A. N., & Schofield, P. (1993). Computerized monitoring of gas production to measure forage digestion in vitro. **Journal of Dairy Science**, 76(4), 1063-1073.
- Pell, A. N., Pitt, R. E., Doane, P. H., & Schofield, P. (1998). The development, use and application of the gas production technique at Cornell University, USA. **BSAP Occasional Publication**, 22, 45-54.
- Rymer, C., Huntington, J. A., & Givens, D. I. (1999). Effects of inoculum preparation method and concentration, method of inoculation and pre-soaking the substrate on the gas production profile of high temperature dried grass. **Animal Feed Science and Technology**, 78(3-4), 199-213.
- Rymer, C., Moss, A. R., Deaville, E. R., & Givens, D. I. (1998). Factors affecting the amount of indirect gas produced by the in vitro gas production technique. **BSAP Occasional Publication**, 22, 89-91.
- Rymer, C., Williams, B. A., Brooks, A. E., Davies, D. R., & Givens, D. I. (2005). Inter-laboratory variation of in vitro cumulative gas production profiles of feeds using manual and automated methods. **Animal Feed Science and Technology**, 123, 225-241.
- Salem, A. Z., Valdez, N. T., Olafadehan, O. A., Elghandour, M. M., Pliego, A. B., & Coyote, R. L. (2017). Influence of Aguamiel (*Agave atrovirens*) as a Natural Feed Additive on Cecal Fermentation Kinetics of Some Forage Species in Horse Feeding. **Journal of Equine Veterinary Science**, 48, 103-112.
- Sanderson, R., Lister, S. J., Sargeant, A., & Dhanoa, M. S. (1997). Effect of particle size on in vitro fermentation of silages differing in dry matter content. **Animal Science**, 197-197.
- Santo, A. X., Silva, L. D., Lançanova, J. A., Ribeiro, E. L., Mizubuti, I. Y., Fortaleza, A. P., ... & Júnior, M. (2017). Fracionamento de carboidratos e proteínas, cinética de degradação ruminal in vitro pela técnica de produção de gás, de rações

- suplementares contendo torta de girassol. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec**, 69, 234-242.
- Schofield, P. (2000). Gas production methods. **Farm Animal Metabolism and Nutrition**, 209-232.
- Schofield, P., Pitt, R. E., & Pell, A. N. (1994). Kinetics of fiber digestion from in vitro gas production. **Journal of Animal Science**, 72(11), 2980-2991.
- Schöner, F. J. (1981). Schätzung des energetischen Futterwertes von Milchleistungsfuttern (Ergänzungsfutter für Milchkühe) unter besonderer Berücksichtigung des hohenheimer Futterwerttestes.
- Senshu, T., Nakamura, K., Sawa, A., Miura, H., & Matsumoto, T. (1980). Inoculum for in vitro rumen fermentation and composition of volatile fatty acids. **Journal of Dairy Science**, 63(2), 305-312.
- Theodorou, M. K., Lowman, R. S., Davies, Z. S., Cuddeford, D., & Owen, E. (1998). Principles of techniques that rely on gas measurement in ruminant nutrition. **BSAP Occasional Publication**, 22, 55-63.
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., & France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. **Animal Feed Science and Technology**, 48(3-4), 185-197.
- Trei, J., Hale, W. H., & Theurer, B. (1970). Effect of grain processing on in vitro gas production. **Journal of Animal Science**, 30(5), 825-831.
- Wang, M., Sun, X. Z., Tang, S. X., Tan, Z. L., & Pacheco, D. (2013). Deriving fractional rate of degradation of logistic-exponential (LE) model to evaluate early in vitro fermentation. **Animal**, 7(6), 920-929.
- Wang, M., Wang, R., Tang, S. X., Tan, Z. L., Zhou, C. S., Han, X. F., & Kang, J. H. (2016). Comparisons of manual and automated incubation systems: Effects of venting procedures on in vitro ruminal fermentation. **Livestock Science**, 184, 41-45.
- Wilkins, J. R. (1974). Pressure transducer method for measuring gas production by microorganisms. **Applied Microbiology**, 27(1), 135-140.
- Wood, C. D., Murray, A. H., Moss, A. R., & Givens, D. I. (1998). Use of the gas production technique to investigate responses of supplementing low quality forages. 1. In vitro interactions. **BSAP Occasional Publication**, 22, 92-94.

CAPÍTULO I

Artigo redigido segundo as normas da revista científica: *Animal - The International Journal of Animal Biosciences*

ESTUDO DA DINÂMICA DA CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE GASES *IN VITRO* PARA DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTOS

Resumo

Objetivou-se avaliar diferentes modelos matemáticos sobre a cinética de produção de gases *in vitro* de 16 alimentos para ruminantes e apresentar a taxa fracionária de produção de gases. As amostras foram incubadas em quadruplicata e as leituras de temperatura e pressão do sistema de produção de gases foram realizadas a cada quinze minutos por 72 horas. Os modelos avaliados foram: Bertalanffy, Brody, Gompertz, Logístico Modificado, Logístico Bicompartimental (DL) e France. Foram usados como critérios de seleção: o coeficiente de determinação (R^2), o Critério de Informação Bayesiano (BIC) e a distância euclidiana (ED). O modelo France não foi eficaz em ajustar a cinética de produção de gases dos alimentos apresentando os menores R^2 e as maiores ED. O DL ajustou melhor a para os alimentos palha de milho, casca do grão de soja, casca de café, casca de pequi, polpa cítrica, feijão extrusado, cDDGS, silagem de milho, silagem de tifton 85, farelo de milho, farelo de trigo e farelo de soja apresentando os maiores R^2 e o menores valores de BIC e ED. O modelo Bertalanffy apresentou melhor ajuste para o alimento sabugo de milho. O modelo Brody para os alimentos coproduto de milho doce e silagem, apresentando os maiores valores de R^2 e os menores de BIC e ED. O modelo Gompertz ajustou melhor a produção de gases da casca de abóbora com maiores valores de R^2 e menores de BIC e ED. Os alimentos apresentarem diferentes padrões de fermentação ruminal, mas todos atingiram a taxa máxima de produção de gases até o período de 10 horas, com exceção da palha de milho. A casca de abóbora apresentou a maior taxa máxima de produção de gases 8,35 mL/h após 2,30 horas de incubação e o sabugo apresentou a menor taxa máxima de produção de gases 1,56 mL/h após 7,18 horas de incubação. O modelo DL apresentou o melhor equilíbrio entre a qualidade de ajuste e a complexidade para a maioria dos alimentos. A taxa de produção de gases pode ser uma ferramenta estratégica na formulação de dietas.

Palavras-chave: AGCC, coproduto, fermentação ruminal, fração carboidrato, fração proteína

Abstract

The objective was to evaluate different mathematical models on *in vitro* gas production kinetics of 16 feed for ruminants and present the gas production fractional rate. The samples were incubated in quadruplicate and the temperature and pressure readings of the gas production system were performed every fifteen minutes for 72 hours. The models evaluated were: Bertalanffy, Brody, Gompertz, Logistic, Dual-pool Logistic (DL) and France. The selection criteria were: the determination coefficient (R^2), Bayesian Information Criterion (BIC) and Euclidean distance (ED). The France model was not effective in adjusting the feed gas production kinetics presenting the lowest R^2 and the highest ED and BIC. The DL adjusted better for corn, soybean hull, coffee bark, pequi bark, citrus pulp, extruded beans, cDDGS, corn silage, tifton 85 silage, corn meal, wheat bran and soybean meal presenting the highest R^2 and the lowest values of BIC and ED. The Bertalanffy model presented the best fit for maize corn. The Brody model was the best for the sweet corn feed products and silage, presenting the highest values of R^2 and the lowest values of BIC and ED. The Gompertz model adjusted better the gas production of pumpkin peel with higher values of R^2 and lower values of BIC and ED. Feeds presented different ruminal fermentation patterns, but all reached the maximum gas production rate up to 10 hours, except for corn straw. The pumpkin bark presented the highest maximum gas production rate 8.35 mL/h after 2.30 hours of incubation and the corn had the lowest maximum gas production rate 1.56 mL/h after 7.18 hours of incubation. The DL model presented the best balance between fit quality and complexity for most feeds. The gas production rate can be a strategic tool in the formulation of diets.

