

**Modelos matemáticos para estimativa da cinética de fermentação ruminal do pseudofruto do cajueiro através da técnica *in vitro* semi-automática de produção de gases****Mathematical models to estimate the cashew tree false fruit ruminal fermentation kinetic through the semi-automatic *in vitro* gas production technique**

DOI:10.34117/bjdv6n9-711

Recebimento dos originais: 01/09/2020

Aceitação para publicação: 30/09/2020

**Marcia Mourão Ramos Azevedo**

Pós-Doutorado

Professora do Instituto de Biodiversidade e Florestas da UFOPA

Rua Vera Paz, s/n, Bairro: Salé. CEP: 68035-110

Campus Tapajós – Santarém, PA - Brasil.

E-mail: marcia.azevedo@ufopa.edu.br

**Vânia Rodrigues Vasconcelos**

Pós-Doutorado

Professora da Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias

Campus do Socopo, Ininga. 64049550 - Teresina, PI. – Brasil.

E-mail: vaniarvasconcelos@hotmail.com

**Adibe Luiz Abdalla**

Pós-Doutorado

Professor da Universidade de São Paulo.

Av. Centenário, 303. São Dimas. 13400970 - Piracicaba, SP - Brasil - Caixa-postal: 96

E-mail: abdalla@cena.usp.br

**José Lindenberg Rocha Sarmiento**

Doutorado

Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias.

Campus do Socopo, Ininga. 64049550 - Teresina, PI – Brasil.

E-mail: lindenbergsarmiento@yahoo.com.br

**Arnaud Azevedo Alves**

Doutorado

Professor da Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias.

Campus do Socopo, Ininga. 64049550 - Teresina, PI - Brasil.

E-mail: arnaud@ufpi.edu.br

**Ives Cláudio da Silva Bueno**

Pós-Doutorado

Professor da Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia.

Av. Duque de Caxias Norte, 225. 13635-900 – Pirassununga, SP – Brasil

E-mail: ivesbueno@usp.br

**André Luiz Rodrigues Magalhães**

Doutorado

Professor da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco  
Av. Bom Pastor, s/n. Boa Vista, 55292-270 - Garanhuns, PE – Brasil  
E-mail: andre30036@gmail.com

**Jucelane Salvino de Lima**

Doutorado

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Zootecnia  
Rua Dom Manoel de Medeiros. s/n. Dois Irmãos, 52171-900 - Recife, PE – Brasil  
E-mail: jucelanegta@gmail.com

**RESUMO**

O desenvolvimento de novas técnicas de avaliação de alimentos e a automatização das mesmas conduziu à necessidade de utilização de modelos matemáticos capazes de agrupar várias informações em poucos parâmetros biologicamente interpretáveis. A escolha de um modelo na avaliação de alimentos para ruminantes através da técnica *in vitro* de produção de gases deve considerar os parâmetros de validação e a convergência dos dados. O objetivo deste trabalho foi comparar a capacidade de ajuste de quatro modelos matemáticos em estimar a cinética de fermentação ruminal da matéria seca e da fração fibra em detergente neutro do pseudofruto do cajueiro. Os modelos utilizados foram o exponencial, France, Gompertz e logístico e os parâmetros de validação usados foram o quadrado médio do erro (QME), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o desvio médio absoluto dos resíduos (DMA) e a análise gráfica dos resíduos. Para os dados de matéria seca, o valor do QME foi menor para o modelo logístico. O  $R^2$  foi alto para todos os modelos com maior valor observado também para o logístico. Quanto ao DMA, os valores foram muito próximos entre os modelos logístico, France e exponencial, que foram inferiores ao Gompertz. Os gráficos de dispersão mostraram melhor ajuste da taxa de produção de gases para o modelo logístico. Na análise gráfica das cinéticas de fermentação, os modelos logístico, exponencial e France apresentaram uma boa estimativa da curva na parte inicial e ao longo do tempo, o mesmo não observado para o Gompertz, demonstrando, portanto, serem mais adequados para descrever a cinética de produção de gases da matéria seca. Para os dados da fração FDN, o modelo Gompertz, apesar de ter apresentado maior dispersão dos resíduos e valores mais elevados do QME e do DMA, foi o que melhor estimou a curva de produção de gases, possivelmente devido a 100% de convergência dos dados.

**Palavras-chave:** *Anacardium occidentale*, exponencial, France, Gompertz, logístico.

**ABSTRACT**

All models have presented adjustment advantages and disadvantages. The choice of a model to evaluate feed for ruminants through the *in vitro* gas production technique must consider the validation parameters and data convergence. This present study aims to compare four mathematical models adjustment capacity to predict kinetic parameters of ruminal fermentation of dry matter and neutral detergent fiber fraction of the false fruit of five cashew clones. The models which were used were the exponential, France, Gompertz and the logistic. The validation parameters were the error mean square (EMS), the coefficient of determination ( $R^2$ ), the absolute average error (AAE) and the graphical analysis of the residues. The EMS value was lower for the logistic model for dry matter. The  $R^2$  was high for all models, with a higher value also observed for the logistic model. About the AAE the numbers were very similar among the logistic, exponential and France models, which were lower than the Gompertz model. The dispersion graphics showed better gas production adjustment for the logistic model. In the kinetic fermentation graphical analysis, the logistic, exponential and France models presented, in the initial part and throughout the time, a good estimate, which was not

observed for the Gompertz model, which demonstrates that they are more adequate to describe the kinetic of the dry matter gas production. For the NDF fraction data, the Gompertz model, despite having presented a more significant residues dispersion and higher EMS and AAE values, was the one which better predicted the gas production, that possibly happened due to the percentage of 100% data convergence.

**KeyWords:** *Anacardium occidentale*, exponential, France, Gompertz, logistic.

## 1 INTRODUÇÃO

Diversas técnicas estão disponíveis para a determinação do valor nutritivo de alimentos fornecidos aos ruminantes. A técnica *in vitro* semi-automática de produção de gases vem sendo cada vez mais utilizada por descrever a cinética de fermentação ruminal (FEITOSA; SOUSA, 2020), permitir a determinação da concentração de ácidos graxos voláteis, a produção de metano e o efeito da presença de fatores antinutricionais, com potencial benéfico à microbiota ruminal e melhorar a produção animal (MIN et al., 2020).

