



**MARIA ALICE JUNQUEIRA GOUVÊA SILVA**

**ENERGIA METABOLIZÁVEL DE ALIMENTOS PARA  
FRANGOS DE CORTE DETERMINADOS *IN VIVO* E POR  
MÉTODOS INDIRETOS**

**LAVRAS-MG  
2024**

**MARIA ALICE JUNQUEIRA GOUVÊA SILVA**

**ENERGIA METABOLIZÁVEL DE ALIMENTOS PARA FRANGOS DE CORTE  
DETERMINADOS *IN VIVO* E POR MÉTODOS INDIRETOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Produção e Nutrição de Não Ruminantes, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Paulo Borges Rodrigues  
Orientador

Profa. Dra. Renata Ribeiro Alvarenga  
Coorientadora

Prof. Dr. Renato Ribeiro de Lima  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Silva, Maria Alice Junqueira Gouvêa.

Energia metabolizável de alimentos para frangos de corte  
determinados *in vivo* e por métodos indiretos / Maria Alice  
Junqueira Gouvêa Silva. - 2024.

174 p.

Orientador(a): Paulo Borges Rodrigues.

Coorientador(a): Renata Ribeiro Alvarenga, Renato Ribeiro de  
Lima.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Frangos de corte. 2. Valor energético. 3. Aplicativo AMEn  
Predictor. I. Borges Rodrigues, Paulo. II. Ribeiro Alvarenga,  
Renata. III. Ribeiro de Lima, Renato. IV. Título.

**MARIA ALICE JUNQUEIRA GOUVÊA SILVA**

**ENERGIA METABOLIZÁVEL DE ALIMENTOS PARA FRANGOS DE CORTE  
DETERMINADOS *IN VIVO* E POR MÉTODOS INDIRETOS**

**METABOLIZABLE ENERGY OF FEEDSTUFFS FOR BROILERS DETERMINED  
IN VIVO AND BY INDIRECT METHODS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Produção e Nutrição de Não Ruminantes, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 30 de Setembro de 2024.

|   |          |
|---|----------|
| Profa. Dra. Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano | UNIFESP  |
| Prof. Dr. Germano Augusto Jerônimo do Nascimento    | UFPB     |
| Profa. Dra. Luciana de Paula Naves                  | UFLA     |
| Dr. Antônio de Pádua Lima                           | FAGAMMON |

Documento assinado digitalmente



**PAULO BORGES RODRIGUES**

Data: 13/11/2024 15:05:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Paulo Borges Rodrigues  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2024**

*À minha mãe Maria Aparecida pelo apoio e carinho em todas as etapas e por ser o meu maior exemplo de vida.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Uma grande jornada é formada por desafios diários que nos esforçamos muito para serem superados, sejam eles grandes ou pequenos é importante a superação de cada um deles.

Agradeço à Deus, ao Beato Padre Victor, a “Mãezinha do Carmelo” e a Santa Teresinha, por terem feito com que meu destino tenha me levado a ter determinação e coragem para concluir esse curso de doutorado em Zootecnia, no Programa de Pós – Graduação da Universidade Federal de Lavras (UFLA), um dos mais qualificados do país.

Agradeço à minha mãe, Maria Aparecida Junqueira Gouvêa e ao meu noivo Jerri Marcos Vitorino, pelo apoio, incentivo e conselhos a mim dados para nunca perder a fé, mesmo nos momentos de dificuldade e foi assim que consegui realizar meu sonho.

Agradeço aos meus colegas de pós-graduação e graduação, juntos passamos muitos momentos e tive o privilégio de me tornar amiga de pessoas que levarei em meu coração por onde eu for.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Paulo Borges Rodrigues, por me mostrar a importância do trabalho constante, da responsabilidade e por todo auxílio que me deu durante a fase experimental até a conclusão desta tese.

Agradeço aos professores colaboradores deste trabalho, em especial aos professores Dra. Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano e Dr. Renato Ribeiro de Lima que me auxiliaram em todas as análises estatísticas.

Agradeço o Sr. Leônidas e o Sr. Aparecido que me ajudaram durante a fase experimental no setor de Avicultura e na fábrica de ração da UFLA, e aos demais funcionários da instituição, que direta ou indiretamente fizeram com que eu pudesse chegar aonde eu cheguei e ainda chegarei.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio financeiro do projeto.

Muito obrigada!

## **AUTOBIOGRAFIA**

**Maria Alice Junqueira Gouvêa Silva** – nascida em 10 de março de 1991, na cidade de Lavras, Minas Gerais, filha de Maria Aparecida Junqueira Gouvêa e Elias Pereira da Silva.

Ingressou, em agosto de 2010, no curso de Zootecnia na Universidade Federal de Lavras (UFLA), graduando-se em março de 2017.

Em agosto de 2017, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Construções Rurais e Ambiente, na Universidade Federal de Lavras, obtendo o título de Mestre em julho de 2019.

Em março de 2020, iniciou o curso de doutorado em Zootecnia, na Universidade Federal de Lavras, concentrando seus estudos na área de Nutrição e Produção de Não Ruminantes.

Em 30 de setembro de 2024, submeteu-se à defesa de tese para a obtenção do título de Doutora.

## RESUMO

O objetivo neste estudo foi atualizar o banco de dados que gerou o aplicativo *AMEn Predictor*, obter novos modelos de predição de energia metabolizável aparente corrigida por nitrogênio (EMAn) e, posteriormente, validar o aplicativo e os métodos indiretos atualizados para predizer os valores de EMAn do milho (M), farelo de trigo (FT), farelo de soja (FS) e farinhas de carne e ossos (FCOs), utilizados nas dietas de frangos de corte. Para a atualização do banco de dados, foi realizada uma revisão bibliográfica de estudos nacionais e internacionais, no período de 1986 a 2023, para catalogar informações sobre valores de EMAn e composição química (proteína bruta; extrato etéreo; matéria mineral; fibra bruta, fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido, cálcio e fósforo) dos alimentos de origem vegetal e animal, buscando-se obter modelos de predição de EMAn desses alimentos, utilizando a composição química dos mesmos. Foram verificadas as correlações entre os componentes químicos dos alimentos e a EMAn e, posteriormente, determinadas equações de regressão linear múltipla (RLM) e modelos de redes neurais artificiais (RNAs) para diferentes categorias de alimento (energéticos, proteicos ou concentrados em geral), por meio da meta-análise. Para selecionar os melhores modelos de RLM foi utilizado o critério de Akaike obtido pelo procedimento de *stepwise* e, para a RNA, foi feita a análise simultânea de critérios de adequabilidade para os conjuntos de treinamento, teste e validação para cada rede implementada. Para a validação, foram conduzidos dois experimentos de metabolismo (*in vivo*) com frangos de corte em crescimento (15 a 23 dias de idade) e na fase final de criação (36 a 42 dias de idade). Foram determinadas a EMAn de amostras de M, FS, FT, FCO e mistura entre as FCOs. Também foram realizadas as análises laboratoriais para a determinação da composição química dos alimentos testados, a qual foi utilizada no cálculo da EMAn pelos métodos indiretos propostos. A análise estatística foi feita por meio do ajustamento de equação de regressão linear simples de valores observados *in vivo* sobre os valores estimados por cada método indireto. Para os alimentos de origem vegetal, apenas as equações de RLM não estimaram satisfatoriamente os valores de EMAn dos alimentos testes. Para os alimentos de origem animal, todas as equações de RLM demonstraram-se eficazes para estimar a EMAn dos alimentos testes. Conclui-se que o *AMEn Predictor* e a RNA (MLP 10-5-3-1) podem ser utilizados para estimar, de forma satisfatória, a EMAn de alimentos de origem vegetal, e a equação  $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$  foi a mais indicada para estimar o valor energético dos alimentos de origem animal utilizados para frangos de corte.

**Palavras-chave:** Aves; *AMEn Predictor*; Coleta total; Valor energético.

## ABSTRACT

The objective of this study was to update the database that generated the AMEn Predictor application, obtain new AMEn Prediction models and, subsequently, validate the application and the updated indirect methods to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy (AMEn) values of corn (C), wheat bran (WB), soybean meal (SBM) and meat and bone meal (MBM), used in broiler diets. To update the database, a bibliographic review of national and international studies was carried out, from 1986 to 2023, to catalog information on AMEn values and chemical composition (crude protein; ether extract; mineral matter; crude fiber, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, calcium and phosphorus) of foods of plant and animal origin, seeking to obtain AMEn prediction models of these foods, using their chemical composition. The correlations between the chemical components of the feedstuffs and AMEn were verified and, subsequently, multiple linear regression (MLR) equations and artificial neural network (ANN) models were determined for each food category (energy and protein), through meta-analysis. To select the best MLR models, the Akaike criterion obtained by the stepwise procedure was used and, for the ANN, a simultaneous statistical analyses of suitability criteria was performed for the training, test and validation sets for each implemented network. For validation, two metabolism experiments (*in vivo*) were conducted with broilers in growth (15 to 23 days of age) and in the final phase of rearing (36 to 42 days of age). The AMEn of samples of C, WB, SBM, MBM, and mixture between the FCOs were determined. Also, laboratory analyses for determination of chemical composition of the tested feedstuffs were performed, which were utilized in calculating AMEn by the proposed indirect methods. The statistical analysis was made by adjustment of simple linear regression of observed *in vivo* values on the estimated values by each indirect method. For plant-based foods, only the RLM equations did not satisfactorily estimate the AMEn values of the test feedstuffs. For animal-based foods, all RLM equations were effective in estimating the AMEn of the test foods. It was concluded that the AMEn Predictor and ANN (MLP 10-5-3-1) can be used to satisfactorily estimate the AMEn of plant-based foods, and the equation  $AMEn = 3172.5776 + 57.7278EE - 45.5500MM + 8.0873Ca - 31.4115P$  was the most suitable for estimating the energy value of animal-based foods used for broilers.

**Keywords:** AMEn Predictor; Broilers; Energy value; Total collection.

## IMPACTOS SOCIAIS, TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E CULTURAIS

Para que os frangos de corte possam expressar seu máximo potencial produtivo sem elevar os custos de produção, é importante formular rações balanceadas que atendam às suas exigências nutricionais adequadamente. Para viabilizar isso, é fundamental conhecer a composição química e energética dos alimentos utilizados nessas formulações. Na nutrição avícola, a energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn) é amplamente adotada para expressar o conteúdo energético dos alimentos. É notável que a produção brasileira fornece uma grande variedade de alimentos que podem ser incorporados às rações para frangos de corte, especialmente em períodos de oscilação nos preços do milho e do farelo de soja. Com isso, espera-se uma grande variabilidade nos valores de EMAn dos alimentos utilizados nessas rações, havendo a necessidade da atualização constante dos dados de composição dos alimentos. Para mitigar esse problema, os métodos indiretos para estimar a EMAn, destacando-se as equações de predição, obtidas utilizando-se a técnica de meta-análise e as redes neurais artificiais (RNAs), têm se demonstrado promissoras. Nesse sentido, foi desenvolvido o aplicativo *AMEn Predictor*, que dispõe de um modelo de RNA aliado à técnica de meta-análise para a obtenção de valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal destinados às dietas avícolas, baseando-se apenas na composição química dos mesmos. Contudo, destaca-se que o referido aplicativo foi criado com dados referentes à determinação da EMAn e composição química dos alimentos para aves, publicados em periódicos nacionais e catalogados até o ano de 2007. Assim, este trabalho tem como objetivo atualizar as informações que deram origem ao *AMEn Predictor* até o ano de 2023, e obter novas equações utilizando o princípio da meta-análise, os métodos de regressão linear múltipla e de RNAs para estimar os valores de EMAn, considerando a composição química dos alimentos concentrados de origem vegetal e animal usados nas dietas para aves. Portanto, os resultados desta pesquisa visam disponibilizar para os nutricionistas avícolas modelos de predição atualizados que possibilitem a determinação da EMAn dos alimentos utilizados nas rações de frangos de corte de forma rápida, acurada e menos onerosa, quando comparado aos biosensaios. Nesse contexto, as inovações tecnológicas, como o uso do aplicativo *AMEn Predictor* e de modelos de predição de EMAn, que visam aprimorar a formulação de ração para aves, podem reduzir a quantidade de ração necessária por unidade de carne produzida, otimizando as taxas de conversão alimentar e a utilização de nutrientes pelos animais, além de minimizar o desperdício de ração e os impactos ambientais. Assim, os resultados do presente trabalho buscam otimizar a utilização dos alimentos na formulação de rações para aves, impactando de forma significativa o trabalho de nutricionistas e produtores avícolas.