Keywords: SCFA, coproduct, ruminal fermentation, carbohydrate fraction, protein

Introdução

A eficiência de produção de ruminantes é dependente do balanceamento adequado das dietas formuladas. O sincronismo entre a digestão de carboidratos e proteínas implica no maior aproveitamento do valor nutritivo dos alimentos e conseqüentemente no melhor desempenho animal (Cole *et al.*, 2008).

A técnica *in vitro* de produção de gases proporciona informações sobre a composição e a taxa de fermentação dos constituintes solúveis e estruturais dos alimentos (Krishnamoorthy *et al.*, 2005). Todavia, a interpretação destas informações é obtida através de modelos matemáticos que são uma versão simplificada de um fenômeno estudado (Emiliano *et al.*, 2014).

Devido à variabilidade de modelos existentes para descrição de um mesmo fenômeno e a variação de composição entre os alimentos não é prudente indicar um único modelo, sendo necessário realizar seleção do modelo adequado para cada alimento (France *et al.*, 2005). Entretanto, a seleção de modelos e a taxa de produção de gases não são empregadas na maioria dos estudos (Ciriaco *et al.*, 2016; Elghandour *et al.*, 2016; Foiklang *et al.*, 2016; Ki *et al.*, 2017).

Portanto, objetivou-se com o presente estudo avaliar diferentes modelos matemáticos sobre o ajuste da cinética de produção de gases *in vitro* e apresentar as taxas fracionária de produção de gases de alimentos e coprodutos utilizados em dietas para ruminantes.

Material e métodos

Este estudo foi aprovado pelo comitê do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, Rio Verde, Goiás, Brasil sob o protocolo n.5375240516.

Local de estudo e descrição dos alimentos

O estudo foi conduzido no Laboratório de Nutrição Animal do Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, Rio Verde, Goiás, Brasil. Foi realizada a avaliação da cinética de produção de gases de 16 alimentos: casca de abóbora (composta pelo epicarpo e mesocarpo externo do fruto híbrido *Cucurbita maxima* x *Cucurbita moschata*), casca de café (obtida por via seca, composta pelo epicarpo, mesocarpo e endocarpo do grão de café), casca de pequi (composta pelo epicarpo e mesocarpo externo do fruto de *Caryocar brasiliense*), casca do grão de soja, coproduto de milho doce (oriundo do

processamento do milho conserva: composto de palha, sabugo, grãos de milho), corn Distiller's Dried Grains with Solubles (cDDGS), farelo de milho, farelo de soja, farelo de trigo, feijão extrusado, palha de milho, polpa cítrica, sabugo de milho, silagem de coproduto de milho doce, silagem de milho e silagem de tifton 85.

Preparo das amostras e determinação da composição química-bromatológica

Os alimentos com baixo teor de matéria seca foram previamente secos em estufa de ventilação forçada a 55°C até peso constante. As amostras foram moídas a 1 mm em moinho de facas tipo Willey. Determinou-se os teores de matéria seca (MS; Método 934.01; AOC, 1990); matéria mineral (MM; Método 924.05; AOAC, 1990); proteína bruta, quantificada indiretamente pela determinação do N total empregando a técnica de micro-Kjeldahl com fator de conversão de 6,25 (PB; Método 920.87; AOAC, 1990); extrato etéreo (EE; Método 920.85; AOAC, 1990); fibra insolúvel em detergente neutro (FDN; Mertens, 2002); fibra insolúvel em detergente ácido (FDA; Método 973.18; AOAC, 1990); lignina ácida (LIG) por Van Soest and Robertson (1985).

Foram determinadas as frações dos carboidratos de acordo com Sniffen *et al.* (1992), pela equação:

$$CT = 1000 - (PB + EE + MM), \quad (1)$$

$$A + B1 = 1000 - (PB + EE + FDNcp + MM), \quad (2)$$

$$B2 = FDNcp - C, \quad (3)$$

$$C = LIG * 2,4 \quad (4)$$

em que, *PB*: proteína bruta (g/kg MS); *EE*: extrato etéreo (g/kg MS); *MM*: matéria mineral (g/kg MS); *FDNcp*: fibra insolúvel em detergente neutro corrigida para cinza e proteína (g/kg MS); *LIG*: conteúdo lignina (g/kg MS); 2,4: fator de associação da lignina com carboidratos; *CT*: carboidratos totais (g/kg MS); *A+B1*: fração prontamente fermentável no rúmen e taxa intermediária de degradação dos carboidratos (g/kg CT); *B2*: carboidratos lentamente e potencialmente degradáveis (g/kg CT); *C*: fração indegradável dos carboidratos (g/kg CT).

A fração A da proteína que consiste no conteúdo de compostos não proteicos (NNP) foi obtida pela diferença entre o N total e o N residual obtido após o tratamento das amostras com ácido tricloro acético (TCA) (Licitra *et al.*, 1996). A fração B1 composta da proteína rapidamente degradável no rúmen foi quantificada pela diferença entre o N total e a soma do N insolúvel em TCA e N insolúvel em solução tampão borato-fosfato (TBF). A fração B2 composta pela proteína de degradação intermediária

foi obtida pela diferença entre a fração insolúvel em TBF e o NIDN. A fração B3 composta pela proteína de degradação lenta foi obtida pela diferença entre o NIDN e NIDA, e a fração C composta pela proteína indegradável e indigerível foi considerada o conteúdo de NIDA da amostra (Licitra *et al.*, 1996).

A composição química-bromatológica dos alimentos estudados estão apresentados na tabela 1, fração carboidrato (Tabela 2) e proteína (Tabela 3).

Coleta, preparo do inóculo ruminal e incubação

O inóculo ruminal foi colhido de dois bovinos mestiços, adultos, canulados no rúmen e mantidos a pasto (*Brachiaria decumbens*) recebendo 1,5 kg de ração por dia (Níveis de garantia da ração: Umidade, 120,00 g/kg; Proteína bruta, 185,00 g/kg; Extrato etéreo, 25,00 g/kg; Matéria fibrosa, 80,00 g/kg; Matéria mineral, 70,00 g/kg; Cálcio, 10,00 g/kg; Fósforo, 6,50 g/kg e Nutrientes Digestíveis Totais, 740,00 g/kg). Os inóculos obtidos dos animais (1:1 para fração líquida e sólida, com base no volume) foram homogeneizados e posteriormente filtrados em quatro camadas de tecido (constituindo um pool), sempre purgado com CO₂ e mantido a temperatura de 39°C. O inóculo ruminal foi colhido sempre no período da manhã (09h) e o intervalo da coleta a incubação ocorreu em período máximo de 15 minutos.

Foram incubadas 500 mg de cada alimento em quadruplicata em frascos contendo 120 mL de solução tampão (100 e 20 mL solução A e B, respectivamente; Tilley e Terry, 1993) e 30 mL de inóculo ruminal mantidos a 39°C em banho-maria (Theodorou *et al.*, 1994; Mauricio *et al.*, 1999). Dois frascos sem alimento foram incubados por replicação para realizar a correção do volume de gás oriundo da fermentação. As leituras de pressão e temperatura foram realizadas em intervalos de quinze minutos por 72 horas (4.320 pontos por alimento por replicação) utilizando módulos de digestão automáticos AnkomRF Gas Production System[®]. Os módulos de digestão foram configurados para manter uma pressão máxima de 7 psi no espaço vazio dos frascos (Theodorou *et al.*, 1994).