Essa técnica se baseia na medida, em tempos variados, do volume de gases produzidos durante a fermentação de um substrato incubado a 39°C em frascos de vidro contendo meio nutritivo e inóculo microbiano proveniente do rúmen (SANTO et al., 2017; BUENO et al., 2005).

O desenvolvimento de novas técnicas de avaliação de alimentos e a automatização das mesmas conduziu à necessidade de utilização de modelos matemáticos capazes de agrupar várias informações em poucos parâmetros biologicamente interpretáveis por modelagem (SANTOS et al., 2020; BAIA et al., 2020; CAVALCANTE et al., 2020; DOUGHERTY et al., 2019; BATEKI et al., 2019; THEODOROU et al., 1994; BEUVINK et al., 1992; FRANCE et al., 2000). Os parâmetros matemáticos obtidos por meio da curva de produção de gases permitem descrever e interpretar os perfis cumulativos da produção de gases, avaliar diferentes ambientes de fermentação, além de possibilitar a comparação de diferentes substratos e frações dos alimentos (OLIVO et al., 2017; NOGUERA et al., 2004).

Vários pesquisadores têm utilizado modelos matemáticos no estudo da cinética de produção cumulativa dos gases (FANT et al., 2020; CANUL-SOLIS et al., 2019; PEDRAZA-HERNÁNDEZ et al., 2019; SILVA et al., 2014; NOGUERA et al., 2005; MAURICIO et al., 2003), sobretudo os modelos de France et al. (1993); Gompertz, proposto por Lavrencic et al. (1997); o logístico bicompartimental, proposto por Schofield et al. (1994); e o exponencial, proposto por Ørskov e McDonald (1979).

O modelo logístico bicompartimental assume que a taxa de produção de gases é proporcional à população microbiana e à concentração do substrato potencialmente degradável. A população microbiana no início do processo fermentativo constitui um fator limitante à taxa de produção de

gases e, no final, seria a disponibilidade de substrato. O modelo Gompertz assume que a taxa de produção de gases é proporcional à atividade microbiana, mas a proporcionalidade diminui com o tempo de incubação, que pode ser atribuída à perda de eficiência na taxa de fermentação com o tempo. O modelo exponencial assume que a taxa de produção de gases depende apenas do substrato disponível para fermentação depois de atingido o tempo de colonização (*Lag time*). O modelo France assume que a taxa de produção de gases é diretamente proporcional à taxa de degradação do alimento, a qual varia em função do tempo de incubação e de colonização do alimento pelos microrganismos.

Segundo Oliveira et al. (2017) e Noguera et al. (2004), as técnicas e os modelos matemáticos apresentam vantagens e desvantagens existindo variações de estimativa entre eles dependendo das condições experimentais e do alimento avaliado, sendo essencial, portanto, uma avaliação prévia e cuidados para que possa ser utilizado a técnica e modelo mais adequado.

O objetivo deste trabalho foi o de comparar a capacidade de ajuste de quatro modelos matemáticos em estimar a cinética de fermentação ruminal da matéria seca e da fração fibra em detergente neutro do pseudofruto do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), pela técnica *in vitro* semi-automática de produção de gases.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados dois ensaios: Um para avaliar a capacidade de ajuste dos modelos à estimativa da cinética de fermentação ruminal da matéria seca e, o outro, da fração fibra em detergente neutro (FDN), do pseudofruto de cinco clones de cajueiro (CP 06, CP 09, CP 76, CP 1001 e BRS 189).

### 2.1 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os pseudofrutos foram obtidos dos jardins clonais da Embrapa Agroindústria Tropical, Estação Experimental de Pacajús, CE. Inicialmente foram submetidos a uma pré-secagem ao sol por 20 dias, para retirada de parte da umidade. Posteriormente, foram levados a uma estufa de ventilação forçada de ar a 55°C durante 72 h. Após a pré-secagem, as amostras foram submetidas a uma trituração grosseira e, posteriormente, encaminhadas ao moinho dotado de peneira de porosidade 1 mm e armazenadas em recipientes hermeticamente fechados.

Para a extração da fração FDN colocou-se em um reboiler 2,5 g da amostra e 250 mL de uma solução detergente neutro, preparada segundo Silva e Queiroz (2002), e aqueceu-se a 125°C por uma hora (VAN SOEST et al., 1991; PELL; SCHOFIELD, 1993). Em seguida, o conteúdo foi transferido para cadinho filtrante revestido com tecido de náilon. O material retido foi lavado

exaustivamente com água destilada quente e 200 mL de acetona, visando remover todo o detergente da amostra. Em seguida, ele foi seco em estufa de ventilação forçada de ar a 55°C por 72 h. Este procedimento foi repetido várias vezes até a obtenção de quantidade suficiente desta fração para a condução dos ensaios, conforme Nogueira et al. (2005).

## 2.2 PREPARO DO MEIO NUTRITIVO

O meio nutritivo foi preparado 24 h antes da incubação das amostras, de acordo com as metodologias descritas por Maurício et al. (2001). Era composto por soluções de microminerais, macrominerais, tampão, redutora e, por fim, uma solução indicadora de pH.

## 2.3 COLETA DO CONTEÚDO RUMINAL E PREPARO DO INÓCULO

O conteúdo ruminal foi coletado de um bovino fistulado no rúmen, com o auxílio de uma pinça e de uma sonda para retirada das frações sólida e líquida, respectivamente, às 7:30 h. Logo após, foi colocado em garrafa térmica pré-aquecida a 39°C.

A preparação do inóculo consistiu da homogeneização das frações sólida e líquida do conteúdo ruminal, em proporções iguais, durante 5 s, utilizando-se um liquidificador, e da posterior filtragem em quatro camadas de tecido de algodão. Até o momento de sua utilização sofreu um processo de saturação com CO<sub>2</sub> para manutenção da anaerobiose, sendo mantido a 39°C (MAURÍCIO et al., 1999).