## **SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS**

In order for broilers to perform at their maximum productive potential without increasing production costs, it is important to formulate balanced rations that meet the nutritional requirements of the broilers. To make this possible, it is essential to know the chemical and energy composition of the feeds used in these formulations. In poultry nutrition, apparent metabolizable energy corrected for nitrogen balance (AMEn) is widely used to express the energy content of feed. It is noteworthy that Brazilian production provides a wide variety of feeds that can be incorporated into broiler rations, especially in periods of fluctuating corn and soybean meal prices in the regional market. As a result, a great deal of variability can be expected in the AMEn values of the feedstuffs used in these rations, making it necessary to constantly update feed composition data. To mitigate this problem, indirect methods for estimating AMEn, such as prediction equations obtained using the meta-analysis technique and artificial neural networks (ANNs), have proved promising. With this in mind, the AMEn Predictor application was developed, which uses an ANN model combined with the meta-analysis technique to obtain AMEn values for plant-based feedstuffs intended for poultry diets, based solely on their chemical composition. However, it should be noted that this application was created using data on the determination of AMEn and the chemical composition of poultry feed, published in national journals and catalogued to 2007. Therefore, the objective of this study is to update the information that gave rise to AMEn Predictor up to the year 2023, and to obtain new equations using the principle of meta-analysis, multiple linear regression and ANN methods to estimate AMEn values, taking into account the chemical composition of concentrated plant and animal feed used in poultry diets. Therefore, the results of this research aim to provide poultry nutritionists with up-to-date prediction models that make it possible to determine the AMEn of the feedstuffs used in broiler diets quickly, accurately and less expensively when compared to bioassays. In this context, technological innovations, such as the use of the AMEn Predictor application and AMEn prediction models, which aim to improve poultry feed formulation, can reduce the amount of feed required per unit of meat produced, optimizing feed conversion rates and nutrient use animals, as well as minimizing feed waste and environmental impacts. Thus, the results of this work seek to optimize the use of food in the formulation of poultry feed, significantly impacting the work of nutritionists and poultry producers.

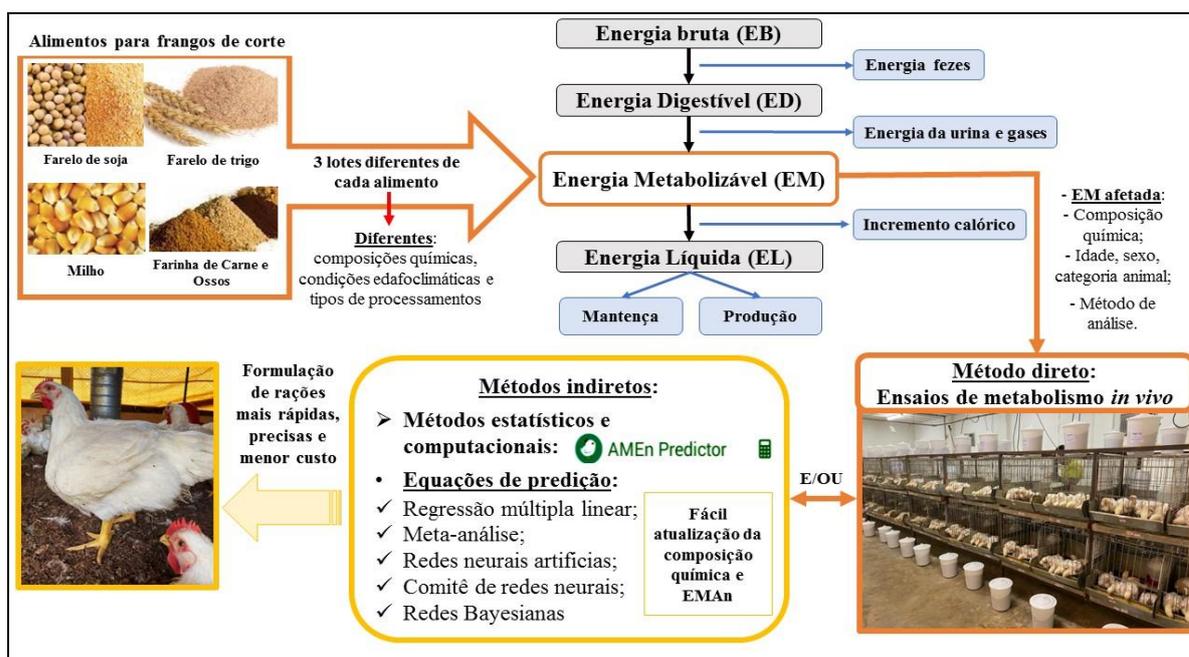
## Resumo Interpretativo e Resumo Gráfico

Elaborado por **Maria Alice Junqueira G. Silva** e orientado por **Paulo Borges Rodrigues**

A formulação de rações balanceadas para as aves permite o planejamento adequado da alimentação e evita gastos desnecessários, promovendo o êxito da atividade avícola. Para isso, entretanto, é necessário o conhecimento da composição química e energética dos alimentos. Para as aves a energia presente nos alimentos é quantificada pela energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn) e seus valores são influenciados por características inerentes aos alimentos e às aves como, por exemplo, a composição química e processamento dos alimentos, a idade e o sexo dos animais. A determinação *in vivo* da energia metabolizável é considerada o método mais preciso para obtenção de valores energéticos. Porém, isso requer tempo, mão-de-obra treinada, salas de metabolismo e laboratórios bem equipados, o que torna esse procedimento oneroso. Como uma alternativa aos bioensaios, métodos indiretos que utilizam modelagem matemática e computacional são promissores para a determinação do valor energético dos alimentos para aves. Nesse sentido, foi desenvolvido o aplicativo *AMEn Predictor* para prever os valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal comumente utilizados em dietas para aves.

Portanto, o objetivo neste estudo foi atualizar o banco de dados que gerou o aplicativo *AMEn Predictor*, obter novos modelos de predição de EMAn e, posteriormente, validar o modelo de RNA já existente no aplicativo e os novos modelos de predição obtidos para prever os valores de EMAn do milho, farelo de trigo, farelo de soja e farinhas de carne e ossos, comumente utilizados nas dietas de frangos de corte.

Após a atualização do banco de dados, foram propostas novas equações de regressão linear múltipla (RLM) e um modelo de rede neural artificial (RNA) do tipo MLP 10-5-3-1. Para os alimentos de origem vegetal, apenas as equações de RLM não estimaram satisfatoriamente os valores de EMAn dos alimentos testes. Conclui-se que o *AMEn Predictor* e a RNA (MLP 10-5-3-1) podem ser utilizados para estimar, de forma satisfatória, a EMAn de alimentos de origem vegetal, e a equação  $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$  foi a mais indicada para estimar o valor energético dos alimentos de origem animal utilizados para frangos de corte.



Energia metabolizável de alimentos para frangos de corte determinados *in vivo* e por métodos indiretos.

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

#### ARTIGO 1

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Número de informações cadastradas no presente estudo para realização da meta-análise, em função da composição química e valor energético dos alimentos, com base na matéria seca (MS).....  | 76 |
| Tabela 2 - Representação dos grupos e códigos aplicados para cada efeito.....  | 78 |
| Tabela 3 - Equações gerais obtidas para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados (energéticos + proteicos) de origem vegetal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS)..... | 83 |
| Tabela 4 - Equações obtidas para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados energéticos de origem vegetal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).....                      | 84 |
| Tabela 5 - Equações obtidas para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados proteicos de origem vegetal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).....                        | 86 |
| Tabela 6 - Equações obtidas para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados proteicos de origem animal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).....                         | 87 |
| Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Pearson estimados entre as variáveis de composição química dos alimentos concentrados de origem vegetal. ....   | 89 |
| Tabela 8 - Coeficientes de correlação de Pearson estimados entre as variáveis de composição química dos alimentos concentrados proteicos de origem animal. ....  | 91 |
| Tabela 9 - Estatísticas usadas para verificar a adequabilidade do ajuste e a precisão de dois modelos de redes neurais artificiais do tipo Multilayer Perceptron Network (MLP) aplicados aos dados obtidos em ensaios metabólicos com frangos de corte.....                    | 93 |

## ARTIGO 2

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Composição centesimal e calculada da ração referência utilizada durante todo o período experimental, da matéria natural (MN, %).  | 110 |
| Tabela 2 - Composição química dos alimentos testados, expressos na matéria seca (MS).  | 119 |
| Tabela 3 – Parâmetros de qualidade das farinhas de carne e ossos testadas*.  | 123 |
| Tabela 4 - Valores médios de energia metabolizável aparente (EMA, kcal kg <sup>-1</sup> ) e aparente corrigida para nitrogênio retido (EMAn, kcal kg <sup>-1</sup> ) dos alimentos energéticos e proteicos, determinados com frangos de corte em crescimento (Ensaio I - 21 a 23 dias de idade) e final (Ensaio II- 40 a 42 dias de idade), e seus respectivos erros padrões das médias (SEM). Valores expressos em matéria seca (MS).                                 | 125 |
| Tabela 5 - Valores médios do coeficiente de metabolizabilidade da matéria seca (CMMS, %) dos alimentos para frangos de corte nas fases de crescimento (Ensaio I - 21 a 23 dias de idade) e final (Ensaio II - 40 a 42 dias de idade) de criação, e seus respectivos erros padrões da média (SEM).  | 129 |
| Tabela 6 - Valores médios do coeficiente de metabolizabilidade da energia bruta (CMEB, %) dos alimentos para frangos de corte nas fases de crescimento (Ensaio I - 21 a 23 dias de idade) e final (Ensaio II - 40 a 42 dias de idade) de criação, e seus respectivos erros padrões das médias (SEM).   | 130 |
| Tabela 7 - Energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn, kcal kg <sup>-1</sup> ) de alguns alimentos energéticos e proteicos de origem vegetal, obtida por ensaio de metabolismo (ensaio I, n= 400 e ensaio II, n = 240) com frangos de corte em duas faixas etárias, e por métodos indiretos: aplicativo <i>AMEn Predictor</i> , rede neural artificial (RNA) e regressão linear múltipla (RLM). Valores expressos na matéria seca (MS). | 133 |
| Tabela 8 - Energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn, kcal kg <sup>-1</sup> ) de farinhas de carne e ossos, obtida por ensaio de metabolismo (Ensaio I: n= 400 e Ensaio II: n = 240) com frangos de corte (valores observados) e por equações de regressão linear múltipla (valores preditos). Valores expressos na matéria seca (MS).   | 136 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 9 - Estimativa do erro padrão e níveis descritivos de probabilidade para as hipóteses de nulidade para as regressões entre valores observados e previstos, dos valores de EMAn de alimentos de origem vegetal. ....                        | 137 |
| Tabela 10 - Estimativa do erro padrão e níveis descritivos de probabilidade para as hipóteses de nulidade para as redes neurais artificiais (RNAs) entre valores observados e previstos, dos valores de EMAn de alimentos de origem vegetal. .... | 139 |
| Tabela 11 - Estimativa do erro padrão e níveis descritivos de probabilidade para as hipóteses de nulidade para as regressões entre valores observados e previstos, dos valores de EMAn de alimentos de origem animal.....                         | 141 |