Modelos não lineares avaliados e critérios de seleção

Os modelos avaliados para ajuste da cinética de produção de gases foram:

$$\text{Bertalanffy (Bertalanffy, 1957), } V(t) = Vf [(1 - b \exp(-kt))^3 + \varepsilon, \quad (5)$$

$$\text{Brody (Brody, 1945), } V(t) = Vf [1 - b \exp(-kt)] + \varepsilon, \quad (6)$$

$$\text{France (France et al., 1993), } V(t) = Vf \{1 - \exp[-b(t - \lambda) - c(\sqrt{t} - \sqrt{\lambda})]\} + \varepsilon,$$

(7)

$$\text{Gompertz (Laird, 1965), } V(t) = Vf \exp[-b \exp(-kt)] + \varepsilon, \quad (8)$$

$$\text{Logístico (Schofield et al., 1994), } V(t) = Vf / [1 + \exp[2 - 4k(t - \lambda)]] + \varepsilon, \quad (9)$$

Logístico Bicompartimental (Schofield et al., 1994); ,

$$V(t) = \{ Vf1 / [1 + \exp[2 - 4k1(t - \lambda)]] \} + \{ Vf2 / [1 + \exp[2 - 4k2(t - \lambda)]] \} + \varepsilon, \quad (10)$$

em que, $V(t)$: volume acumulado (mL) no tempo t ; Vf : volume total de gases produzido (mL); $Vf1$: volume de gases produzido pela degradação da fração A+B1 do Sistema de CNCPS (CNF); $Vf2$: volume de gases produzido pela degradação da fração B2 do Sistema de CNCPS (CF); k : taxa específica de produção de gases; $k1$: taxa específica de produção de gases pela degradação da fração A+B1 (CNF); $k2$: taxa específica de produção de gases pela degradação da fração B2 (CF); t : tempo de fermentação; λ : fase de latência; b e c : parâmetros de forma, sem interpretação biológica; \exp : exponencial; ε : erro experimental associado a cada observação.

Os modelos matemáticos foram submetidos aos seguintes critérios de seleção o Coeficiente de determinação (R^2) que propõe a associação entre a variável dependente sobre a independente (maior valor indica o melhor ajuste); a distância euclidiana (ED), sendo uma medida de dissimilaridade (menor valor indica o melhor ajuste) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC), é um critério que maximiza a probabilidade de se identificar o modelo verdadeiro dentre os analisados (menor valor indica o melhor ajuste) , definidos como:

$$R^2 = 1 - (SQR/SQT), \quad (11)$$

$$ED = \sqrt{[(x_1 - y_1)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2]}, \quad (12)$$

$$BIC = 2 \ln(L) + p \ln(n), \quad (13)$$

em que, SQR : soma de quadrado do resíduo; SQT : soma de quadro total; x_1 : valor observado de x na primeira observação; y_1 : valor predito para y para x_1 ; x_n : valor observado de x na n observação; y_n : valor predito para y na n observação; L : função de verossimilhança; n : número de observações; e p : número de parâmetros ajustados.

Taxa de produção de gases

Após a seleção do modelo com melhor ajuste para cada alimento estudado, procedeu-se a determinação da taxa fracionária de produção de gases obtida pela derivação dos modelos matemáticos (dy/dt), sendo:

$$\text{Bertalanffy, } RG_{(t)} = 3Vfbk \exp\{-kt\} [1 - b \exp(-kt)]^2 ;,$$

(14)

$$\text{Brody, } RG_{(t)} = Vf b k \exp(-kt) \quad (15)$$

$$\text{France, } RG_{(t)} = \{[(b+c/2\sqrt{t})\exp(-b(t-\lambda))-c(\sqrt{t-\lambda})] / [1-\exp(-b(t-\lambda)-c(\sqrt{t-\lambda}))]\}, \quad (16)$$

$$\text{Gompertz, } RG_{(t)} = bky\exp(-kt), \quad (17)$$

$$\text{Logístico, } RG_{(t)} = \{Vf[\exp(2-4k(t-\lambda))(4*k)]/y^2\}, e \quad (18)$$

Logístico Bicompartimental,

$$RG_{(t)} = Vf1(\exp(2-4k1(t-\lambda))(4k1))/(1+\exp(2-4k1(t-\lambda)))^2 + Vf2(\exp(2-4k2(t-\lambda))(4k2))/... \\ (1+\exp(2-4k2(t-\lambda)))^2, \quad (19)$$

em que, $RG_{(t)}$: taxa de produção de gases no tempo (t); y: função do modelo respectivo, equações: 5, 6, 7, 8, 9 e 10 citadas acima. Foi determinado o ponto de inflexão (PI) em que, x_i : é o intervalo de tempo à taxa de produção de gases passa de crescente para decrescente; e y_i : é a taxa máxima de produção de gases.

Os ajustes dos modelos matemáticos não lineares foram realizados por meio da função nls do software R Development Core Team (2016) utilizando o algoritmo de iteração Gauss-Newton. E a determinação do ponto de inflexão das curvas de produção de gases foi realizada por meio de programação.

Resultados

Seleção de modelos não lineares

Todos os modelos apresentaram coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,92, com exceção do modelo France (Tabela 4 e 5). O mesmo apresentou as maiores distâncias euclidianas (ED) e os valores do Critério de Informação Bayesiano (BIC) sendo o menos eficaz em ajustar a cinética de produção de gases.

O modelo Logístico Bicompartimental (DL) foi mais eficaz em ajustar a cinética de produção de gases dos alimentos avaliados, com exceção do sabugo de milho (Bertalanffy), coproduto de milho doce (Brody), silagem coproduto de milho doce (Brody) e casca de abóbora (Gompertz) (Tabela 4 e 5).

Perfil de produção de gases

Os alimentos sabugo de milho, casca do grão de soja, coproduto de milho doce, silagem de coproduto de milho doce, casca de abóbora, polpa cítrica, feijão extrusado, cDDGS, farelo de soja, farelo de trigo, silagem de milho e silagem de tifton 85 apresentaram uma fase lag curta variando de 0,06 a 2,44 horas. Entretanto, alimentos como a palha de

milho, casca de café, casca de pequi e farelo de milho apresentaram fase lag longa variando de 5,21 a 6,22 h de incubação (Tabela 6).

Houve maior volume de produção de gases oriundos da degradação da fração A+B1 do Sistema CNCPS (Vf_1) para os alimentos feijão extrusado, farelo de milho, farelo de trigo, silagem de milho, palha de milho, casca de café e casca de pequi em relação aos alimentos cDDGS, polpa cítrica, farelo de soja, silagem de tifton e casca do grão de soja que apresentaram maior volume produzido pela degradação da fração B2 do Sistema CNCPS (Vf_2). O feijão extrusado e a silagem de tifton 85 apresentam o maior e o menor de Vf_1 , respectivamente. E, a polpa cítrica e a casca de café apresentam o maior e menor de Vf_2 , respectivamente (Tabela 6).

O maior volume de produção de gases ($V = Vf_1 + Vf_2$) oriundo da degradação dos carboidratos foi observado para a polpa cítrica e o menor para a casca de café (Tabela 6).

A taxa específica de produção de gases da fração A+B1 do Sistema CNCPS (k_1) variou de 0,07 a 0,68 sendo a maior taxa observada para a polpa cítrica e a menor para a silagem de milho. O cDDGS apresentou a menor taxa específica de produção de gases da fração B2 do Sistema CNCPS (k_2), enquanto a polpa cítrica apresentou a maior. A casca de abóbora apresentou a maior taxa específica de produção de gases (k) e o coproduto de milho doce a menor (Tabela 6).

Taxa de produção de gases (RG)

Todos os alimentos estudados atingiram a taxa máxima de produção de gases (RG) com menos de 10 horas de incubação, com exceção da palha de milho (Figura 3 e 4). A máxima RG foi observada para a polpa cítrica e a menor para o sabugo de milho. Os alimentos: casca de abóbora, casca de pequi, farelo de milho, farelo de trigo, feijão extrusado e polpa cítrica apresentaram rápido acréscimo na RG no período inicial da incubação atingindo rapidamente o ponto de inflexão (PI).

O coproduto de milho doce e a silagem do mesmo apresentaram maiores RG no momento da incubação ($t=0$) atingindo o PI e posteriormente a mesma decresceu com o avanço no período de avaliação (Figura 1 C e H). O farelo de soja e a silagem de tifton apresentaram moderado acréscimo na RG no período inicial de incubação até atingir o PI e posteriormente houve redução com o passar do tempo (Figura 2 D e H).

A casca de café, casca do grão de soja, cDDGS, palha de milho, sabugo de milho e a silagem de milho apresentaram baixa RG e período maior de incubação para atingir o valor máximo da mesma, coincidente com o PI (Figura 3 e 4).

Discussão

Seleção de modelos não lineares

A análise gráfica das curvas, BIC e a ED foram os critérios determinantes para a seleção do modelo com melhor ajuste, pois, a maioria dos modelos apresentaram R^2 similares para cada alimento (Tabela 4 e 5; Figura 1 e 2).