## 2.4 INCUBAÇÃO DAS AMOSTRAS E MEDIDAS DA PRESSÃO E DO VOLUME DE GASES

Utilizou-se a metodologia descrita por Maurício et al. (2001), com algumas adaptações. Em frascos de vidro com capacidade de 160 mL, adicionou-se 1 g da amostra, 90 mL do meio nutritivo e CO<sub>2</sub>. Em seguida, eles foram levados à estufa de circulação forçada de ar a 39°C por, aproximadamente, 1 h. Após este período, foram retirados para a adição de 10 mL do inóculo ruminal e, em seguida, vedados com rolhas de borracha e lacres de alumínio. Após a colocação do último lacre, os gases gerados no interior de cada frasco foram eliminados e levados novamente à estufa para manutenção da temperatura. Como controles foram utilizados frascos contendo apenas o inóculo ruminal e o meio nutritivo. Durante todo o período de incubação os frascos permaneceram em uma estufa de circulação forçada de ar a 39°C, sendo retirados apenas nos momentos de leitura.

As leituras de pressão e as medidas de volume foram realizadas em tempos pré-determinados (3, 6, 9, 12, 15, 21, 27, 33, 39, 48, 60 e 72 h), com auxílio de um transdutor de pressão conectado a uma válvula de três saídas.

## 2.5 MODELOS MATEMÁTICOS

Na Tabela 1 encontram-se os modelos matemáticos utilizados no estudo da cinética de fermentação ruminal da MS e da fração FDN do pseudofruto do cajueiro.

**Tabela 1** - Descrição matemática dos modelos avaliados

Modelo	Nº. de parâmetros	Equação <sup>1</sup>
logístico	3	$V_T = SV_{FN} \times (1 + \exp(2 - 4 \times S_n \times (t - L_n)))^{-1}$
Gompertz	3	$V_T = V_F \times \exp(-C \times \exp(-A \times t))$
exponencial	3	$V_T = SV_{FN} \times (1 - \exp(-k_n \times (t - L_n)))$
France	4	$V_T = V_F \times \{1 - \exp[-b \times (t - L) - c \times (\sqrt{t} - \sqrt{L})]\}$

<sup>1</sup> $V_T$  = Produção cumulativa de gases no tempo;  $SV_{FN}$  e  $V_F$  = assíntota ou potencial máximo de produção de gases;  $S_n$  = representa uma taxa específica semelhante a taxa de degradação ( $h^{-1}$ );  $t$  = tempo de incubação;  $L$ ,  $L_n$  = tempo de colonização;  $k_n$ ,  $b$  e  $c$  = taxas constantes;  $C$  = taxa constante de produção de gases do material potencialmente degradável e  $A$  = fator constante de eficiência microbiana.

Para validação dos modelos utilizou-se o quadrado médio do erro (QME), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o desvio médio absoluto dos resíduos (DMA) e a análise gráfica dos resíduos (SARMENTO et al., 2006).

O QME foi calculado dividindo-se a soma de quadrados do erro, obtida pelo SAS, pelo número de observações, em virtude dos modelos possuírem números diferentes de parâmetros a serem estimados; quanto menor o valor do QME, melhor será o ajuste produzido pelo modelo. O  $R^2$  foi calculado dividindo-se a soma de quadrados do modelo (SQM) pela soma de quadrado total (SQT). Quando o  $R^2$  for alto, o modelo fará melhores estimativas em relação aos valores observados, entretanto este coeficiente não deve ser utilizado como único critério de avaliação dos modelos uma vez que altos valores de  $R^2$  podem ser observados em modelos com limitada capacidade de predição. O DMA foi calculado a partir da diferença do somatório do valor observado pelo estimado, dividido pelo tamanho da amostra; quanto menor o valor do DMA melhor o ajuste.

O QME foi avaliado através da análise de variância com o auxílio do procedimento NLIN do SAS (1999). O  $R^2$ , o DMA e a análise gráfica dos resíduos foram analisados utilizando-se o procedimento CORR do SAS (1999).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores para o QME, o  $R^2$  e o DMA fornecidos pelos modelos a partir da fermentação ruminal da matéria encontram-se na Tabela 2. O modelo logístico apresentou menor variância residual com valor do QME ligeiramente inferior ao exponencial e ao France, que foram iguais. O modelo Gompertz foi o que apresentou maior valor. Melo et al. (2008) ao estudar sete modelos de ajustes produção de gás, dentre estes, estudados no presente trabalho, observaram que o modelo

logístico bicompartimental e France apresentaram melhor qualidade na produção cumulativa de gases, com menor QME.

Teixeira et al. (2016) avaliaram modelos matemáticos para avaliação da cinética da degradação ruminal da MS de concentrados proteicos, concluíram que modelo de France foi mais adequado, com menor QME; resultado não observado pelo presente trabalho, provavelmente pelas diferenças de alimentos e dos subprodutos gerados na fermentação ruminal. Beuvink e Kogut (1993) estudando cinco modelos para descrever a produção de gases de vários alimentos, entre eles o exponencial, o logístico e o Gompertz, obtiveram menor valor do QME para o Gompertz, seguido pelo logístico e o exponencial, e verificaram que nenhum deles descreveu satisfatoriamente os dados. Nogueira et al. (2004), trabalhando com cinco genótipos de sorgo, obtiveram menores valores do QME para os modelos France e Gompertz, seguido pelo logístico e exponencial.

Já Calabrò et al. (2005) estudando cinco alimentos comumente utilizados para ruminantes verificaram menor valor do QME para o modelo logístico e maior para o exponencial, sendo o valor obtido para France e Gompertz muito próximos. Estes resultados diferem do observado neste trabalho, em que o modelo exponencial foi o que apresentou maior valor para o QME. Com base apenas no parâmetro QME pode-se perceber que mais de um modelo poderia ser usado para descrever o perfil de produção de gases.