## **ANEXO B**

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1B - Alimentos concentrados energéticos de origem vegetal (< 18% FB e < 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023..... | 154 |
| Tabela 2B - Alimentos concentrados proteicos de origem vegetal (< 18% FB e > 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.....   | 158 |
| Tabela 3B - Alimentos concentrados proteicos de origem animal catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023. ....                         | 161 |

## LISTA DE SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| ACP     | Análise de componentes principais   |
| AFZ     | Association Française de Zootechnie   |
| AIC     | Critério de Akaike  |
| ARG     | Argentina   |
| BN      | Balanço de nitrogênio   |
| BRA     | Brasil  |
| Ca      | Cálcio  |
| CAT     | Categoria   |
| CIRAD   | Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement   |
| CNA     | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil                                      |
| CRNA    | Comitê de redes neurais artificiais   |
| CVB     | Centraal Veevoeder Bureau (Chemical composition and nutritional values of feedstuffs) |
| DDGS    | Grãos secos de destilaria de milho com solúveis                                       |
| EB      | Energia bruta   |
| ED      | Energia digestível  |
| EE      | Extrato etéreo  |
| EL      | Energia líquida   |
| EM      | Energia metabolizável   |
| EMA     | Energia metabolizável aparente  |
| EMAn    | Energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio igual a zero      |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária   |
| EMV     | Energia metabolizável verdadeira  |
| EMVn    | Energia metabolizável verdadeira corrigida pelo balanço de nitrogênio igual a zero    |
| EUA     | Estados Unidos da América   |
| FAN     | Fatores antinutricionais  |
| FAO     | Food and Agriculture Organization   |
| FB      | Fibra bruta   |
| FCO     | Farinha de carne e ossos  |

|       |  |
|-------|--|
| FDA   | Fibra em detergente ácido                                    |
| FDN   | Fibra em detergente neutro                                   |
| FEDNA | Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal |
| FS    | Farelo de soja   |
| FT    | Farelo de trigo  |
| FV    | Farinha de vísceras de aves                                  |
| HPD   | Maior densidade de probabilidade                             |
| IC    | Incremento calórico  |
| ING   | Ingrediente  |
| INRA  | Institut National de la Recherche Agronomique                |
| MAD   | Desvio absoluto médio  |
| MAPA  | Ministério da Agricultura e Pecuária                         |
| MAPE  | Erro percentual absoluto médio                               |
| MDP   | Densidade de probabilidade                                   |
| MLP   | Multilayer perceptron network                                |
| MM    | Matéria mineral  |
| MN    | Matéria natural  |
| MQP   | Mínimos quadrados parciais                                   |
| MS    | Matéria seca   |
| m.s.e | Erro quadrático médio  |
| N     | Nitrogênio   |
| NIRS  | Refletância no infravermelho próximo                         |
| NRC   | National Research Council                                    |
| P     | Fósforo  |
| PB    | Proteína bruta   |
| PNA   | Polissacarídeos não amiláceos                                |
| PCP   | Porcentagem de acertos da predição                           |
| RB    | Redes Bayesianas   |
| RLM   | Regressão linear múltipla                                    |
| RLMP  | Regressão linear múltipla ponderada                          |
| RMSE  | Erro quadrático médio  |
| RNA   | Rede neural artificial                                       |
| TGI   | Trato gastrointestinal                                       |
| WPSA  | World's Poultry Science Association                          |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PRIMEIRA PARTE</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO GERAL</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>1.1 Estrutura da tese</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | <b>24</b> |
| <b>2.1 Composição química dos alimentos destinados a criação de frangos de corte</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.2 Valores energéticos dos alimentos</b> .....  | <b>26</b> |
| <b>2.3 Fatores que afetam a energia metabolizável dos alimentos de origem vegetal e animal</b> .....  | <b>28</b> |
| <b>2.3.1 Balanço de nitrogênio e energia metabolizável aparente corrigido pela retenção de nitrogênio</b> .....   | <b>28</b> |
| <b>2.3.2 Ingredientes e composição química da dieta</b> .....   | <b>30</b> |
| <b>2.3.3 Processamento e características físico-químicas dos ingredientes e das dietas</b> .....  | <b>33</b> |
| <b>2.3.4 Fatores inerentes às aves que influenciam nos valores energéticos dos alimentos</b> .....  | <b>35</b> |
| <b>2.3.5 Consumo e nível de inclusão do alimento teste à ração referência</b> .....   | <b>36</b> |
| <b>2.3.6 Aproveitamento de nutrientes e desempenho em função dos níveis energéticos da dieta</b> .....  | <b>37</b> |
| <b>2.4 Métodos para a determinação dos valores de energia metabolizável</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>2.4.1 Modelos matemáticos de previsão e inteligência artificial para a determinação dos valores energéticos de alimentos para frangos de corte</b> ... | <b>41</b> |
| <b>2.4.2 Equação de predição: uma visão geral</b> .....   | <b>42</b> |
| <b>2.4.3 Regressão linear múltipla e meta-análise</b> .....   | <b>44</b> |
| <b>2.4.4 Redes neurais artificiais</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>2.4.5 Comitê de redes neurais</b> .....  | <b>52</b> |
| <b>2.4.6 Aplicação de redes Bayesianas</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>56</b> |
| <b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> .....  | <b>69</b> |

|              |   |            |
|--------------|---|------------|
|              | <b>ARTIGO 1 - ATUALIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS E DE MODELOS PARA A PREDIÇÃO DA ENERGIA METABOLIZÁVEL DOS ALIMENTOS PARA FRANGOS DE CORTE .....</b> | <b>69</b>  |
|              | <b>RESUMO .....</b>   | <b>70</b>  |
|              | <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>71</b>  |
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>72</b>  |
| <b>2</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>74</b>  |
| <b>2.1</b>   | <b>Informações utilizadas para a atualização das equações de predição por meio da meta-análise .....</b>  | <b>74</b>  |
| <b>2.2</b>   | <b>Metodologia empregada para realização da meta-análise.....</b>   | <b>76</b>  |
| <b>2.2.1</b> | <b>Crerios empregados para a catalogação (inclusão) das informações .....</b>   | <b>77</b>  |
| <b>2.2.2</b> | <b>Formação de grupos homogêneos de trabalhos .....</b>   | <b>77</b>  |
| <b>2.3</b>   | <b>Equações de predição de EMAn usando o princípio da meta-análise .....</b>  | <b>79</b>  |
| <b>2.3.1</b> | <b>Regressão linear múltipla.....</b>   | <b>79</b>  |
| <b>2.3.2</b> | <b>Redes neurais artificiais .....</b>  | <b>80</b>  |
| <b>3</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>82</b>  |
| <b>3.1</b>   | <b>Equações de regressão linear múltipla dos alimentos concentrados de origem vegetal e animal selecionadas neste estudo .....</b>              | <b>82</b>  |
| <b>3.2.</b>  | <b>Coefficiente de correlação dos alimentos concentrados de origem vegetal e animal .....</b>   | <b>89</b>  |
| <b>3.3</b>   | <b>Modelos de redes neurais artificiais do tipo <i>Multilayer Perceptron Network</i> para alimentos concentrados de origem vegetal .....</b>    | <b>93</b>  |
| <b>4</b>     | <b>CONCLUSÃO .....</b>  | <b>97</b>  |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>98</b>  |
|              | <b>ARTIGO 2 - VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA PREDIÇÃO DE VALORES ENERGÉTICOS DE ALIMENTOS PARA FRANGOS DE CORTE EM DIFERENTES IDADES .....</b>       | <b>103</b> |
|              | <b>RESUMO.....</b>  | <b>104</b> |
|              | <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>105</b> |
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>106</b> |
| <b>2</b>     | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>107</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Ensaio metabólicos .....</b>   | <b>107</b> |
| <b>2.1.1</b> | <b>Instalações e manejo dos animais.....</b>  | <b>108</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Delineamento experimental e dietas.....</b>  | <b>109</b> |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 2.1.3 | Procedimentos experimentais .....  | 110 |
| 2.1.4 | Parâmetros avaliados e análises laboratoriais .....  | 111 |
| 2.2   | Métodos indiretos selecionados para a predição da EMAn dos alimentos de origem vegetal e animal para frangos de corte .....  | 113 |
| 2.3   | Validação das equações e aplicativo <i>AMEn Predictor</i> .....  | 117 |
| 3     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 118 |
| 3.1   | Composição química dos alimentos .....   | 118 |
| 3.2   | Valores energéticos determinados com pintos nas fases de crescimento e final .....   | 124 |
| 3.3   | Coefficientes de metabolizabilidade de nutrientes .....  | 128 |
| 3.4   | Valores energéticos estimados por métodos indiretos e <i>in vivo</i> com frangos de corte em duas idades.....  | 132 |
| 4     | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 144 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 145 |
|       | <b>CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....  | 152 |
|       | <b>ANEXO A – Parecer comitê de ética</b> .....   | 153 |
|       | <b>ANEXO B – Referências nacionais e internacionais utilizadas para a atualização do banco de dados proposto por Nascimento (2007) e o acréscimo de referências com dados de composição química de alimentos proteicos de origem animal.</b> ..... | 154 |
|       | <b>ANEXO C - Referências bibliográficas utilizadas na meta-análise</b> .....   | 162 |

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil destaca-se entre os três maiores exportadores mundiais de produtos agrícolas e pecuários devido ao aumento da produtividade nacional de grãos, como soja e milho, carne bovina e frango *in natura* (CNA, 2024; MAPA, 2024). Assim, pode-se dizer que os produtos gerados na agropecuária são imprescindíveis para o crescimento da economia brasileira sendo a avicultura uma das principais atividades que compõem essa cadeia produtiva (CNA, 2024).

Numa visão sistêmica, comparando-se com as várias cadeias produtivas de alimentos no Brasil, o setor avícola é o que possui a atividade de produção mais dinâmica e com maior facilidade para absorver rapidamente as inovações tecnológicas de diversos ramos da ciência, como a genética, nutrição, manejo e sanidade (Schmidt; Silva, 2018).