O modelo France apresenta baixa capacidade de ajustar-se ao ponto inicial da cinética de produção de gases em alguns alimentos, por superestimar fortemente essa fase. A menor capacidade de ajuste do modelo de France aos dados avaliados no estudo, também foram descritos por outros autores (Calabrò *et al.*, 2005), mesmo sendo considerado um modelo flexível, uma vez que propõe que a produção de gases é diretamente proporcional à taxa de degradação dos alimentos variando em função do tempo de incubação e colonização (France *et al.*, 1993; Dhanoa *et al.*, 2000).

Um ponto importante de discussão é a baixa precisão do critério R^2 em predizer o ajuste do modelo aos dados observado. Verificando altos valores para modelos que apresentam baixo ajuste (Modelo France; Figura 1 e 2). Fato este também reportado por Spiess e Neumeyer (2010) que verificaram que R^2 é um critério de baixa predição sobre a real associação entre dados observados e preditos por modelos não lineares. Portanto, o R^2 fornece apenas uma associação linearizada do comportamento entre a curva observada e a predita e não permite predizer a distância com precisão entre as duas curvas quando se emprega a modelagem não linear.

O modelo Gompertz assume que a taxa específica de produção de gases é proporcional à massa microbiana e que essa é fruto da concentração de substrato digestível. Todavia, a taxa fracional reduz exponencialmente ao longo do tempo de incubação devido ao esgotamento do substrato pela degradação microbiana (Schofield *et al.*, 1994). A seleção do modelo de Gompertz para a casca de abóbora (Figura 1 F), possivelmente é resultante da rápida colonização dos microrganismos ruminais, tendo como consequência elevada produção de gases no período inicial (Figura 3 F). Este argumento é corroborado por Ware e Power (2017) que relatam a baixa eficiência do modelo Gompertz em ajustar substratos com inibição da produção de gases no período inicial de incubação. Fato esse, que devido a sua origem em curvas de crescimento,

geralmente são caracterizadas por iniciarem com valores acima de zero (Tjørve e Tjørve, 2017).

O modelo Brody pressupõe que a taxa específica de produção de gases é proporcional à quantidade de substrato e independente da massa microbiana sendo caracterizado por crescimento exponencial simples (Schofield *et al.*, 1994). Neste sentido, o modelo se torna hábil em ajustar a cinética de produção de gases após o ponto de inflexão ou substratos em que apresentam um período inicial imperceptível, como os alimentos analisados coproduto de milho doce e silagem do mesmo (Figura 1 C e H).

O modelo Bertalanffy assim como o modelo Brody, assume uma cinética de primeira ordem, mas apresenta ponto de inflexão fixo a aproximadamente 30% do volume assintótico de produção de gases (Teleken *et al.*, 2017). Deste modo, o modelo apresenta melhor ajuste para substratos com uma fase inicial de produção gases discretos (sabugo de milho; Figura 1 A), já que o ponto de inflexão fixo reduz à flexibilidade do ajuste a forma sigmoide.

O modelo DL apresenta melhor ajuste para a maioria dos alimentos avaliados (Tabela 4 e 5) por propor a fermentação fracionada dos carboidratos do alimento e que cada fração tem uma taxa específica de produção de gases, admitindo que a fermentação do substrato ocorre de forma heterogênea (Doane *et al.*, 1997). Neste sentido, os modelos multicompartimentais apresentam maior qualidade de ajuste que os modelos baseados na cinética de primeira ordem (Schofield 1994; Groot *et al.*, 1996). Lutakome *et al.* (2017) verificaram que o modelo multicompartimental apresentou o melhor ajuste a produção de gases de quatro dietas experimentais. Entretanto, o que possivelmente influenciou a seleção de outros modelos e não a do modelo DL, para alguns alimentos avaliados, é oriundo da penalização BIC pelo maior número de parâmetros que este modelo possui em relação aos demais (Chakrabarti e Ghosh 2011).

Taxa de produção de gases (RG)

A taxa de produção de gases (RG) permite a avaliação dos alimentos por meio da fermentação de carboidratos solúveis, potencialmente fermentáveis e indegradáveis no rúmen.

No período inicial de incubação, a RG apresenta-se alta referindo à fermentação carboidratos solúveis e pequena parte da fração potencialmente degradável (Figura 3 e 4; Cone *et al.*, 1997). Há neste período maior desenvolvimento de bactérias que consomem açúcares solúveis, amido e pectina tendo como produto ácidos graxos de

cadeia curta (AGCC) e massa microbiana (Russell *et al.*, 1992). Posteriormente, após atingir o ponto de inflexão (PI) há redução da taxa de produção de gases relacionada à fermentação da fração potencialmente degradável dos carboidratos. Em alguns alimentos nota-se um leve acréscimo na RG após o PI, caracterizando o surgimento de um segundo PI (fato evidente para o alimento polpa cítrica; Figura 4 A).

Neste período, há maior desenvolvimento de bactérias que consomem carboidratos fibrosos (celulose e hemicelulose), essas bactérias apresentam crescimento mais lento (Russell *et al.*, 1992). Após esse período, a RG decresce aos valores próximos a zero devido ao esgotamento da fração potencialmente degradada do alimento a cada fração do tempo, ficando apenas a fração não degradada (por exemplo, alimento casca de abóbora, Figura 3 F; Cone *et al.*, 1997).

Contudo o emprego da RG sugere a produção de proteína microbiana e de ácidos graxos de cadeia curta (AGCC) produzidos durante a degradação do alimento. Uma vez que a RG é oriunda da degradação do alimento pelos microrganismos ruminais apresentando como produtos finais: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), acetato, propionato, butirato e massa microbiana (Blummel e Orskov, 1993). Noek e Russel (1988) relataram que a taxa de fermentação é proporcional à taxa de crescimento microbiano e que substratos rapidamente fermentados produzem mais massa microbiana.

Neste sentido, dentre os alimentos avaliados pode-se notar diferentes padrões de oferta de energia e proteína microbiana (Figura 3 e 4). Entretanto, há variação quanto à quantidade e a velocidade desta oferta, já que a matéria fermentada em AGCC e massa microbiana não são constantes, variando em proporção de acordo com o substrato fermentado (Hespell e Bryant, 1979). Zhao *et al.* (2015) reportaram que a fermentação ruminal da pectina em relação ao amido produziu mais acetato, proteína microbiana e menos propionato quando o N degradável no rúmen era suficiente.

Com base nas discussões acima, a casca de abóbora, farelo de milho, farelo de trigo, feijão extrusado e polpa cítrica garantem aporte rápido e em grande quantidade de energia para manutenção e síntese de massa microbiana logo após a alimentação. A silagem de tifton, silagem de coproduto de milho doce, coproduto de milho doce e o farelo de soja com aporte intermediário, e os demais alimentos com baixo ou constante aporte energético e proteico (Figura 3 e 4).

Portanto, a RG possivelmente pode ser empregada como ferramenta de auxílio na avaliação de alimentos com a finalidade de gerar informações para o

aperfeiçoamento da produção de AGCC e proteína microbiana (combinação de alimentos), garantindo o melhor desempenho animal. Uma vez que o período para atingir PI representa a maior proporção de carboidratos não fibrosos fermentados da dieta que são a principal fonte de energia para produção animal, fornecendo 30 a 45% da energia da dieta com base na matéria seca (Hall *et al.*, 2010).

Conclusões

O modelo Logístico Bicompartimental é indicado para estudo da cinética de produção de gases *in vitro* para a maioria dos alimentos estudados. Contudo, a seleção de modelos apresenta como passo fundamental para a técnica de produção gases. A taxa de produção de gases pode ser uma ferramenta estratégica na formulação de dietas, porém mais estudos são necessários para avaliar o seu emprego com diferentes dietas e sua ligação com o desempenho animal.