O  $R^2$  foi alto para todos os modelos com maior valor observado para o logístico. Cabral et al. (2019) avaliaram sete modelos matemáticos, Orskov e McDonald, France, Gompertz, exponencial e logístico, estes simples e bicompartimentados, concluíram que o modelo bicompartimentado logístico e exponencial apresentaram maior acurácia no ajuste da curva de produção de gases de alimentos tropicais, maiores Coeficiente de Correlação e Concordância (CCC) e  $R^2$ . Calabrò et al. (2005) obtiveram valores de  $R^2$  altos para os modelos exponencial, France, Gompertz e logístico, mas afirmaram que este parâmetro não poderia ser utilizado como único critério na avaliação dos modelos, pois verificaram que apenas um deles mostrou-se adequado em descrever o perfil de produção de gases.

**Tabela 2** - Médias do quadrado médio do erro (QME), do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do desvio médio absoluto (DMA) obtidas a partir dos ajustes dos dados de produção de gases da matéria seca com os modelos logístico, Gompertz, exponencial e France

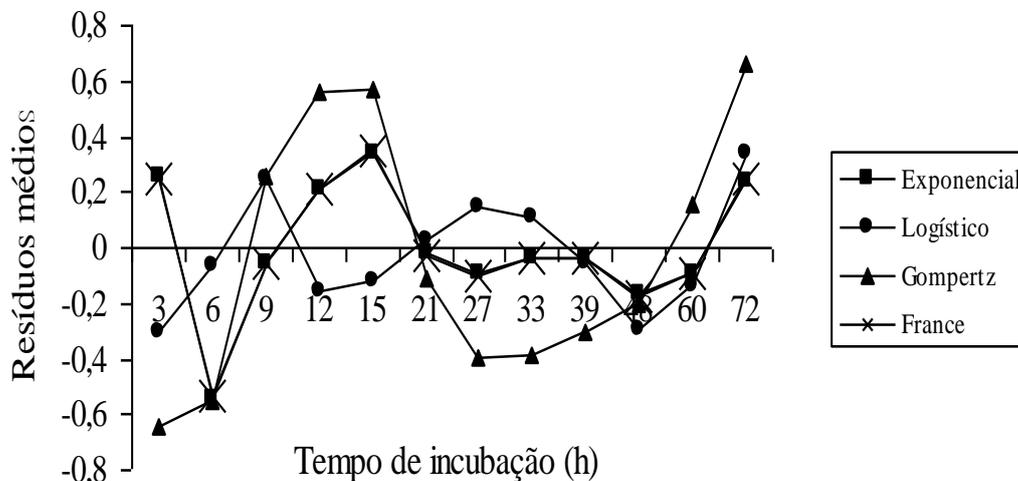
Modelo	QME	$R^2$	DMA
Logístico	148,29	0,95	9,43
Gompertz	177,15	0,94	10,51
exponencial	150,55	0,94	9,60
France	150,55	0,94	9,59

Os valores do DMA foram muito próximos para os modelos logístico, exponencial, e France, sendo menor valor obtido com o logístico. O modelo Gompertz foi o que apresentou maior DMA. Na Figura 1 estão apresentados os gráficos das dispersões temporais médias dos resíduos para os quatro modelos.

Houve alternância no ajuste da estimativa dos valores da taxa de produção de gases ao longo do tempo quando se utilizou o modelo logístico. Nas primeiras 6 h de incubação, entre 12 e 15 h e entre 39 e 60 h os valores foram superestimados. Uma subestimativa da produção de gases foi verificada às 9 h, entre 21 e 33 h e às 72 h. Aproximadamente às 21 h, a taxa de produção de gases predita foi igual à observada.

A mesma variação no ajuste foi verificada para o modelo Gompertz. Nas primeiras 6 h de incubação e entre 21 e 48 h observou-se uma superestimativa dos valores e entre 9 e 15 h e entre 60 e 72 h uma subestimativa. Este modelo foi o menos preciso em prever o volume de gases produzidos ao longo do tempo.

**Figura 1** – Dispersões temporais dos resíduos obtidos dos dados médios de produção de gases (mL de gases/g de MS) pelos modelos logístico, Gompertz, exponencial e France.