Sabe-se que devido a especialização da avicultura, as aves tornaram-se mais produtivas e exigentes nutricionalmente. Logo, para que os animais possam expressar seu máximo potencial produtivo sem aumentar os custos de produção, é necessário formular rações balanceadas com nutrientes de qualidade e que atendam adequadamente às exigências nutricionais das aves em cada fase de sua criação (Babatunde; Park; Adeola, 2021). Todavia, para que isso seja possível, é fundamental conhecer a composição química e energética dos alimentos utilizados nessas formulações dietéticas (Belkhanchi *et al.*, 2023; Mariano *et al.*, 2020a; Rezaei *et al.*, 2020).

Dentre os componentes que compõem a formulação de ração para aves, a energia se destaca como o principal componente quantitativo e o mais caro ao se balancear as dietas (Abdollahi *et al.*, 2021). Isso se deve à influência na regulação do consumo e na quantidade de nutrientes ingeridos pelas aves (Abdollahi *et al.*, 2021). A energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn) é a forma mais utilizada para expressar o conteúdo energético dos alimentos na nutrição avícola, devido à quantidade de dados disponíveis na literatura para os diferentes alimentos (Abdollahi *et al.*, 2021; Mateos *et al.*, 2019; Rostagno *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2020) e, além disso, tem impacto direto no desempenho zootécnico e qualidade das carcaças em frangos de corte (Oliveira *et al.*, 2000; Sakomura *et al.*, 2004).

Na prática, existem vários fatores que podem influenciar a EMAn dos alimentos de origem vegetal e animal, sendo o mais importante a composição química dos mesmos. Esta, por sua vez, depende das condições geográficas, variabilidade genética dos cultivares, condições de plantio, fertilidade do solo, formas de armazenamento, processamento dos grãos

vegetais, além da composição e da forma de obtenção de produtos de origem animal (Aguirre *et al.*, 2024; Mateos *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2018; Stefanello *et al.*, 2023).

É notável que a produção brasileira fornece uma grande variedade de alimentos que podem ser utilizados nas rações para frangos de corte, principalmente em épocas em que há oscilação nos preços ou escassez de milho e do farelo de soja no mercado regional. Assim, já é de se esperar uma grande variabilidade nos valores de EMAn de um mesmo ingrediente utilizado nas rações, havendo a necessidade da atualização constante dos dados de composição dos alimentos.

Para amenizar este problema, vários métodos têm sido utilizados buscando-se obter uma metodologia que melhor estime o valor energético dos alimentos. Estes métodos podem ser denominados diretos e indiretos, sendo que o primeiro é realizado com o uso de animais em ensaios de metabolismo, que são trabalhosos e onerosos. Dentre os métodos indiretos, estudos com equações de predição, utilizando a meta-análise e as redes neurais artificiais (RNAs) têm demonstrado resultados promissores na literatura (Mariano *et al.*, 2020a; Nascimento *et al.*, 2011a, 2011b; Rodrigues *et al.*, 2016). Por esses métodos é possível determinar os valores de EMAn dos alimentos a partir da composição química dos mesmos, que normalmente são obtidos de forma rápida e menos onerosa, quando comparado aos bioensaios e, também, considerando que a maioria dos laboratórios não dispõe de calorímetros (Mariano *et al.*, 2020a).

Diante disso, a utilização de técnicas estatísticas, utilizando apenas a composição química dos alimentos e informações dos animais, como idade, sexo e categoria é um método de grande relevância para a determinação de energia metabolizável de alimentos para aves, pois substitui os animais experimentais por modelos matemáticos (Alvarenga *et al.*, 2013; Alvarenga *et al.*, 2021; Mariano *et al.*, 2020a, 2020b). Nesse sentido, foi desenvolvido o aplicativo *AMEn Predictor* (Rodrigues *et al.*, 2016; Mariano *et al.*, 2020a), gerado com o conceito das RNAs aliado à técnica de meta-análise para a obtenção de valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal comumente utilizados em dietas para aves.

Apesar dos vários estudos publicados sobre a composição química e valores energéticos de alimentos para aves, raramente esses estudos isolados fornecem respostas definitivas, por isso, a utilização do *AMEn Predictor* já se mostrou viável na predição de EMAn (Mariano *et al.*, 2013, 2020a), pois combina os resultados provenientes de vários ensaios distintos, mas relacionados entre si, permitindo estimativas que resumem o todo, com conclusões mais precisas e acuradas do que aquelas disponíveis de forma isolada (Mariano *et al.*, 2013).

É possível também encontrar na literatura equações para prever a EMAn de diferentes alimentos, mas não há relatos suficientes que venham validar tais equações (Alvarenga *et al.*,

2013, 2015). Assim, para que uma equação de predição do conteúdo energético de um alimento seja considerada eficaz, é necessário testar a confiabilidade da estimativa, ou seja, é necessário comparar os valores estimados pelas equações obtidas com os valores observados nos ensaios *in vivo* com frangos de corte.

Assim, os objetivos deste trabalho foram:

- a) Atualizar o banco de dados utilizados na obtenção do aplicativo *AMEn Predictor*;
- b) Atualizar a rede neural artificial (RNA) que compõem o aplicativo *AMEn Predictor*, elaborado por meio de estudos realizados por Mariano *et al.* (2013) e divulgado por Rodrigues *et al.* (2016) e Mariano *et al.* (2016, 2020a), para estimação dos valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal comumente utilizados para aves;
- c) Inserir no banco de dados utilizado na obtenção do aplicativo *AMEn Predictor*, valores energéticos e a composição química de alimentos de origem animal;
- d) Validar o modelo de RNA já implementado no aplicativo *AMEn Predictor*, bem como as equações de regressão e o modelo RNA atualizados para estimar a EMAn, por meio de ensaios *in vivo* conduzidos com frangos de corte em fase de crescimento e final de criação;
- e) Verificar se o uso do aplicativo *AMEn Predictor*, criado para aplicação de uma RNA, é tão eficiente quanto o método que envolve experimentos com animais e outros modelos de predição recomendados na literatura para a determinação dos valores energéticos dos alimentos para aves.

## 1.1 Estrutura da tese

Inicialmente, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a composição química dos alimentos destinados à criação de frangos de corte e seus valores energéticos, bem como os métodos utilizados para a determinação dos valores de energia metabolizável. Na segunda parte, estão anexados dois artigos relacionados ao desenvolvimento desta tese, os quais estão redigidos conforme as normas da Universidade Federal de Lavras.

No primeiro artigo, foi atualizado o conjunto de dados que gerou o aplicativo *AMEn Predictor*, a partir de um minucioso levantamento bibliográfico na literatura nacional e internacional, no período de 1982 a 2023, sobre a composição química e o valor energético dos alimentos usualmente utilizados na formulação das rações avícolas. A partir desses resultados, obteve-se novos modelos de regressão linear múltipla e RNA para prever a EMAn dos alimentos. No segundo artigo, foram determinados os valores de energia de amostras de milho,

farelo de trigo, farelo de soja e farinhas de carne e ossos em ensaios de metabolismos conduzidos com frangos de corte nas fases de crescimento e final de criação. Posteriormente, para a validação do modelo de RNA já implementado no *AMEn Predictor* e dos diferentes métodos de predição atualizados, comparou-se os valores de EMAn obtidos à campo com valores preditos pelo aplicativo e pelos diferentes métodos indiretos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Composição química dos alimentos destinados a criação de frangos de corte

A formulação de dietas para frangos de corte envolve uma combinação criteriosa de diversos alimentos e subprodutos que fornecem energia e nutrientes, como proteína bruta (PB), gorduras, fibras, minerais ou vitaminas necessários para atender às exigências nutricionais das aves durante as fases de criação.

No Brasil, as dietas para frangos de corte são comumente formuladas à base de milho e farelo de soja, em razão de seu valor nutritivo, alta digestibilidade e sua oferta no mercado brasileiro (Aguirre *et al.*, 2024; Stefanello *et al.*, 2023). No entanto, devido à localização geográfica das fábricas de ração, disponibilidade de mercado e custo, ingredientes como o trigo e subprodutos das indústrias alimentícias como a farinha de carne e ossos bovino, também têm sido uma boa opção de inclusão nas dietas das aves, principalmente quando há oscilação de preços dos principais ingredientes já utilizados na nutrição desses animais (Babatunde; Park; Adeola, 2021).

Levando em conta a variedade de alimentos que podem ser utilizados na formulação de ração para aves, faz-se fundamental o conhecimento da composição química, do valor nutritivo e energético dos alimentos, bem como de suas limitações de uso. É importante ressaltar que variações na composição podem ocorrer devido a diversos fatores, como condições geográficas, variabilidade genética dos cultivares, condições de plantio, fertilidade do solo, formas de armazenamento e processamento dos grãos (Borges *et al.*, 2003; Rezaei *et al.*, 2020; Stefanello *et al.*, 2016). Essas variações podem comprometer a precisão da formulação e balanceamento das rações.

A composição química dos alimentos e seus valores energéticos podem ser obtidos através de tabelas nacionais (EMBRAPA, 1991; Rostagno *et al.*, 2024) e estrangeiras (CVB, 2018; NRC, 1994, WPSA, 1989). Contudo, devido a variabilidade na composição química dos ingredientes já existentes e dos novos subprodutos introduzidos no mercado de alimentos destinados às aves, torna-se pouco seguro para as indústrias de ração utilizarem somente os valores tabelados (Borges *et al.*, 2003).

Lee *et al.* (2016) demonstraram que o valor de proteína bruta (PB) do milho grão variou de 7,12% (Brasil) a 7,60% (China), o teor de extrato etéreo (EE) variou de 3,30% (Estados Unidos) a 3,87% (Brasil) e os valores de energia bruta (EB) variaram de 3836 kcal kg<sup>-1</sup> (Ucrânia) a 3995 kcal kg<sup>-1</sup> (Brasil). Nas Tabelas Brasileiras de Rostagno *et al.* (2024) é possível

observar valores de PB do milho grão variando entre 7,65 a 7,98%, EE entre 3,65 a 3,81% e EB entre 3850 a 4014 kcal kg<sup>-1</sup>.

Rezaei *et al.* (2020) ao analisarem as amostras de ração para frangos de corte obtidas de vários fornecedores comerciais (com base na matéria seca, MS), encontraram valores médios de energia metabolizável verdadeira (EMV) para milho, farelo de soja, farelo de glúten de milho, farelo de canola e farinha de subprodutos de aves de 3435; 2558,45; 4271,12; 1830,40 e 2711,95 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Já, Sibbald (1986) ao avaliar 11 amostras de farinha de glúten de milho, obteve um valor de EMV médio de 4400 kcal kg<sup>-1</sup>, ou seja, o valor de EMV médio foi maior quando comparado com o resultado encontrado por Rezaei *et al.* (2020) de 4271,12 kcal kg<sup>-1</sup>.

De acordo com Oliveira *et al.* (2018), diferentes fontes de subprodutos de origem animal (por exemplo: penas, ossos, vísceras) podem ser incluídas na produção das farinhas fornecidas às indústrias de rações avícolas. Devido a isso, dependendo da proporção de matéria-prima utilizada para a obtenção da farinha, as concentrações de energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn), PB, matéria mineral (MM), EE, a qualidade e a digestibilidade da farinha se tornam muito variáveis (Cao; Adeola, 2016). Segundo Rostagno *et al.* (2024), as farinhas são classificadas de acordo com o teor de PB e podem variar de 38 a 58% de PB (base na matéria natural, MN). Oliveira *et al.* (2018) avaliaram a composição química de farinha de carne e ossos bovino (FCO) por meio da meta-análise de estudos nacionais publicados entre os anos de 2000 a 2016 e observaram valores mínimos e máximos de PB de 35% e 56%, respectivamente.