Referências

- AOAC, 1990. Official Methods of Analysis, (15th edn.). Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- Blümmel M, Steingard H and Becker K 1997. The relationship between *in vitro* gas production, *in vitro* microbial biomass yield and ¹⁵N incorporation and its implications for the prediction of voluntary feed intake of roughages. *British Journal of Nutrition*, 77, 911-921.
- Brody S 1945. Bioenergetics and growth: with special reference to the efficiency complex of domestic animals. New York: Hafner, 1023 p.
- Calabrò S, Lopez S, Piccolo V, Dijkstra J, Dhanoa MS and France J 2005. Comparative analysis of gas production profiles obtained with buffalo and sheep ruminal fluid as the source of inoculum. *Animal Feed Science and Technology*, 123, 51-65.
- Chakrabarti A and Ghosh JK 2011. AIC, BIC, and recent advances in model selection. *Handbook of the Philosophy of Science*, 7, 583-605.
- Cole NA and Todd RW 2008. Opportunities to enhance performance and efficiency through nutrient synchrony in concentrate-fed ruminants. *Journal of Animal Science*, 86, E318-E333.
- Cone JW, Van Gelder AH and Driehuis F 1997. Description of gas production profiles with a three-phasic model. *Animal Feed Science and Technology*, 66, 31-45.
- Dhanoa MS, Lopez S, Dijkstra J, Davies DR, Sanderson R, Williams BA, Sileshi Z and

- France J 2000. Estimating the extent of degradation of ruminant feeds from a description of their gas production profiles observed in vitro: comparison of models. *British Journal of Nutrition*, 83, 131-142.
- Doane PH, Pell AN and Schofield P 1997. The effect of preservation method on the neutral detergent soluble fraction of forages. *Journal of Animal Science*, 75, 1140-1148.
- Emiliano PC, Vivanco MJF and Menezes FS 2014. Information criteria: How do they behave in different models?. *Computational Statistics & Data Analysis*, 69, 141-153.
- France J, Dhanoa MS, Theodorou MK, Lister SJ, Davies DR and Isac D 1993. A model to interpret gas accumulation profiles associated with in vitro degradation of ruminant feeds. *Journal of Theoretical Biology*, 163, 99-111.
- France J, Lopez S, Kebreab E, Bannink A, Dhanoa MS and Dijkstra J 2005. A general compartmental model for interpreting gas production profiles. *Animal Feed Science and Technology*, 123, 473-485.
- Groot JC, Cone JW, Williams BA, Debersaques FM and Lantinga EA 1996. Multiphasic analysis of gas production kinetics for in vitro fermentation of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 64, 77-89.
- Hall MB, Larson CC and Wilcox CJ 2010. Carbohydrate source and protein degradability alter lactation, ruminal, and blood measures. *Journal of Dairy Science*, 93, 311-322.
- Hespell RB and Bryant MP 1979. Efficiency of Rumen Microbial Growth: Influence of some Theoretical and Experimental Factors on Y ATP. *Journal of Animal Science*, 49, 1640-1659.
- Krishnamoorthy U, Rymer C and Robinson P H 2005. The in vitro gas production technique: limitations and opportunities. *Animal Feed Science and Technology*, 123, 1-7.
- Laird AK 1965. Dynamics of relative growth. *Growth*, 29, 249-263.
- Licitra G, Hernandez TM and Van Soest PJ 1996. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 57, 347-358.
- Lutakome P, Kabi F, Tibayungwa F, Laswai GH, Kimambo A and Ebong C 2017. Rumen liquor from slaughtered cattle as inoculum for feed evaluation. *Animal Nutrition*, 3, 300-308.

- Mauricio RM, Mould FL, Dhanoa MS, Owen E, Channa KS and Theodorou MK 1999. A semi-automated in vitro gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. *Animal Feed Science and Technology*, 79, 321-330.
- Mertens DR 2002. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beaker or crucibles: collaborative study. *Journal of AOAC International*, 85, 1217-1240.
- Nocek JE and Russell JB 1988. Protein and energy as an integrated system. Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production. *Journal of Dairy Science*, 71, 2070-2107.
- Schofield P, Pitt RE and Pell AN 1994. Kinetics of fiber digestion from in vitro gas production. *Journal of Animal Science*, 72, 2980-2991.
- Sniffen CJ, O'connor JD, Van Soest PJ, Fox DG and Russell JB 1992. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, 70, 3562-3577.
- Spiess AN and Neumeyer N 2010. An evaluation of R^2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. *BMC pharmacology*, 10, 6.
- Teleken JT, Galvão AC and Robazza WDS 2017. Comparing non-linear mathematical models to describe growth of different animals. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 39, 73-81.
- Theodorou MK, Williams BA, Dhanoa MS, McAllan AB and France J 1994. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48, 185-197.
- Tilley JMA and Terry RA 1963. A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*, 18, 104-111.
- Tjørve KM and Tjørve E 2017. The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family. *PloS one*, 12, e0178691.
- Van Soest PJ and Robertson JB 1985. Analysis of forages and fibrous foods. Cornell University.
- Von Bertalanffy L 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *The quarterly review of biology*, 32, 217-231.

- Ware A and Power N 2017. Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy*, 104, 50-59.
- Zhao XH, Gong JM, Zhou S, Fu CB, Liu CJ, Xu LJ, Pan K and Qu MR 2015. Effects of degradable protein and non-fibre carbohydrates on microbial growth and fermentation in the rumen simulating fermenter (Rusitec). *Italian Journal of Animal Science*, 14, 3771.

Tabela 1 Composição química-bromatológica dos alimentos e coprodutos estudados

Alimentos	Parâmetros							
	MS ¹	MO ¹	MM ²	PB ²	EE ²	FDN ²	FDA ²	LIG ²
Sabugo de milho	928,87±0,83	977,93±1,26	22,06±1,26	29,81±3,37	18,76±2,28	847,67±19,94	397,90±7,27	50,78±5,45
Palha de milho	915,64±0,98	978,15±0,28	21,84±0,28	14,60±3,10	10,37±0,27	904,60±15,00	400,18±4,72	25,06±2,02
Coproducto de milho doce	196,86±0,63	976,38±1,73	23,61±1,73	87,70±4,59	45,72±5,07	792,79±20,07	351,66±7,91	40,21±7,09
Casca do grão de soja	914,81±0,21	947,95±1,21	52,04±1,21	146,95±3,91	48,29±0,94	620,03±10,62	387,81±3,91	22,89±3,73
Casca de café	905,60±2,13	929,57±8,57	70,42±8,57	108,96±5,54	27,37±4,79	671,54±14,94	468,42±3,12	149,30±4,87
Casca de abóbora	156,90±0,71	940,36±1,35	59,63±1,35	163,87±3,58	50,07±1,26	434,94±24,37	141,37±12,46	35,01±2,25
Casca de pequi	221,37±0,44	975,11±0,93	24,88±0,93	47,02±2,97	38,29±2,93	248,76±20,15	184,16±21,33	20,97±1,90
Silagem de coproduto de milho doce	180,34±0,29	970,96±0,77	21,88±0,77	92,79±3,37	59,81±4,17	758,94±15,17	349,09±5,39	33,91±4,12
Polpa cítrica	305,25±0,48	973,26±0,13	26,73±0,13	63,28±3,27	20,58±2,11	279,57±15,14	143,15±2,42	3,85±1,00
cDDGS	946,47±0,79	970,96±0,16	29,03±0,16	448,37±1,55	74,57±3,23	618,78±18,36	131,18±9,05	36,63±2,66
Feijão extrusado	937,48±0,07	965,38±0,70	34,61±0,70	237,07±0,60	28,71±3,99	216,41±6,44	40,47±3,07	0,24±0,01
Farelo de soja	917,40±3,20	933,55±2,25	66,45±2,25	475,87±3,37	27,88±5,88	200,54±21,47	77,32±4,47	18,89±1,00
Farelo de Milho	897,93±1,09	987,94±0,25	12,05±0,25	80,09±3,18	55,82±2,58	575,55±80,13	27,38±3,54	0,50±0,03
Farelo de trigo	966,24±1,43	947,37±1,53	52,62±1,53	168,45±3,59	44,89±3,25	476,48±22,53	123,91±3,09	30,85±3,20
Silagem de milho	312,09±0,63	962,87±1,89	37,12±1,89	60,48±5,19	55,11±10,27	494,02±16,43	232,68±2,88	25,29±4,07
Silagem de tifton 85	234,03±0,31	885,38±0,38	114,61±0,38	158,32±0,31	67,85±6,83	645,03±10,62	349,54±3,52	55,39±5,15