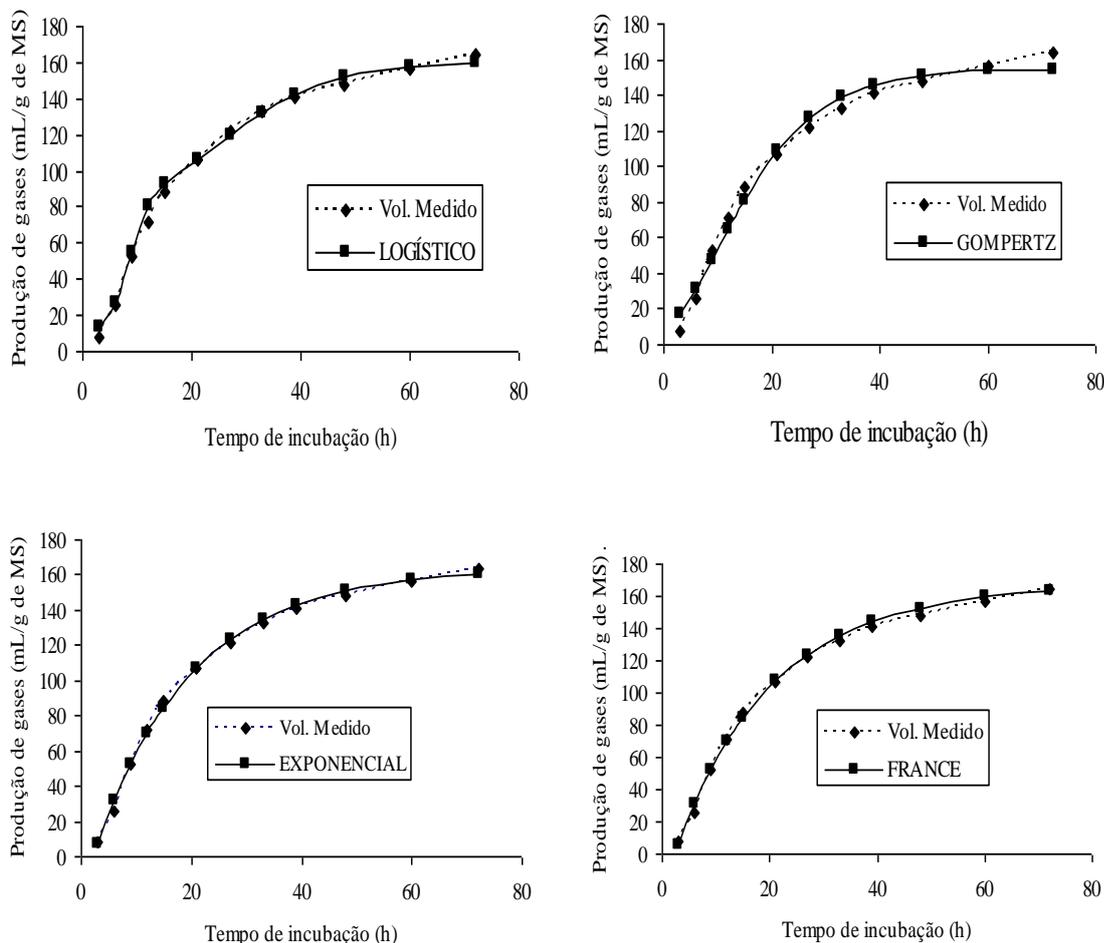


Os modelos exponencial e France apresentaram comportamentos semelhantes ao longo do tempo. Nas três primeiras horas de incubação houve uma subestimativa da produção de gases e às 6 h uma superestimativa. No período compreendido entre 9 e 48 h constatou-se comportamento similar ao observado para o modelo Gompertz, com a vantagem de apresentarem menores valores de dispersões. Às 60 h os valores preditos pelos modelos superestimaram e às 72 h subestimaram a taxa de produção de gases.

Com base nos gráficos de dispersões, pode-se verificar que o modelo logístico foi o que melhor predisse as taxas de produção de gases e o modelo Gompertz foi o que obteve menor capacidade de ajuste em relação aos demais. Nogueira et al. (2004) avaliando cinco genótipos de sorgo obtiveram menor capacidade de ajuste para o modelo exponencial. Atribuíram isto ao fato deste modelo considerar que, logo após o tempo de colonização, o alimento é fermentado rapidamente a uma taxa de fermentação elevada, o que não ocorre com as plantas forrageiras que apresentam diferentes tipos de tecidos com composição e taxas de degradações distintas.

Na Figura 2 encontram-se os gráficos da produção cumulativa de gases obtidos a partir dos dados observados e dos ajustados pelos quatro modelos para a matéria seca do clone CP 76.

**Figura 2** – Curvas de produção cumulativa de gases da matéria seca do pseudofruto de cinco clones de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) a partir da média dos dados observados e dos ajustados por quatro modelos para o clone CP 76.



As curvas de produção de gases apresentaram forma sigmoidal ao longo do tempo, podendo ser divididas em uma fase inicial de baixa produção de gases, uma fase exponencial de rápida produção de gases e uma fase assíntota de baixa ou nula produção de gases.

Os modelos logístico, exponencial e France ajustaram-se a todas as etapas do processo fermentativo e mostraram-se adequados em descrever as características de fermentação do material avaliado, tanto na fase inicial como na final. Já o modelo Gompertz não apresentou um ajuste adequado na parte inicial da curva e ao longo do tempo, superestimando a produção de gases nas primeiras horas de incubação e subestimando a assíntota.

Santos et al. (2019) relataram que a adequação do modelo matemático não é fácil, e que a combinação de modelos pode favorecer os ajustes na produção *in vitro* de gases, diminuindo as diferenças nos resultados encontrados. Noguera et al. (2004), ao trabalhar com cinco genótipos de sorgo, obtiveram para o modelo Gompertz melhor ajuste dos dados de produção de gases em relação aos modelos logístico, exponencial e France. Segundo esses autores, o modelo exponencial não seria o mais apropriado para descrever a cinética de produção de gases de forrageiras por considerá-las como uma unidade uniforme com uma taxa de degradação constante ao longo do tempo. Como a parede celular das forrageiras apresenta uma fração solúvel de rápida fermentação, uma fração lentamente degradada e uma fração não fermentável, as interações e a proporção de cada uma destas frações nas plantas forrageiras determina a taxa e extensão de fermentação ruminal. Para Beuvink e Kogut (1993), o modelo exponencial não apresenta um bom ajuste aos dados de produção de gases quanto se avalia forrageiras por assumir que após o tempo de colonização o alimento é fermentado a uma taxa constante.

Existe grande variação entre os modelos no ajuste da curva de produção de gases. Os mais usados são o logístico uni ou bicompartimental (SANTOS et al., 2019; CABRAL et al., 2019; MELLO et al., 2006), o France (MAURÍCIO et al., 2003; BUENO et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2006), e o Gompertz (NOGUERA et al., 2005). A utilização de um ou outro modelo depende, em grande parte, do tipo de substrato em estudo e das condições experimentais. O bom ajuste dos dados deste trabalho com o modelo exponencial pode ser atribuído ao baixo percentual da parede celular, cujo valor médio foi de 37,7% e máximo de 43,7%, além da elevada proporção de carboidratos solúveis.

O QME, o  $R^2$  e o DMA dos modelos estudados para descrever a produção de gases oriundos da fermentação ruminal da fração FDN encontram-se na Tabela 3.