Diante da variabilidade da composição química dos alimentos demonstrada na literatura, é imprescindível que cada amostra de ingrediente seja analisada continuamente antes de ser incorporada na formulação de rações destinadas aos frangos de corte (Rezaei *et al.*, 2020), com o objetivo de melhorar o aproveitamento de nutrientes, otimizar o custo da ração e promover o êxito da atividade avícola.

Belkhanchi *et al.* (2023) e Brum *et al.* (2000) evidenciaram a importância da criação e atualização constante de um banco de dados contendo informações sobre a composição química e os valores energéticos de diversos alimentos comumente usados nas dietas de frangos de corte. Essa prática visa aprimorar as estimativas das médias da energia metabolizável (EM, kcal kg<sup>-1</sup>) e dos nutrientes (PB, aminoácidos, cálcio e fósforo, entre outros), utilizados na nutrição das aves. Assim, existem vários trabalhos na literatura nacional e internacional (Alvarenga *et al.*, 2015; Bertechini *et al.*, 2019; Khalil *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2023) que avaliaram nutricionalmente os alimentos usados em dietas para frangos de corte e que podem

contribuir para a atualização de tabelas e banco de dados já existentes (FAO; INRA; CIRAD; AFZ, 2022; Nascimento *et al.*, 2009; Rostagno *et al.*, 2024).

Perante o exposto, as variações de composição e do conteúdo energético nos alimentos e subprodutos são inevitáveis, ainda mais se considerar as variações provenientes dos ingredientes melhorados geneticamente (Giacobbo *et al.*, 2021) e dos subprodutos com potencial nutricional para frangos de cortes propostos na literatura (Benzertiha *et al.*, 2019; Troni *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2023).

Nesse sentido, estudos que avaliem os valores de composição química, de energia e de digestibilidade dos ingredientes são de grande valia para formular rações mais precisas, objetivando melhorar o aproveitamento de nutrientes e, conseqüentemente, o desempenho dos frangos de corte (Babatunde; Park; Adeola, 2021).

## **2.2 Valores energéticos dos alimentos**

A energia contida na dieta representa o principal componente quantitativo e mais caro nas formulações de rações para aves, por isso é o primeiro fator a ser considerado quando as dietas estão sendo balanceadas (Abdollahi *et al.*, 2021; Zaefarian *et al.*, 2021). É consenso entre os nutricionistas que a energia promove o crescimento das aves por controlar o consumo de ração, sendo utilizada nos mais diferentes processos, que envolvem desde a manutenção das aves até o máximo potencial produtivo (Abdollahi *et al.*, 2021; Duarte *et al.*, 2007; Maharjan *et al.*, 2021).

De acordo com o NRC (1994), a energia não é propriamente um nutriente, mas sim uma propriedade na qual os nutrientes, como carboidratos, lipídios e proteínas, produzem energia quando oxidados no metabolismo. Dessa maneira, metodologias e tecnologias que viabilizem uma avaliação mais acurada do conteúdo de energia disponível dos ingredientes e o conhecimento dos fatores que afetam os valores energéticos desses alimentos bem como seus requerimentos pelas aves são de grande valia para formulações de rações precisas e econômicas (Abdollahi *et al.*, 2021; Zaefarian *et al.*, 2021).

Existem diversas formas de expressar o conteúdo energético dos alimentos, que podem ser divididos em 5 principais sistemas de energia: energia bruta, energia digestível, energia metabolizável aparente, energia metabolizável verdadeira e energia líquida.

A energia bruta (EB) é a energia total contida em um alimento. Os valores de EB são determinados em laboratório, por meio da incineração dos ingredientes em bomba calorimétrica (Bertechini, 2021; McDonald *et al.*, 2002). Por outro lado, apesar da EB contida nos alimentos

ser de fácil mensuração, essa estimativa não fornece uma medida acurada sobre o que realmente as aves podem extrair do alimento (Scott *et al.*, 1998).

A energia digestível (ED) é obtida pela diferença entre a energia ingerida e a excretada nas fezes. A ED representa a fração absorvida pelo trato gastrointestinal (TGI), entretanto, não é usual utilizar essa mensuração para aves, pelo fato de que as mesmas excretam fezes e urina juntos, dificultando sua separação (Sakomura; Rostagno, 2016). Assim, para as aves, a fração energética comumente utilizada para expressar os valores energéticos dos alimentos é a energia metabolizável (EM) cuja a mensuração é baseada nas excretas (Abdollahi *et al.*, 2021). Dessa forma, a energia da excreta é composta da energia proveniente de uma fração não assimilada do alimento e de uma fração de origem endógena e independente da dieta (Alvarenga, 2012).

No meio científico, a EM é dividida em energia metabolizável aparente (EMA) e energia metabolizável verdadeira (EMV). A EMA é obtida a partir da diferença entre EB ingerida da dieta e a EB eliminada pelas excretas, não considerando que parte desta última seja proveniente de material endógeno (Abdollahi *et al.*, 2021; Alvarenga, 2012). Dentre os métodos usados na estimativa da EMA, o tradicional de coleta total de excretas com pintos e galos (Sibbald; Slinger, 1963) é o mais comum. Já a EMV é a diferença entre a EB do alimento consumido e a energia da excreta, corrigida para perdas de energia fecal metabólica e urinária endógena (Sakomura; Rostagno, 2016), sendo obtida pelo método de alimentação forçada em galos (Sibbald, 1976). Portanto, quando se compara EMA e EMV, este último sempre tenderá a ter um valor maior, pois leva em consideração as perdas de energia dos componentes metabólicos e endógenos (Sakomura; Rostagno, 2007), como encontrado por Borges *et al.* (2003, 2004).

Ressalta-se que a energia geralmente é expressa em EMA, pois nem todos os alimentos possuem valores de EMV conhecidos, o que limita sua aplicabilidade e, além disso, caso a EMV fosse adotada nas formulações, seria necessário determinar a fração endógena com aves em jejum, o que não representa o estado fisiológico do animal durante o processo digestivo, além, de ser difícil obter repetibilidade (Sakomura; Rostagno, 2016).

Em geral, na determinação da EM, é comum fazer a correção dos valores energéticos para o balanço de nitrogênio (BN) igual a zero. Assim, em 1958, Hill e Anderson propuseram um fator de correção de  $8,22 \text{ kcal g}^{-1}$ , que corresponde à quantidade de EB (em quilocalorias, kcal) obtida a partir da combustão completa de um grama de nitrogênio (N) urinário na forma de ácido úrico, ou seja, é a energia obtida quando o ácido úrico é completamente oxidado.

Segundo Sibbald (1982), essa correção se deve ao fato de que as aves em crescimento utilizam os aminoácidos da ração para formação e deposição proteica, enquanto, as aves adultas, a deposição proteica é pequena e partes dos compostos nitrogenados são catabolizados e

excretados como ácido úrico, o que contribui com a energia das excretas. Com isso, os valores de EMA e EMV devem ser corrigidos para a retenção de nitrogênio (EMAn e EMVn), igualando-os entre aves jovens e adultas (Freitas *et al.*, 2006).

Por fim, tem-se a energia líquida (EL), obtida pela diferença entre a energia metabolizável e o incremento calórico (IC), que está associado à energia liberada nos processos digestão, metabolismo de nutrientes e alguma atividade física exercida pelo animal (Noblet; Henry, 1993). Apesar da EL ser a representação mais precisa da energia disponível para fins produtivos por considerar a energia particionada para manutenção, produção (carne) e IC, há informações limitadas sobre os valores de EL de vários ingredientes para formulação de rações para aves (Barzegar *et al.*, 2020), sendo necessárias mais pesquisas que confirmem que o uso do sistema de EL oferecerá vantagens em termos de desempenho econômico.

Ademais, sabe-se que os sistemas EMA e EMAn continuam sendo considerados medidas padrão para determinar os valores energéticos dos alimentos para aves devido a sua aplicação prática e a quantidade de dados EMAn que estão disponíveis na literatura para vários alimentos (Abdollahi *et al.*, 2021; Mateos *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020) bem como, os valores de energia previstos com base em componentes químicos simples mensurados a partir da utilização de aves em crescimento e adultas (Rostagno *et al.*, 2024).

## **2.3 Fatores que afetam a energia metabolizável dos alimentos de origem vegetal e animal**

### **2.3.1 Balanço de nitrogênio e energia metabolizável aparente corrigido pela retenção de nitrogênio**

Sabe-se que durante um ensaio metabólico existe a dificuldade de assegurar que todas as aves apresentem a mesma taxa de crescimento, por isso, Nunes *et al.* (2008) relataram que os valores de energia devem ser corrigidos pelo balanço de nitrogênio (BN) uma vez que, o nitrogênio (N) retido como tecido, se catabolizado, contribuirá para as perdas de energia urinária endógena.

Por conseguinte, as variações na retenção de nitrogênio contribuem para variações nos valores de EMA. Sakomura e Rostagno (2007) explicam que, as aves podem ter a mesma metabolizabilidade dos alimentos, mas com diferentes graus de retenção nitrogenada possuirão diferentes valores de energia excretada. Assim, a correção para retenção de nitrogênio zero tem como objetivo eliminar as variações na retenção de N que podem ser causadas por fatores experimentais, incluindo tratamentos dietéticos, aditivos alimentares, ingredientes, idade das

aves e linhagens de aves, nos valores de EMAN dos alimentos mensurados em ensaios metabólicos (Abdollahi *et al.*, 2021; Lopez; Leeson, 2007). Portanto, essa correção se justifica pelo fato de que nos ensaios, como EMA, dietas e ingredientes da ração, devem ser avaliados apenas por sua contribuição para o fornecimento de energia e não promover a retenção de N (McNab, 2000).

O método de determinação da EMAN também pode afetar o BN. Borges *et al.* (2003) compararam ensaios de metabolismo que utilizaram a metodologia tradicional (coleta total de excreta) e o método de alimentação forçada e encontraram valores mais baixos de BN nesta última técnica, porque aves que recebem alimentação forçada são predispostas a níveis maiores de estresse e, portanto, é esperada uma menor retenção de N. Assim, maiores valores positivos de BN são encontrados com o método tradicional de coleta total de excretas (Abdollahi *et al.*, 2021).

Sibbald e Slinger (1963) tinham dúvidas sobre a solidez da correção para retenção zero de nitrogênio e afirmaram que quando a quantidade de proteína tecidual catabolizada é pequena em relação à quantidade armazenada nas aves em crescimento, ou depositadas em ovos por aves poedeiras, a imposição de uma penalidade é um procedimento questionável.

Em virtude disso, Mateos *et al.* (2019) realizaram um estudo demonstrando que a correção para balanço de nitrogênio igual a zero pode subestimar, em cerca de 7%, os valores de energia dos alimentos proteicos. Da mesma forma, Lopez e Leeson (2008) verificaram que os alimentos proteicos são mais penalizados pela correção para balanço de nitrogênio igual a zero, pois assume-se que todos os compostos nitrogenados, como a proteína, são utilizados como fonte de energia. Esses autores observaram um declínio de 7 a 12 pontos percentuais nos valores de energia metabolizável do farelo de soja, enquanto para o milho essa variação foi de 1 a 5 pontos percentuais. Em contrapartida, pouca ou nenhuma diferença no desempenho geral foi demonstrada desde que as dietas fossem formuladas com todos os valores EMA ou EMAN.