Média ± Desvio Padrão; MS: matéria seca; MO: matéria orgânica; MM: matéria mineral; PB: proteína bruta; EE: extrato etéreo; FDN: fibra insolúvel em detergente neutro; FDA: fibra insolúvel em detergente ácido; LIG: lignina; ¹ g/kg de matéria natural; ² g/kg de MS

Tabela 2 Fração carboidrato (g/kg de CT) dos alimentos e coprodutos estudados

Alimentos	Carboidrato			
	CT ¹	A+B1	B2	C
Sabugo de milho	935,60±12,51	172,85±12,22	648,80±12,40	113,93±10,83
Palha de milho	953,16±2,83	114,54±4,76	800,35±29,88	57,39±4,43
Coproduto de milho doce	842,95±5,02	222,47±6,39	539,08±8,01	81,39±14,72
Casca do grão de soja	752,71±4,60	325,45±8,47	399,74±24,51	41,26±6,41
Casca de café	793,23±15,02	299,45±17,28	209,56±4,83	284,20±8,91
Casca de abóbora	762,98±66,85	442,58±24,53	276,74±41,86	65,48±2,69
Casca de pequi	681,82±39,78	517,32±33,14	142,39±2588	33,15±2,70
Silagem de coproduto de milho doce	845,43±31,74	234,97±3,88	541,84±34,16	68,61±6,15
Polpa cítrica	898,31±14,73	652,39±21,41	240,32±19,04	8,38±2,33
cDDGS	448,02±4,75	248,69±2,79	173,04±19,70	39,43±3,45
Feijão extrusado	699,59±4,22	559,98±5,48	139,32±4,98	0,41±0,01
Farelo de soja	443,05±21,72	364,14±9,93	58,69±12,25	20,20±0,46
Farelo de Milho	905,42±45,76	416,71±54,21	487,99±97,33	1,07±0,01
Farelo de trigo	734,02±6,13	389,57±3,13	290,10±13,67	54,33±5,25
Silagem de milho	885,81±43,99	468,57±21,74	363,19±14,62	54,03±10,92
Silagem de tifton 85	681,82±39,78	271,64±19,37	319,27±10,04	90,89±13,16

Média ± Desvio Padrão; CT: carboidratos totais; A+B1: carboidratos não fibrosos; B2: fração potencialmente degradável; C: fração indegradável; ¹ g/kg de MS

Tabela 3 Fração proteína (g/kg de PB) dos alimentos e coprodutos estudados

Alimentos	Proteína				
	NNP	PB1	PB2	PB3	PBC
Sabugo de milho	11,32±1,97	0,37±0,03	4,36±0,73	9,29±1,26	4,45±0,47
Palha de milho	4,05±0,21	2,67±0,14	0,55±0,06	2,09±0,5	5,18±0,59
Coproduto de milho doce	20,99±3,59	11,24±0,60	20,66±1,81	17,07±0,91	7,06±0,38
Casca do grão de soja	35,18±4,52	8,35±0,01	46,14±5,53	45,72±1,21	11,53±0,30
Casca de café	28,50±4,14	6,63±0,34	28,21±1,45	14,59±0,75	31,00±1,59
Casca de abóbora	49,99±2,33	9,08±0,52	60,17±1,78	31,76±0,70	12,85±0,37
Casca de pequi	13,01±2,42	2,34±0,24	14,80±1,14	6,18±0,40	10,67±0,69
Silagem de coproduto de milho doce	30,76±1,57	1,42±0,61	33,24±1,20	22,31±0,80	5,04±0,18
Polpa cítrica	27,40±1,83	6,22±0,52	17,09±1,19	9,57±0,48	2,87±0,14
cDDGS	66,85±1,31	11,55±0,38	233,21±0,80	82,29±0,05	54,44±0,18
Feijão extrusado	10,79±0,62	13,27±0,03	141,12±0,84	66,65±0,16	5,21±0,01
Farelo de soja	6,89±0,24	85,65±0,11	321,72±0,16	58,13±0,02	3,46±0,01
Farelo de Milho	13,95±2,68	1,38±0,18	38,90±2,29	22,76±0,92	3,46±0,14
Farelo de trigo	34,40±2,88	7,81±0,16	93,85±2,02	28,22±0,60	4,14±0,08
Silagem de milho	26,23±4,64	6,74±0,91	15,49±2,10	8,06±1,09	3,93±0,53
Silagem de tifton 85	41,88±0,16	6,49±0,02	48,16±0,09	47,95±0,04	12,40±0,02

Média ± Desvio Padrão; NNP: compostos não proteicos; PB1: proteína potencialmente degradável; PB2: proteína de degradação intermediária; PB3: proteína de degradação lenta; PBC proteína indegradável;

Tabela 4 Valores de critérios de seleção para cada modelo matemático para ajustar a cinética de produção de gases dos alimentos e coprodutos estudados

Alimentos		Modelos					
		Bertalanffy	Brody	Logístico	DL	Gompertz	France
Sabugo de milho	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,72
	ED	8,63	10,30	23,36	10,90	13,02	140,65
	BIC	444,77	542,05	993,86	548,38	671,22	1984,85
Palha de milho	R ²	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,70
	ED	21,73	23,63	41,51	12,23	72,35	196,43
	BIC	953,98	1000,39	1311,33	648,10	1080,02	2169,24
Coproduto de milho doce	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,76
	ED	8,39	8,29	59,96	9,97	11,45	117,18
	BIC	429,12	422,54	895,60	535,58	600,57	1884,10
Casca do grão soja	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,78
	ED	13,28	17,86	28,61	9,54	17,24	155,80
	BIC	682,49	845,97	1105,95	510,94	826,37	2041,34
Casca de café	R ²	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,72
	ED	10,68	21,65	13,50	7,54	10,79	75,21
	BIC	554,74	952,14	691,19	380,98	567,66	1639,35
Casca de abóbora	R ²	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,82
	ED	64,49	47,38	17,62	17,41	16,94	156,73
	BIC	948,10	1384,26	838,24	842,96	816,68	2044,61
Casca de pequi	R ²	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,76
	ED	28,68	39,07	42,00	16,44	32,83	134,25
	BIC	1107,18	1277,87	1317,81	811,31	1181,79	1959,16
Silagem de coproduto de milho doce	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,80
	ED	11,68	8,07	19,54	10,82	13,87	93,96
	BIC	611,66	407,32	895,40	535,58	706,35	1762,17

R²: Coeficiente de Determinação; ED: Distância Euclidiana; BIC: Critério de Informação Bayesiano; DL: Logístico Bicompartimental

Tabela 5 Valores de critérios de seleção para cada modelo matemático para ajustar a cinética de produção de gases dos alimentos e coprodutos estudados

Alimentos		Modelos					
		Bertalanffy	Brody	Logístico	DL	Gompertz	France
Polpa cítrica	R ²	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,86
	ED	68,19	38,56	16,80	13,28	15,75	259,63
	BIC	893,10	1270,63	811,96	693,72	776,32	1961,50
cDDGS	R ²	0,98	0,99	0,97	0,99	0,98	0,76
	ED	25,74	19,44	35,30	10,46	28,56	113,06
	BIC	1047,48	887,54	1221,80	561,48	1104,86	1864,33
Feijão extrusado	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,87
	ED	20,70	21,92	36,27	15,82	25,01	124,58
	BIC	927,29	958,97	1236,77	790,14	1031,54	1917,91
Farelo de soja	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,81
	ED	14,64	13,45	20,88	10,71	16,18	98,65
	BIC	737,91	689,54	931,96	574,79	791,18	1789,08
Farelo de milho	R ²	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,74
	ED	13,71	59,42	29,44	8,26	15,83	221,95
	BIC	699,96	1509,27	1121,62	431,29	779,23	2203,52
Farelo de trigo	R ²	0,98	0,99	0,97	0,99	0,98	0,91
	ED	18,20	13,75	23,97	10,66	20,01	43,34
	BIC	856,32	701,56	1008,31	572,16	906,93	1335,12
Silagem de milho	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,79
	ED	12,19	22,84	11,33	8,99	9,83	103,06
	BIC	634,85	981,67	594,48	478,36	516,35	1813,20
Silagem de Tifton 85	R ²	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,74
	ED	12,58	20,23	19,99	7,17	10,47	104,64
	BIC	652,31	914,54	510,91	353,82	551,12	1821,64