Quanto ao QME, o modelo France foi o que apresentou menor valor, seguido pelo logístico, exponencial e Gompertz. Os valores de  $R^2$  foram baixos para todos os modelos, sendo menor valor observado para o Gompertz. Santos et al. (2019) relataram que quanto maior o  $R^2$  e menor os valores de QME e DMA, mais eficiente será o ajuste do modelo. Schofield et al. (1994), comparando alguns modelos para descrever a cinética da digestão da fibra, obtiveram valores elevados de  $R^2$  para o logístico e o Gompertz, com menor valor para o primeiro. Os desvios médios absolutos (DMA)

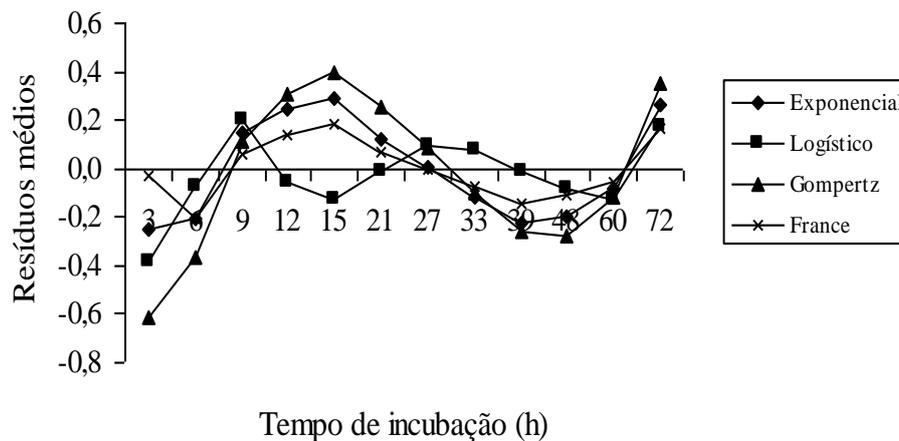
diferiram entre os modelos, com o Gompertz apresentando valor mais elevado e o de France, menor valor para produção de gases da fração FDN.

**Tabela 3** – Médias do quadrado médio do erro (QME), do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do desvio médio absoluto (DMA) obtidas a partir dos ajustes dos dados de produção de gases da fração FDN com os modelos logístico, Gompertz, exponencial e France

Modelo	QME	$R^2$	DMA
logístico	110,66	0,78	8,13
Gompertz	119,32	0,76	8,78
exponencial	112,38	0,78	8,18
France	109,66	0,78	7,89

Na Figura 3 estão apresentados os gráficos das dispersões temporais médias dos resíduos para os quatro modelos em relação aos valores observados depois do ajuste dos dados de produção de gases pelos modelos.

**Figura 3** – Dispersões temporais dos resíduos obtidos depois dos ajustes dos dados médios de produção de gases da fração FDN (mL de gases/g de FDN) pelos modelos logístico, Gompertz, exponencial e France.



Os modelos Gompertz, exponencial e France superestimaram a produção de gases nas primeiras 6 h, sendo o modelo Gompertz o menos preciso em prever o volume de gases na fase inicial. No período compreendido entre 9 e 27 h observou-se uma subestimativa dos valores pelo modelo Gompertz. Às 27 h o modelo exponencial e de France apresentaram um bom ajuste, mas às 33 e 60 h sobrestimaram a taxa de produção de gases e às 72 h subestimaram.

Velho et al. (2014) concluíram que o melhor ajuste para descrever a cinética de produção de gases *in vitro* em forragens de milho foi o Gompertz em incubações com 24 e 48 h, diferentemente do presente trabalho, provavelmente devido as características bromatológica dos alimentos alterem os substratos da fermentação ruminal e consequentemente o acúmulo de gases na fase inicial e final.

Nas primeiras 9 h de incubação o modelo logístico apresentou o mesmo comportamento observado para os demais modelos. Entre 12 e 15 h e entre 48 e 60 h houve uma superestimativa das taxas de produção de gases. Às 21 h e às 39 h apresentou um bom ajuste dos dados e entre 27 e 33 h e às 72 h subestimou os valores. O modelo France foi o que apresentou menores valores de dispersões na fase inicial e ao longo do tempo.

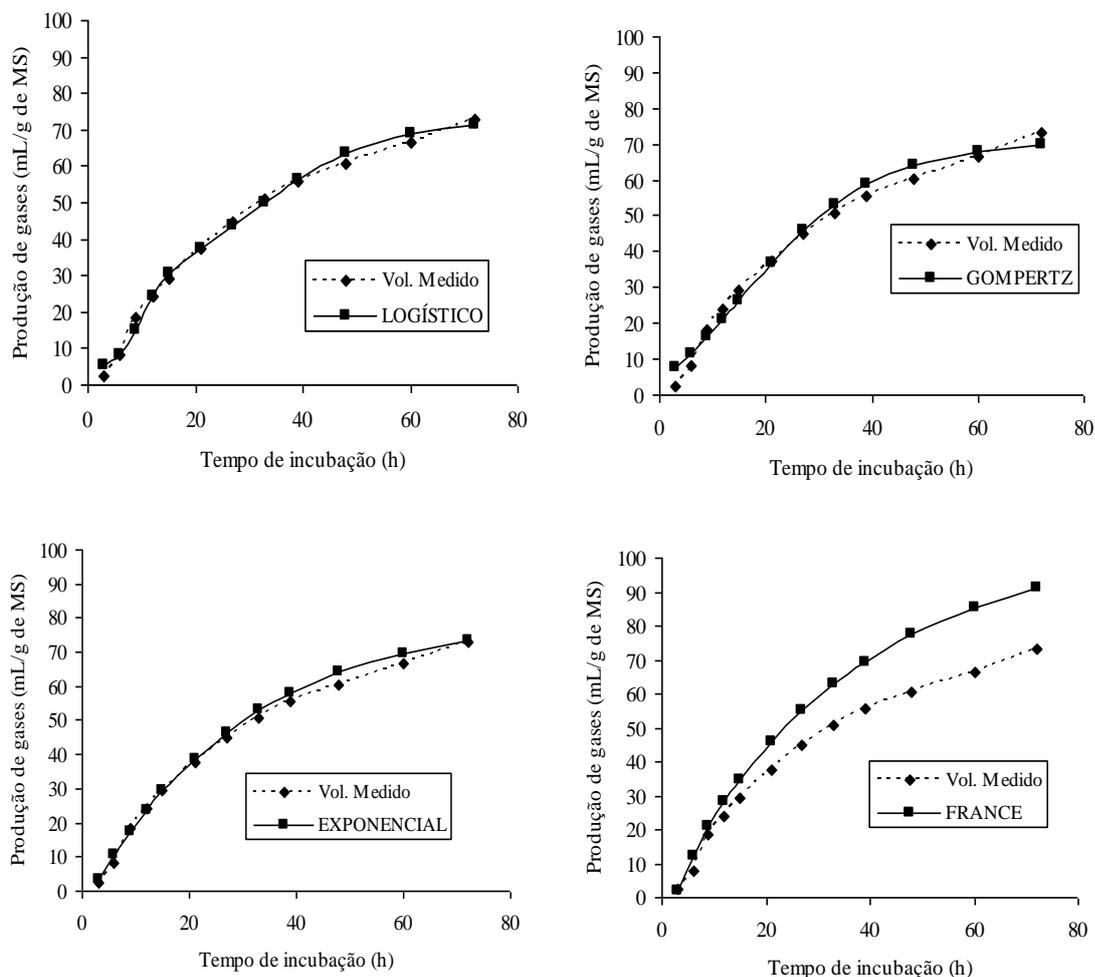
Na Figura 4 encontram-se os gráficos das produções cumulativas de gases obtidos a partir dos dados observados e dos ajustados pelos quatro modelos para a fração FDN do clone BRS 189.