Abdollahi *et al.* (2021) demonstraram em sua pesquisa dados de retenção de nitrogênio, EMA e EMAN de seis ensaios de avaliação de energia, envolvendo quatro fontes de proteína (farelo de soja, soja integral, farelo de colza e grãos secos de destilaria de milho com solúveis [DDGS]), e concluíram que a correção dos valores de EMA para zero de retenção de N para frangos de corte de crescimento rápido penaliza o valor energético das fontes de proteína que contribuem para a deposição corporal e é maior a magnitude para ingredientes com maior qualidade proteica. Ainda, a formulação de ração com base em valores de EMA não corrigidos pode beneficiar as formulações de ração de frango de corte de menor custo e merece uma investigação mais aprofundada.

Os frangos de corte modernos possuem rápido crescimento e alta capacidade em depositar proteína, nesse caso, os valores de energia dos alimentos podem ser mais penalizados, em razão das correções pelo nitrogênio retido (Lopez; Leeson, 2008). Portanto, diante dos questionamentos encontrados na literatura sobre a aplicação do sistema EMA em vez do sistema EMAn (Abdollahi *et al.*, 2021; Mateos *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020; Zuidhof, 2019), é aconselhável buscar o entendimento sobre o uso correto da EMAn revisitando as definições de termos que descrevem o destino da energia dietética nas aves.

Diante do exposto, fica evidente a necessidade de investigar qual dos sistemas, EMA ou EMAn, possuem maior usabilidade para estimar os valores energéticos dos alimentos que serão utilizados nas formulações de rações.

### 2.3.2 Ingredientes e composição química da dieta

A concentração de nutrientes dos alimentos também afeta os teores de energia e, segundo Rezaei *et al.* (2020) o conteúdo energético tem um papel fundamental no controle do consumo de ração. Com isso, as necessidades energéticas das aves e a disponibilidade de energia dos alimentos são os fundamentos básicos para a formulação precisa de uma dieta, a fim de obter uma ingestão biológica ótima de nutrientes específicos (MacLeod, 2002; Rezaei *et al.*, 2020).

A composição química de alimentos oriundos de diferentes cultivares e regiões tendem a apresentar grandes variações e, conseqüentemente, alterações nos seus valores de energia. Em estudo conduzido por Stefanello *et al.* (2023) avaliando a composição química e a utilização de energia pelos frangos de corte de amostras de milhos obtidos de várias áreas geográficas brasileiras, verificou-se que o milho de origem Norte apresentou a seguinte composição química: 3891 kcal kg<sup>-1</sup> de EB, 7,60% de PB, 64,7% de amido total, 79,2% de amilopectina, 3,07% de EE e 0,88% de fibra bruta (FB), enquanto o milho de origem Sul apresentou 3855 kcal kg<sup>-1</sup> EB, 7,44% de PB, 59,3% de amido total, 74,3% de amilopectina, 3,63% de EE e 1,07% de FB. Já os valores energéticos do milho de origem Norte (EMA = 3599 kcal kg<sup>-1</sup> e EMAn = 3465 kcal kg<sup>-1</sup>) foram maiores em comparação ao Sul (EMA = 3524 kcal kg<sup>-1</sup> e EMAn = 3401 kcal kg<sup>-1</sup>; p < 0,01). Com isso, concluiu-se que a utilização de energia e dos nutrientes do milho pelos frangos de corte é dependente da região onde foi cultivado.

Aguirre *et al.* (2024) analisaram a composição química de 27 amostras de farelos de soja (FS) oriundas da Argentina (ARG), do Brasil (BRA) e dos Estados Unidos da América (EUA) e, também, conduziram ensaios *in vivo* com frangos de corte para obterem os valores de

EMAn dessas amostras. Com base em 88% da MS, os farelos BRA obtiveram maior teor de PB do que os farelos EUA e ARG (49,9 % vs. 46,0 e 45,9%, respectivamente;  $p < 0,05$ ). No ensaio *in vivo*, aos 21 dias de idade dos animais, a EMAn do farelo de soja tendeu a ser maior (2334 vs. 2282 e 2277 kcal kg<sup>-1</sup>;  $p = 0,062$ ) e mais uniforme (coeficiente de variação = 5,68 vs. 6,60 e 7,78%) para as amostras dos EUA do que para as amostras de ARG e BRA. Os autores concluíram que para aumentar a precisão do processo de formulação da ração deve-se avaliar e atualizar periodicamente a composição química e os valores de EMAn dos lotes comerciais dos farelos, por país de origem.

Nesse sentido, a utilização de tabelas de composição química e energética dos alimentos para formular dietas para os animais pode, em alguns casos, ser considerada insuficiente para garantir o máximo desempenho das aves e melhores características da carcaça e, portanto, cada amostra de ingrediente deve ser analisada continuamente antes de ser utilizada na formulação de rações para aves (Rezaei *et al.*, 2020).

Já os alimentos de origem animal, possuem composição química bastante variável devido à dificuldade dos setores de graxaria de abatedouros em adotar um padrão contínuo do material produzido que varia conforme o tipo de processamento e proporções de seus constituintes (Albino; Silva, 1996). Segundo Silva *et al.* (2010), as variações encontradas nos teores de EE dos alimentos de origem animal podem ser associados ao processamento do ingrediente, como é desengordurado e até mesma a maneira em que o produto é manuseado na fábrica (rampas com água, prensa de rosca ou transporte mecânico).

De acordo com Eyng *et al.* (2011), o alto valor de MM (íons de cálcio e fósforo) pode causar saponificação das gorduras presentes na farinha animal, reduzindo o seu aproveitamento energético pelos frangos de corte. Ainda, Shirley e Parsons (2001) descobriram que a PB e a EB da farinha diminuem quando a concentração de MM aumenta, e à medida que o último componente aumenta, o mesmo acontece com os teores de cálcio (Ca) e fósforo (P).

Oliveira *et al.* (2018) realizaram um estudo de meta-análise dos componentes químicos de farinha de carne e ossos entre os anos de 2000 a 2016 no Brasil e observaram que o teor de PB está positivamente correlacionado a EB (0,880) e estabelece alta correlação negativa com MM (-0,776), Ca (-0,469) e P (-0,733). Além disso, verificaram que a EMAn desses alimentos está altamente correlacionada com a PB (0,787) e EB (0,836) e negativamente com MM (-0,846), Ca (-0,505) e P (-0,741). Por isso, Sakomura e Rostagno (2007) recomendam a inclusão de 20 % deste tipo de farinha na ração referência, pois acima desse valor ocorre desequilíbrio de nutrientes que pode reduzir o consumo e subestimar o valor energético do alimento avaliado.

Outros fatores importantes que podem modificar a contribuição energética dos ingredientes na dieta foram descritos na literatura e incluem: o nível e o tipo de fibra (Jha *et al.*, 2019); teor de gordura da dieta (Mandalawi *et al.*, 2017); presença de fatores antinutricionais (FANs), como os polissacarídeos não amiláceos (PNAs), os inibidores de tripsina encontrados em grãos de soja, taninos em sorgo, contaminantes e toxinas; utilização de enzimas (amilases, fitases, carboidrases e proteases); emulsificantes; ácidos orgânicos e; outros aditivos (Mateos *et al.*, 2019; Zuidhof, 2019). Sugere-se, portanto, que esses fatores sejam compreendidos e controlados em condições práticas de campo, com o objetivo de minimizar os seus efeitos no conteúdo energético dos alimentos.

Já se é sabido que a presença de FANs não afetará somente o conteúdo energético do ingrediente, mas, também poderá interferir na integridade da mucosa intestinal prejudicando suas funções digestivas, absorptivas e, de barreira para as bactérias patogênicas e compostos tóxicos no TGI dos frangos de corte bem como a utilização da energia de outros constituintes da dieta (Jha *et al.*, 2019; Mateos *et al.*, 2019).

Dietas compostas por ingredientes como milho e farelo de soja contêm alto nível de amido e PNAs podendo ser potencialmente antagônicos à utilização de nutrientes pelo animal. De modo geral, a fração de PNAs pode provocar alguns efeitos negativos sobre o valor energético da dieta tais como: o encapsulamento do conteúdo celular que torna indisponível o amido do alimento que se encontra no interior da célula, impedindo o acesso das enzimas endógenas, necessárias para sua degradação e aproveitamento no metabolismo energético das aves e; pode provocar o processo de gelatinização que aumentará a viscosidade do bolo alimentar e o tempo de permanência da digesta no intestino delgado, interferindo negativamente na capacidade de consumo de ração (Alvarenga, 2012; Svihus, 2014).

Os frangos de corte não têm a capacidade de hidrolisar os PNAs da dieta devido à falta ou ausência de enzimas endógenas específicas do substrato (Cowieson, 2010). Embora o milho e o farelo de soja sejam ingredientes altamente digestíveis, Cowieson, Bedford e Ravindran (2010), estimam que as aves podem deixar de aproveitar em torno de 400 a 450 kcal kg<sup>-1</sup> de energia proveniente da dieta devido à indisponibilidade dos nutrientes na composição. Nesse contexto, Schramm *et al.* (2021) estudaram o efeito da suplementação da enzima  $\alpha$ -amilase na digestibilidade em dietas à base de milho e farelo de soja para frangos de corte e observaram que houve um aumento máximo de 64 kcal de EMA kg<sup>-1</sup> com a inclusão de até 80 KNU kg<sup>-1</sup> da enzima na dieta completa, enquanto 109 KNU kg<sup>-1</sup> da enzima aumentou 327 kcal de EMA kg<sup>-1</sup> no milho. Esses dados sugerem que a inclusão da  $\alpha$ -amilase exógena melhora a utilização do amido e da energia em dietas à base de milho e farelo de soja para frangos de corte.

Atualmente, o uso de tecnologias adequadas como, o processamento térmico do farelo de soja para redução de inibidores de tripsina e a suplementação de enzimas para ajudar na digestão dos PNAs presentes na dieta, podem resolver a maioria dos problemas causados por esses FANs, entretanto, é difícil de quantificar a real contribuição dos aditivos para a energia da dieta (Jha *et al.*, 2019; Mateos *et al.*, 2019).

A presença combinada destes fatores é um ponto importante a considerar quando se trata dos valores energéticos disponíveis aos animais. No entanto, determinar qual o fator que tem maior influência no valor energético dos alimentos permanece controverso, sendo necessário mais pesquisas que auxiliem no desenvolvimento de modelos de predição mais eficazes para estimar o valor energético das dietas.

### **2.3.3 Processamento e características físico-químicas dos ingredientes e das dietas**

O processamento pelo qual os alimentos podem ser submetidos interfere na digestibilidade de seus nutrientes, nas características físicas e na composição dos ingredientes da dieta, podendo alterar o seu valor energético (Mateos *et al.*, 2019).

A este respeito, os fatores considerados mais relevantes são altas temperaturas, forma de alimentação (*mash versus pellets*) e tamanho de partícula do ingrediente (moagem fina *versus* grosseira) (Córdova-Noboa *et al.*, 2020; Mateos *et al.*, 2019; Zaefarian *et al.*, 2021).