R²: Coeficiente de Determinação; ED: Distância Euclidiana; BIC: Critério de Informação Bayesiano; ML: Logístico Modificado; DL: Logístico Bicompartimental; cDDGS: Diller's Dried Grains with Solubles de milho

Tabela 6 Parâmetros estimados pelos modelos avaliados para ajuste da cinética de produção de gases dos alimentos e coprodutos estudados

Alimentos	Parâmetros dos modelos							
	V_f	b	k	V_{f1}	V_{f2}	$k1$	$k2$	λ
Sabugo de milho	42,87 (0,064)	0,66 (0,004)	0,08 (0,001)	-	-	-	-	-
Palha de milho	-	-	-	28,75 (0,391)	28,28 (0,343)	0,09 (0,002)	0,02 (0,001)	5,21 (0,091)
Coproduto de milho de doce	42,48 (0,068)	1,00 (0,003)	0,06 (0,001)	-	-	-	-	-
Casca do grão de soja	-	-	-	35,99 (0,361)	20,50 (0,373)	0,14 (0,003)	0,03 (0,004)	2,44 (0,06)
Casca de café	-	-	-	11,53 (0,357)	9,83 (0,346)	0,14 (0,006)	0,04 (0,001)	6,22 (0,112)
Casca de abóbora	66,08 (0,074)	4,32 (0,082)	0,25 (0,002)	-	-	-	-	-
Casca de pequi	-	-	-	25,97 (0,376)	16,11 (0,367)	0,23 (0,010)	0,03 (0,001)	5,70 (0,092)
Silagem de coproduto milho doce	40,93 (0,05)	0,93 (0,003)	0,07 (0,001)	-	-	-	-	-
Polpa cítrica	-	-	-	7,55 (0,556)	64,16 (0,556)	0,68 (0,096)	0,09 (0,001)	1,57 (0,066)
cDDGS	-	-	-	21,37 (0,234)	23,42 (0,210)	0,09 (0,002)	0,01 (0,001)	0,95 (0,114)
Feijão extrusado	-	-	-	46,63 (0,848)	21,87 (0,831)	0,15 (0,004)	0,04 (0,001)	1,55 (0,064)
Farelo de soja	-	-	-	15,01 (0,358)	28,92 (0,348)	0,15 (0,007)	0,03 (0,001)	0,06 (0,122)
Farelo de milho	-	-	-	31,77 (0,500)	28,80 (0,491)	0,16 (0,003)	0,05 (0,001)	6,17 (0,041)
Farelo de trigo	-	-	-	20,76 (0,324)	15,35 (0,318)	0,23 (0,009)	0,04 (0,001)	0,07 (0,084)
Silagem de milho	-	-	-	24,33 (2,632)	15,38 (2,612)	0,07 (0,003)	0,04 (0,002)	1,31 (0,202)
Silagem de tifton 85	-	-	-	3,58 (0,168)	31,33 (0,172)	0,55 (0,081)	0,04 (0,001)	1,47 (0,113)

Valor estimado (Erro padrão); cDDGS: DDGS de milho; V_f : volume de gases assintótico (mL); V_{f1} : volume de gases produzido pela degradação da fração A+B1 do Sistema de CNCPS; V_{f2} : volume de gases produzido pela degradação da fração B2 do Sistema de CNCPS; k : taxa específica de produção de gases; $k1$: taxa específica de produção de gases pela degradação da fração A+B1; $k2$: taxa específica de produção de gases pela degradação da fração B2; λ : fase de latência; b : parâmetro de forma sem interpretação biológica

Figura 1 Curvas observadas (•••), predita pelo modelo France (----) e pelo modelo com melhor (—) ajuste à cinética de produção de gás (mL) para sabugo de milho (A), palha de milho (B), coproduto milho doce (C), casca do grão de soja (D), casca de café (E) casca de abóbora (F), casca de pequi (G) e silagem de coproduto de milho doce (H)

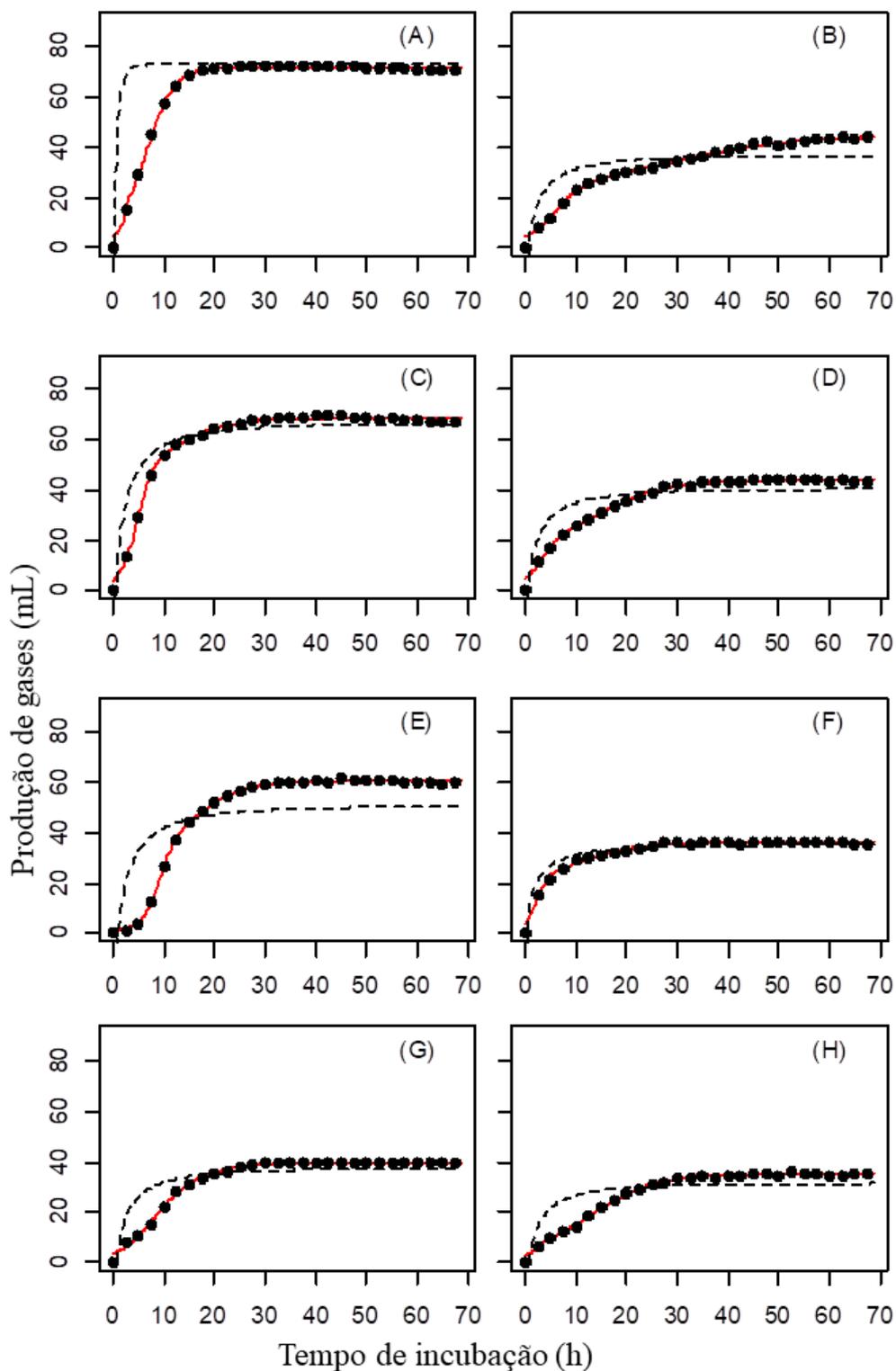


Figura 2 Curvas observadas (•••), predita pelo modelo France (----) e pelo modelo com melhor (—) ajuste à cinética de produção de gás (mL) para polpa cítrica (A), cDDGS (B), feijão extrusado (C), farelo de soja (D), farelo de milho (E), farelo de trigo (F), silagem de milho (G) e silagem de Tifton 85 (H)