Os modelos que apresentaram melhor capacidade de ajuste ao longo do tempo foram o logístico e o exponencial. O modelo Gompertz foi o que mais superestimou a taxa de produção de gases no tempo inicial. O modelo France apresentou menor capacidade de ajuste em relação aos demais, superestimando amplamente a produção de gases ao longo do tempo e na assíntota.

Apesar do bom ajuste do modelo France apresentado na Tabela 3, a análise gráfica não demonstrou isto, possivelmente devido a problemas quanto à convergência para 40% dos dados. Os modelos logístico e exponencial também apresentaram problemas quanto à convergência dos dados em 35% e 25%, respectivamente.

De forma similar Farias et al. (2011), observaram que o modelo Gompertz apresentou maior desvio médio. No entanto, neste experimento apesar de ter apresentado maior dispersão do resíduo, assim como valores mais elevados para o QME e o DMA, foi o que melhor estimou a curva de produção de gases, possivelmente devido a 100% de convergência dos dados, corroborando com Sarmiento et al. (2006) ao afirmarem que a diferença em qualidade de ajuste não supera a dificuldade em atingir a convergência. Noguera et al. (2005) utilizaram este modelo para descrever a cinética de fermentação dos carboidratos estruturais e não estruturais em sorgo para forragem por apresentar melhor capacidade de ajuste na estimativa dos parâmetros da curva de produção de gases. Desta forma, os modelos matemáticos têm papel bastante útil para contribuição em nível de pesquisa para efeitos ambientais e produção de ruminantes (DOUGHERTY et al., 2019), principalmente para fermentação ruminal e produção de gases.

**Figura 4** - Curvas de produção cumulativa de gases da fração FDN do pseudofruto de cinco clones de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) a partir da média dos dados observados e dos ajustados por quatro modelos para o BRS 189.



#### 4 CONCLUSÕES

Todos os modelos apresentam vantagens e desvantagens de ajuste. A escolha de um modelo na avaliação de alimentos para ruminantes através da técnica *in vitro* de produção de gases deve considerar os parâmetros de validação do modelo e a convergência dos dados.

Os modelos logístico, exponencial e France mostraram-se mais adequados em descrever a cinética de produção de gases da matéria seca do pseudofruto do caju em relação ao Gompertz. Entretanto, este descreveu melhor a cinética de fermentação ruminal da fração FDN.

#### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq/FINEP, pela bolsa de estudo concedida ao primeiro autor e pelo apoio financeiro necessários à condução da pesquisa.

À Embrapa Agroindústria Tropical pelo fornecimento das amostras.

À equipe de trabalho, Adeline de Andrade Carvalho, Alessandra Lima Barbosa, Bruno Ítalo Sousa Pinto, José Cardoso de Araújo Neto e Maurílio Souza dos Santos.

## REFERÊNCIAS

- BAIA, R.T. et al. Inverse problem for estimating and optimization of parameters of batch ethanol fermentation process using Bayesian techniques. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.5, p.26496-26516, 2020.
- BATEKI, C.A.; CADISCH, G.; DICKHOEFER, U. Modelling sustainable intensification of grassland-based ruminant production systems: A review. **Global Food Security**, v.23, p.85-92, 2019.
- BEUVINK, J.M.W.; KOGUT, J. Modeling gas production kinetics of grass silages incubated with buffered ruminal fluid. **Journal of Animal Science**, v.71, n.4, p.1041-1046, 1993.
- BEUVINK, J.M.W.; SPOELSTRA, S.F.; HOGENDORP, R.J. An automated method for measuring time-course of gas production of feedstuffs with buffered rumen fluid. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.40, n.4, p.401-407, 1992.
- BUENO, I.C.S. et al. Influence of inoculum source in a gas production method. **Animal Feed Science and Technology**, v.123, p.95-105, 2005.
- CABRAL, I.S. et al. Evaluation of models utilized *in vitro* gas production from tropical feedstuffs. **Semina: Ciências Agrárias**, v.40, n.1, p.443-456, 2019.
- CALABRÒ, S. et al. Comparative analysis of gas production profiles obtained with buffalo and sheep ruminal fluid as the source of inoculum. **Animal Feed Science and Technology**, v.123, p.51-65, 2005.
- CANUL-SOLIS, J. R. et al. Effect of the source and concentration of saponins on *in vitro* and ruminal methane production. **Archivos de Zootecnia**, v.68, n.263, 2019.
- CAVALCANTE, A. M. M. et al. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos da algaroba/Models of prediction of drying kinetics of algaroba grains. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.3, p.11192-11209, 2020.
- DOUGHERTY, H.C., et al. Modeling production and environmental impacts of small ruminants—Incorporation of existing ruminant modeling techniques, and future directions for research and extension. **Applied Animal Science**, v.35, n.1, p.114-129, 2019.
- FANT, P. et al. Effects of different barley and oat varieties on methane production, digestibility, and fermentation pattern *in vitro*. **Journal of Dairy Science**, v.103, n.2, p. 1404-1415, 2020.
- FARIAS, L.N. et al. Avaliação de bicompartimental logístico e Gompertz matemáticos para estimar a produção de gás a partir de babassu (*Orbignya martiana*) meal e pie usando a técnica automatizada *in vitro*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.63, n.1, p.136-142, 2011.
- FEITOSA, T.R.M.; SOUSA, L.F. Predição do volume através da pressão em ensaio de produção de gases e implicações relacionadas a diferentes altitudes. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.63, 2020.