O processamento térmico de grãos em temperaturas acima de 100°C é uma prática comum para aumentar a digestibilidade de nutrientes e, tem sido relatado em diversos estudos (Córdova-Noboa *et al.*, 2020; Mateos *et al.*, 2019; Odjo *et al.*, 2015). No entanto, o uso de altas temperaturas e longa exposição ao calor durante a secagem, pode resultar na produção de complexos não digeríveis, como PNAs, que podem prejudicar a digestibilidade e o conteúdo energético dos alimentos, reduzindo o desempenho dos frangos (Huart *et al.*, 2018). Segundo Córdova-Noboa *et al.* (2020), o excesso de calor pode reduzir o valor energético e nutritivo dos grãos devido à retrogradação do amido.

Giacobbo *et al.* (2021) avaliaram a composição química, o teor de PNAs, EMA e EMAN de três híbridos de milho secos em duas temperaturas (80 e 110 °C) em dietas para frangos de corte e verificaram que os teores médios de PNA solúvel e insolúvel foram de 0,72 e 6,27g 100g<sup>-1</sup>, respectivamente, para grãos secos a 80 °C e de 0,30 e 6,05g/100g, respectivamente, para grãos secos a 110 °C. Já os valores médios para EMAN dos milhos secos a 80 e 110 °C foram de 3313 e 3298 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Os autores concluíram que a temperatura de secagem de 110°C aumentou o teor de amilose, amido resistente, nitrogênio ligado à fibra e reduziu a

relação solúvel:PNA total, podendo ser responsáveis pelas diferenças na digestibilidade dos nutrientes.

A forma da ração e o tamanho da partícula também impactam nos valores energéticos da ração. De acordo com Zaefarian *et al.* (2021), a peletização é o processo mais comum na produção de ração para aves e consiste em transformar a ração farelada em grânulos ou *pellets*, por meio de um processo físico-químico. Mateos *et al.* (2019) relataram que a forma da ração (*pellets* ou farelos) possui influência no desempenho dos frangos de corte, pois as aves alimentadas com *pellets* foram mais eficientes e cresceram mais rapidamente do que as aves alimentadas com farelo. No entanto, o processo de confecção de dietas peletizadas também pode ter efeitos prejudiciais na digestibilidade dos nutrientes e no conteúdo energético da dieta devido à resposta final depender de fatores como calor aplicado, tamanho das partículas e composição dos ingredientes da dieta (Mateos *et al.*, 2019; Zaefarian *et al.*, 2021).

Segundo Abdollahi *et al.* (2013) a quebra da parede celular, resultado do estresse físico da moagem fina e da pressão aplicada durante o processo, pode facilitar a acessibilidade das enzimas aos nutrientes encapsulados. O estudo conduzido por Brugalli *et al.* (1999) avaliou o efeito do tamanho de partícula (grossa, média e fina) nos valores energéticos de diferentes farinhas de carne e ossos para frangos de corte e observaram maiores valores energéticos ( $p < 0,01$ ) nas granulometrias média ( $EMAn = 2560 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e fina ( $EMAn = 2370 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) quando comparado com a grossa ( $EMAn = 2030 \text{ kcal kg}^{-1}$ ). Os autores mencionaram que essas diferenças podem estar relacionadas a superfície de exposição à ação das secreções digestivas e a eficiência da digestão dos alimentos, pois, o tempo de passagem do bolo alimentar pelo trato gastrointestinal das aves é relativamente curto, assim, a redução do tamanho da partícula pode ter contribuído para melhor digestão e absorção dos nutrientes.

Logo, as características físicas da dieta afetam o conteúdo energético dos alimentos, melhorando a função do TGI quando as dietas são moídas grosseiramente (melhor desenvolvimento da moela) (Córdova-Noboa *et al.*, 2020) ou facilitando o contato entre enzimas e nutrientes quando moídas finamente (Brugalli *et al.*, 1999; Mateos *et al.*, 2019; Zaefarian *et al.*, 2021).

Em suma, é importante realizar análises matemáticas para estimar os teores de energia dos alimentos, levando em consideração suas composições químicas e os diversos tipos de processamentos, a fim de ajustar os níveis energéticos das dietas.

### 2.3.4 Fatores inerentes às aves que influenciam nos valores energéticos dos alimentos

O conteúdo energético das dietas e ingredientes é variável de acordo com: a idade, visto que aves mais jovens (até 14 dias de vida) são menos eficientes em metabolizar os nutrientes, devido menor atividade da enzima lipase e menor concentração de ácidos biliares (Brumano *et al.*, 2006; Freitas *et al.*, 2006; Mandalawi *et al.*, 2017); o sexo, a categoria, a origem genética e o estado de saúde das aves (Mateos *et al.*, 2019; Yegani; Korver, 2012).

Brumano *et al.* (2006) avaliaram a EMAn de duas farinhas de carne e ossos (36% e 45% de PB) com frangos de corte em duas fases de vida: 21 a 31 dias (fase 1) e de 41 a 50 dias (fase 2), utilizando o método tradicional de coleta total de excretas e encontraram valores médios de EMAn (kcal kg<sup>-1</sup>, MN) para as fases 1 e 2, respectivamente de 1249 e 1573 para farinha de carne e ossos de 36% PB e de 1391 e de 1766 para farinha de carne e ossos de 45% PB. Os autores concluíram que os valores de EMAn dos alimentos avaliados obtidos no segundo período experimental foram superiores aos do primeiro período, indicando que com o avançar da idade, as aves aproveitam melhor os alimentos.

Thomas, Ravindran e Ravindran (2008) observaram que a EMAn de uma dieta à base de milho foi de 2935 kcal kg<sup>-1</sup> quando os frangos de corte estavam com 7 dias de vida e depois aos 14 dias houve um aumento de EMAn para 3109 kcal kg<sup>-1</sup>. No entanto, a retenção de N diminuiu com o avanço da idade das aves de 75,5% no dia 3 para 60,5% no dia 14.

Khalil *et al.* (2021) conduziram uma pesquisa para investigar a influência da idade do frango de corte (1 a 42 dias de idade) na EMA e EMAn de 4 grãos de cereais comuns (trigo, sorgo, cevada e milho). Os resultados obtidos pelos autores demonstram que a idade da ave influenciava ( $p < 0,001$ ) a EMA e EMAn independentemente do tipo de grão de cereal sendo superiores nas idades acima de 21 dias, quando seu sistema digestório já está desenvolvido. Em conclusão, a idade dos frangos tem impacto substancial nos valores de EMA e EMAn dos grãos de cereais, demonstrando a importância de considerar a idade no momento de formular as rações para melhorar a eficiência da produção avícola.

Em geral, as aves adultas têm melhor capacidade de extraírem maior quantidade de energia das matérias-primas do que as aves jovens, com diferenças mais pronunciadas para ingredientes de difícil digestão, como materiais ricos em fibras, gorduras saturadas e, especialmente, em ingredientes de ração contendo fatores antinutricionais, como PNAs, taninos e ácido fítico, devido a mudanças ocorridas nas atividades enzimáticas e na taxa de passagem da digesta pelo TGI (Khalil *et al.*, 2021; Mandalawi *et al.*, 2017).

Haja vista que o sistema EMAn, é dependente da idade, espécie e nível de consumo de ração, Barzegar *et al.* (2020) e Freitas *et al.* (2006), já haviam sugerido que, as rações para frangos de corte até 21 dias de idade devem ser formuladas, considerando-se os valores de EMAn determinada com pintos e, para frangos de corte acima de 21 dias, deve-se considerar o aumento na digestibilidade dos nutrientes, com a idade das aves, e valorizar a contribuição energética dos alimentos, utilizando-se os valores de EMAn (galos) ou EMVn (galos) para a formulação.

Apesar disso, esses resultados demonstram que não há um consenso na literatura e que mais estudos considerando aves em diferentes idades devem ser realizados, pois existem poucos dados de EMAn e EMV com galos e aves em outras fases de vida (Khalil *et al.*, 2021; Sakomura; Rostagno, 2016). Além disso, na prática, são poucas as fábricas de rações que utilizam valores energéticos diferentes para cada idade das aves (Mateos *et al.*, 2019).

Outro fator que pode influenciar os valores de EM é o sexo das aves (Alvarenga, 2012). Nascif *et al.* (2004) observaram em seu estudo que em alguns tipos de óleos e gorduras, os valores de EMA e EMAn, foram maiores para pintos de corte machos em relação às fêmeas, tendo os valores encontrados para fêmeas sido equivalente a 98% dos encontrados para os machos. Em contrapartida, Parsons *et al.* (1982) não observaram diferenças significativas nos valores de EM determinados com machos e fêmeas, quando os valores das excretas foram corrigidos pelo BN.

### **2.3.5 Consumo e nível de inclusão do alimento teste à ração referência**

O consumo alimentar das aves está diretamente relacionado à determinação do valor energético dos alimentos, sendo que quanto maior o consumo, menor será a influência das perdas metabólicas, em relação aos valores de energia, por outro lado, se o consumo de ração for baixo, as perdas endógenas tendem a afetar negativamente os valores de EMA (Borges; Rostagno; Saad, 2004; Sibbald, 1975).

O nível de inclusão do alimento teste à ração referência é um fator que também deve ser considerado na determinação de EMA. Olukosi *et al.* (2022) relataram que altos níveis de substituição na dieta referência por alimentos testes, geralmente, podem ocasionar mudanças drásticas no perfil químico da dieta teste e, frequentemente, resultam em baixo desempenho de crescimento dos frangos de corte devido a diluição da dieta.

Olukosi (2020) investigou a influência do nível de substituição (150 e 300 g kg<sup>-1</sup>) na EMAn do farelo de soja (FS) pelo método de diferença e observou que o valor de EMAn no

nível de inclusão de 150 g kg<sup>-1</sup> (2045 kcal kg<sup>-1</sup>) do FS na dieta referência foi inferior quando comparado ao nível de 300 g kg<sup>-1</sup> (2389 kcal kg<sup>-1</sup>). Dale e Fuller (1984) mencionaram que o ensaio metabólico considerando o FS tem sua implicação nutricional peculiar porque altos níveis de inclusão de FS produzem altos níveis de PB na dieta, o que tem implicações na utilização de energia. Desta maneira, Olukosi (2020) concluiu que a partir das observações no experimento atual, a influência dos níveis de substituição na EMAn testados é dependente do alimento, onde o nível de inclusão usado deve estar dentro dos limites práticos e levando em consideração o equilíbrio de nutrientes na dieta teste.

No método tradicional para a determinação da EMAn, os níveis de substituição de ingredientes de origem animal e vegetal nas rações referência variam geralmente de 20% a 40%, o que pode gerar, dependendo do ingrediente, rações desbalanceadas nutricionalmente, que, por sua vez, podem interferir na determinação dos valores corretos (Alvarenga, 2012; Paula *et al.*, 2002).

Alguns autores (Dale, 1997; Jensen, 1991; Martosiswoyo; Jensen, 1988) consideram que os valores de EMAn da farinha de carne e ossos (FCO) são rotineiramente subestimados quando determinados por metodologias em que o nível de substituição da dieta referência pela FCO varia entre 40% até 50%. Talvez porque os altos níveis de Ca e P na dieta proporcionados pela alta inclusão da FCO comprometem o aproveitamento dos demais nutrientes (Faria Filho *et al.*, 2002). Considerando isso, o nível mais adequado de substituição da dieta referência pela FCO para a determinação dos valores de EMAn seria de 20%, a fim de evitar o desequilíbrio de nutrientes (Sakomura; Rostagno, 2016).