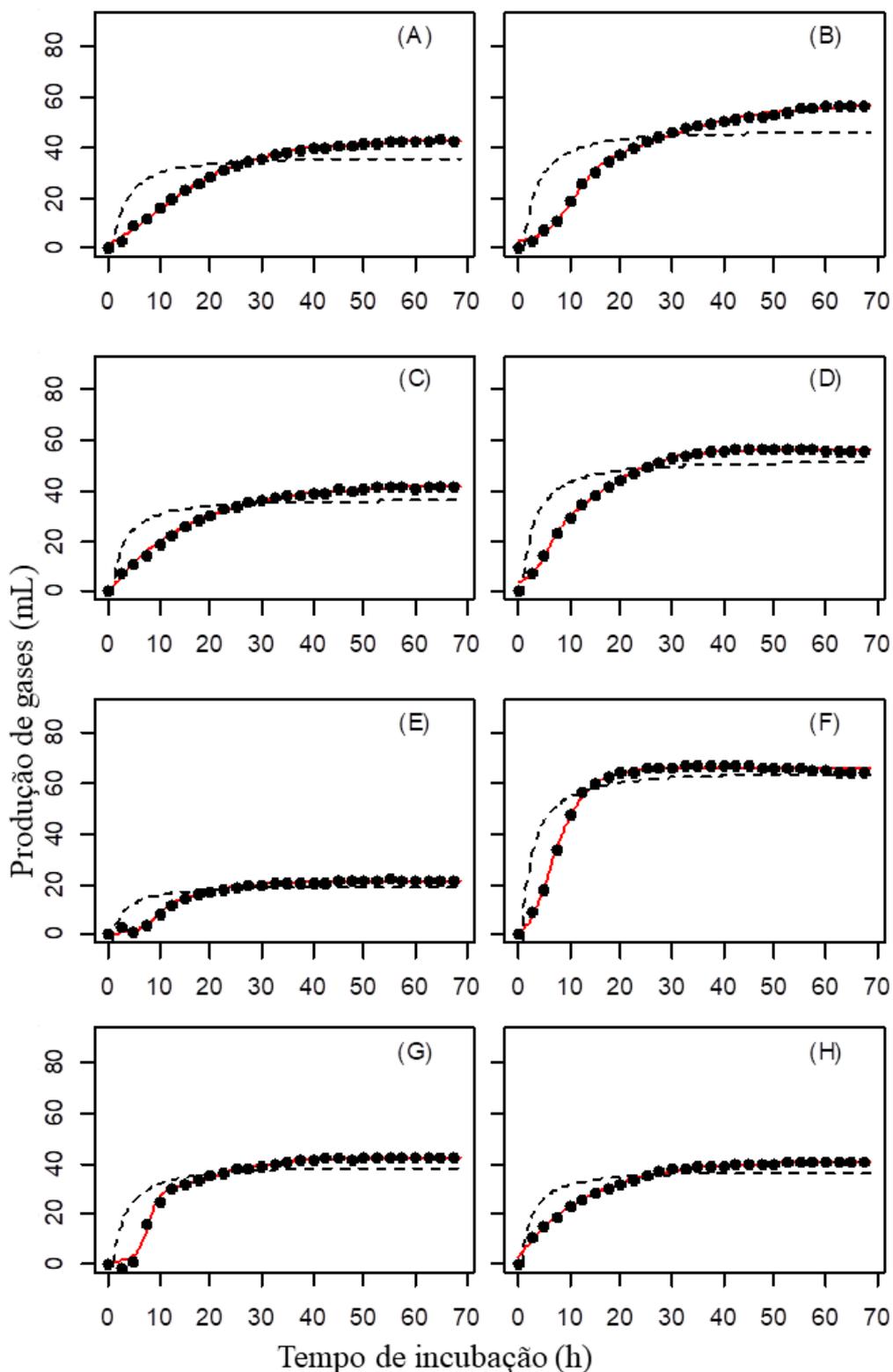


Figura 3 Taxa de produção de gás mL/h(—) e ponto de inflexão PI (----) para sabugo de milho (A), palha de milho (B), coproduto de milho doce (C), casca do grão de soja (D), casca de café (E) casca de abóbora (F), casca de pequi (G) e silagem de coproduto de milho doce (H)

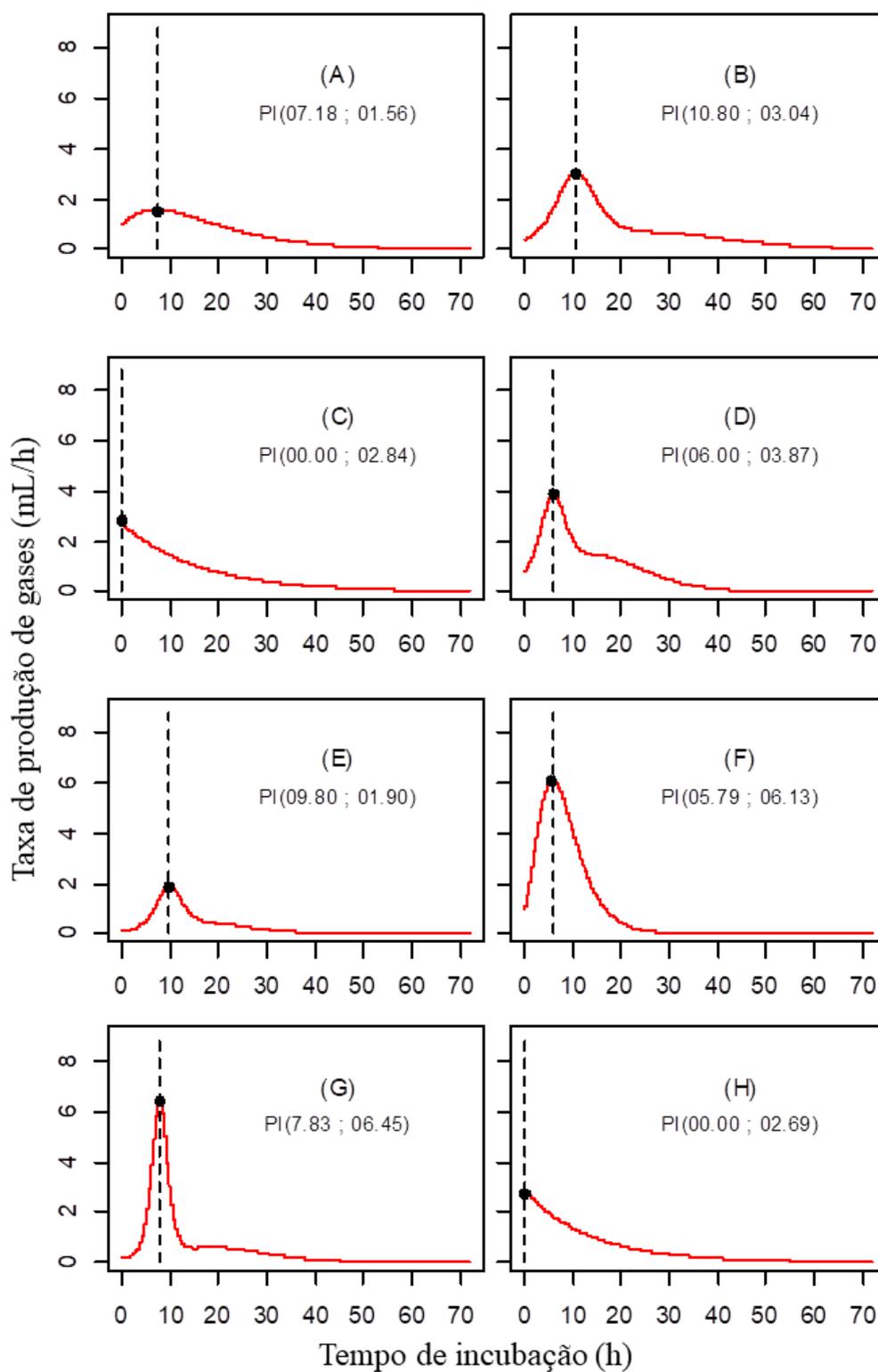


Figura 4 Taxa de produção de gás mL/h (—) e ponto de inflexão (----) para polpa cítrica (A), cDDGS (B), feijão extrusado (C), farelo de soja (D), farelo de milho (E), farelo de trigo (F), silagem de milho (G) e silagem de Tifton 85 (H)