- FRANCE, J. et al. A model to interpret gas accumulation profiles associated with *in vitro* degradation of ruminant feeds. **Journal of Theoretical Biology**, v.163, n.1, p.99-111, 1993.
- FRANCE, J. et al. 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**, v.83, n.2, p.143-150, 2000.
- LAVRENCIC, A.; STEFANON, B.; SUSMEL, P. An evaluation of the Gompertz model in degradability studies of forage chemical components. **Animal Science**, v.64, n.3, p.423-431, 1997.
- MAURICIO, R.M. et al. A semi-automated *in vitro* gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. **Animal Feed Science and Technology**, v.79, n.4, p.321-330, 1999.
- MAURICIO, R.M. et al. Comparison of bovine rumen liquor and bovine faeces as inoculum for an *in vitro* gas production technique for evaluating forages. **Animal Feed Science and Technology**, v.89, n.1-2, p.33-48, 2001.
- MAURICIO, R.M. et al. Potencial da Técnica *in vitro* Semi-Automática de Produção de Gases para Avaliação de Silagens de Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, n.4, p.1013-1020, 2003.
- MELLO, R. et al. Composição química, digestibilidade e cinética de degradação ruminal das silagens de híbridos de girassol em diferentes épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.4, p.1523-1534, 2006.
- MELLO, R. et al. Modelos para ajuste da produção de gases em silagens de girassol e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.2, p.261-269, 2008.
- MIN, B.R. et al. Dietary mitigation of enteric methane emissions from ruminants: A review of plant tannin mitigation options. **Animal Nutrition**, v.6. p.231-246, 2020.
- NOGUEIRA, U.T.; MAURÍCIO, R.M.; GONÇALVES, L.C. Comparação de substratos com diferentes quantidades de carboidratos solúveis utilizando a técnica *in vitro* semi-automática de produção de gases. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.58, n.4, p.633-641, 2006.
- NOGUERA, R.R. et al. Utilização da técnica de produção de gás para determinar a cinética de fermentação dos carboidratos estruturais e não estruturais em sorgo para forragem. **Livestock Research for Rural Development**, v.17, n.5, 2005.
- NOGUERA, R.R.; SALIBA, E.O.; MAURICIO, R.M. Comparación de modelos matemáticos para estimar los parámetros de degradación obtenidos a través de la técnica de producción de gas. **Research for Rural Development**, v.16, n 11, 2004.
- OLIVEIRA, V.S. et al. Estratégias para mitigar a produção de metano entérico. **Veterinária Notícias**, v.23, n.1, p.39-70, 2017.
- OLIVO, P.M. et al. Assessing the nutritional value of agroindustrial co-products and feed through chemical composition, *in vitro* digestibility, and gas production technique. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**. v.39, n.3, p. 289-295, 2017.
- ØRSKOV, E.R.; MCDONALD, I. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. **The Journal of Agricultural Science**, v.92, n.2, p.499-503, 1979.

- PEDRAZA-HERNÁNDEZ, J. et al. Mitigation of ruminal biogases production from goats using *Moringa oleifera* extract and live yeast culture for a cleaner agriculture environment. **Journal of Cleaner Production**, v.234, p.779-786, 2019.
- PELL, A.N.; SCHOFIELD, P. Computerized monitoring of gas production to measure forage digestion *in vitro*. **Journal of Dairy Science**, v.76, n.4, p.1063-1073, 1993.
- SANTO, A.X. et al. Fracionamento de carboidratos e proteínas, cinética de degradação ruminal *in vitro* pela técnica de produção de gás, de rações suplementares contendo torta de girassol. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.69, n.1, p.234-242, 2017.
- SANTOS, A. L.P. et al. Generation of models from existing models composition: An application to agrarian sciences. **Plos One**, v.14, n.12, p.1-12, 2019.
- SANTOS, A. L.P. et al. New model of evaluation of sunflower and corn silages by the *in vitro* gas production technique. **Semina: Ciências Agrárias**, v.41, n.4, p.1373-1384, 2020.
- SARMENTO, J.L.R. et al. Estudo da curva de crescimento de ovinos Santa Inês. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.2, p.435-442, 2006.
- SCHOFIELD, P.; PITT, R.E.; PELL, A.N. Kinetics of fiber digestion from *in vitro* gas production. **Journal of Animal Science**, v.72, n.11, p.2980-2991, 1994.
- SILVA, D.J.; QUEIROZ, A.C. **Análise de Alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2002.
- SILVA, T.C. et al. Cinética de fermentação ruminal *in vitro* de silagens de híbridos de sorgo. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.66, n.6, p.1865-1873, 2014.
- TEIXEIRA, U.H.G. et al. Modelos matemáticos para estimação dos parâmetros da cinética de degradação ruminal de concentrados protéicos1. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.1, p. 73-85, 2016.
- THEODOROU, M.K. et al. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. **Animal Feed Science and Technology**, v.48, n.3-4, p.185-197, 1994.
- VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J.B.; LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, v.74, n.10, p.3583-3597, 1991.
- VELHO, J.P. et al. Modelos matemáticos para ajuste da produção de gases *in vitro* em diferentes tempos de incubação e cinética ruminal de silagens de milho. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.4, p.2531-2539, 2014.