Portanto, as dietas-teste devem ser formuladas para ter níveis semelhantes de macro e microminerais e vitaminas, no intuito de prevenir possíveis desequilíbrios nutricionais que normalmente resultam da diluição de uma dieta de referência com alimentos testes durante os ensaios de metabolismo (Wu *et al.*, 2020). Assim, fica claro que os altos níveis de inclusão tendem a reduzir o consumo de ração pelas aves e subestimar o valor energético do alimento avaliado.

### **2.3.6 Aproveitamento de nutrientes e desempenho em função dos níveis energéticos da dieta**

Na avicultura é imprescindível adequar os níveis energéticos das dietas aos requerimentos das aves, uma vez que o nível de energia da dieta está diretamente relacionado

ao desempenho e aproveitamento de nutrientes pelas aves, o que também contribui para redução de excreção de elementos poluentes ao ambiente (Alvarenga, 2012; Wu *et al.*, 2020).

Emmans (1987) destaca a importância da determinação das exigências energéticas e das eficiências de aproveitamento da energia para frangos, principalmente em relação à eficiência em deposição de proteína e gordura, que sofrem modificações em decorrência da alimentação e do próprio crescimento da ave. Neste caso, sabe-se que o nível energético pode modular a eficiência alimentar de duas formas: primeiro, com o aumento da energia, as necessidades energéticas das aves são atendidas com menor consumo alimentar; em segundo lugar, a taxa de crescimento pode ser reduzida com baixos níveis de energia, uma vez que parte da proteína é direcionada para o suprimento energético do organismo e não para o crescimento tecidual (Alvarenga, 2012; Waldroup, 1981).

Oliveira *et al.* (2000) objetivaram em sua pesquisa avaliar o efeito de cinco níveis de energia metabolizável (2850, 2925, 3000, 3075 e 3150 kcal de EM kg<sup>-1</sup>) na dieta para frangos de corte mantidos em ambiente de alta temperatura (34 °C) durante o período de 1 a 21 dias de idade e verificaram que o ganho de peso, o consumo de EM e as deposições de proteína e gordura na carcaça aumentaram, enquanto a conversão alimentar dos frangos melhorou, reduzindo de forma linear com os tratamentos.

Sakomura *et al.* (2004) avaliaram a variação na energia metabolizável (3050, 3200 e 3350 kcal kg<sup>-1</sup>) da dieta sobre o desempenho de frangos de corte machos na fase crescimento (22 a 43 dias de idade) em condições de temperatura ambiente e observaram que o maior nível energético (3350 kcal kg<sup>-1</sup>) na dieta dos frangos proporcionou melhores resultados de desempenho, enquanto que o valor médio de energia (3200 kcal kg<sup>-1</sup>), demonstrou-se melhor eficiência de utilização de energia para deposição de proteína e gordura, conseqüentemente, melhor qualidade de carcaça, em decorrência da menor deposição de gordura.

Ferreira *et al.* (2015) forneceram aos frangos de corte, de ambos os sexos da linhagem Cobb, dietas com três níveis de energia metabolizável (2800, 3000 e 3300 kcal kg<sup>-1</sup>), em três idades de abate (42, 49 e 56 dias) e constataram que o consumo alimentar foi menor quando o nível energético da ração foi mais alto. A conversão alimentar melhorou à medida que o nível de energia da ração aumentou, e o teor de lipídeos na coxa sem pele e no peito foi menor nas aves que receberam a ração com menor nível energético.

No manual da linhagem Cobb 500<sup>®</sup> (2022), as exigências energéticas para frangos machos de médio desempenho, na fase de crescimento/final (21-42 dias), variam em torno de 2950 a 3100 kcal kg<sup>-1</sup>, sendo o milho a principal fonte desta energia nas rações brasileiras, com

valor de referência de 3364 kcal kg<sup>-1</sup> de energia metabolizável nas dietas dessas aves (Rostagno *et al.*, 2024).

Segundo Leeson e Summers (2001), a energia dietética que excede as exigências para as atividades metabólicas e de crescimento normal do animal não pode ser excretada pelo organismo, sendo normalmente armazenada como gordura, o que pode ser confirmado por Silva *et al.* (2001) que observaram em seu experimento que o percentual de gordura abdominal aumentava linearmente à medida que se aumentava o nível de energia metabolizável da ração.

Diante dos resultados controversos em relação aos níveis de energia adequados, o uso de equações de predição para melhorar o balanço energético e de nutrientes dos frangos de corte seria de grande valia devido a sua importância na formulação de rações mais precisas.

Ademais, devido aos inúmeros fatores descritos anteriormente que afetam os valores de EM, vários métodos foram desenvolvidos para determinar com maior precisão possível a energia presente nos alimentos comumente utilizados nas dietas para as aves. Porém, as diferentes metodologias utilizadas para determinar esses valores de energia podem causar diferenças entre os valores encontrados na literatura (Aardsma; Mitchell; Parsons, 2017).

## **2.4 Métodos para a determinação dos valores de energia metabolizável**

Os métodos utilizados para determinar o conteúdo energético dos alimentos para os frangos de corte podem ser divididos em três categorias:

1) Métodos biológicos (*in vivo*): que representam o método tradicional de coleta total de excretas com pintos e galos (Sibbald; Slinger, 1963), a alimentação precisa ou forçada com galos adultos (Sibbald, 1976) e o método rápido de Farrel em galos treinados (Farrel, 1978);

2) Métodos não biológicos: que são os métodos *in vitro* (Zaefarian *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2014) e por meio da tecnologia de refletância no infravermelho próximo (NIRS) (Losada *et al.*, 2010; Mateo *et al.*, 2019) e, por último,

3) Valores tabelados de composição química e energética dos alimentos (FEDNA, 2017; INRA, 2002; NRC, 1994; Rostagno *et al.*, 2024; WPSA, 1989); modelos matemáticos de predição (Alvarenga *et al.*, 2013a, 2013b, 2015; Janssen, 1989; Meloche *et al.*, 2013; Nascimento *et al.*, 2009, 2011a, 2011b; Rochell *et al.*, 2011; Rostagno *et al.*, 2024) e; modelos computacionais e de inteligência artificial (Alvarenga *et al.*, 2021; Mariano *et al.*, 2013, 2014, 2020, 2020a, 2020b; Rodrigues *et al.*, 2016) que se baseiam na composição química dos alimentos.

Os ensaios biológicos *in vivo* ou bioensaios são à base de muitas tabelas de composição de ingredientes (CVB, 2018; Rostagno *et al.*, 2024), mas eles têm vários problemas, incluindo a falta de recursos financeiros para o desenvolvimento de pesquisas, rotinas experimentais e laboratoriais que demandam infraestrutura e mão-de-obra especializada, tempo de execução, cultivar utilizada e, também, ensaios metabólicos realizados com número reduzido de amostras, resultando em dados que podem nem sempre ser precisos (Alvarenga *et al.*, 2013; Losada *et al.*, 2010; Mateos *et al.*, 2019; Ravindran, 2012; Wu *et al.*, 2020). Outro ponto importante é que os estudos *in vivo* estão enfrentando crescentes críticas por motivos éticos e é provável que essa pressão se torne mais intensa no futuro (Noblet *et al.*, 2022).

Já nos métodos não biológicos, os valores de energia são obtidos pelo método *in vitro*, no qual é possível simular as diferentes etapas da digestão em “tubos de ensaio” (Zaefarian *et al.*, 2021). De acordo com Jaworski *et al.* (2015), essa metodologia só pode ser usada para classificar os alimentos sem qualquer informação confiável sobre o valor energético real do ingrediente, pois no organismo dos animais ocorrem processos digestivos e metabólicos complexos que são impossíveis de se reproduzir fielmente com a técnica *in vitro*. Quanto às dietas, a abordagem *in vitro* é incapaz de detectar o efeito da idade do animal, tecnologia de fabricação de ração e aditivos alimentares (Noblet *et al.*, 2022).

A tecnologia NIRS é baseada na quantidade de luz absorvida por certas ligações químicas nos comprimentos de onda infravermelhos específicos e não é destrutiva para a amostra (Noblet *et al.*, 2022). No entanto, a precisão das previsões de ED e EM dependem de valores confiáveis de ED e EM obtidas *in vivo* usados para calibrar o equipamento NIRS, pois a espectroscopia NIRS é uma tecnologia que requer calibração precisa e validações regulares (Noblet *et al.*, 2022). Além disso, a previsão de energia do alimento realizada pelo NIRS é precisa desde que seja obtida por um grupo de alimentos homogêneos (trigo e seus subprodutos, por exemplo) como descrito nos trabalhos de Li *et al.* (2016) e Zijlstra *et al.* (2011) e, também, apenas para as condições experimentais sob as quais as medições *in vivo* foram feitas para o estabelecimento da curva de calibração NIRS, por exemplo, uma previsão baseada em EMAn medido em galos adultos é incapaz de prever os EMAn em frangos de corte (Noblet *et al.*, 2022).

As tabelas de composição energética dos alimentos (CVB, 2018; Rostagno *et al.*, 2024) utilizam o seu próprio conjunto de equações baseadas em nutrientes digestíveis, enquanto outras (EVONIK, 2016) utilizam as equações propostas pela *World's Poultry Science Association* (WPSA, 1989). Os valores tabulados facilitam o processo de formulação de ração e, geralmente, é a melhor escolha para pequenas fábricas de ração que possuem capacidade limitada para

analisar amostras em tempo real (Mateos *et al.*, 2019). No entanto, os valores informados em tabelas são muitas vezes altamente variáveis devido ao progresso da genética de plantas, mudanças na composição química dos ingredientes, métodos de ensaios de EM, conhecimento sobre a influência das características físico-químicas das dietas sobre o conteúdo energético, FANs e o próprio melhoramento genético das aves ao longo do tempo, fazendo que sua validade seja limitada (Mateos *et al.*, 2019; Zaefarian *et al.*, 2021).

Diante do exposto, dependendo da realidade do pesquisador e da fábrica de ração, estas metodologias se tornam inviáveis e, por isso, a previsão de modelos matemáticos de predição (Alvarenga *et al.*, 2013a, 2013b, 2015; Nascimento *et al.*, 2009, 2011a, 2011b) e por modelos computacionais (Alvarenga *et al.*, 2021; Mariano *et al.*, 2013, 2014, 2020, 2020a, 2020b; Rodrigues *et al.*, 2016) estão ganhando cada vez mais interesse pelos pesquisadores, haja vista que já vêm sendo utilizados por grandes empresas envolvidas na alimentação animal (Mateos *et al.*, 2019).

Além disso, o uso desses modelos é uma alternativa rápida, econômica e mais aplicável de se determinar EMAn dos alimentos que são estabelecidas em função da composição química obtida em laboratório, eliminando o uso de bombas calorimétricas e a necessidade de testes biológicos (determinação *in vivo*), que são caros e muitas vezes demorados (Alvarenga *et al.*, 2013b; Nascimento *et al.*, 2011a). Entretanto, apesar dos diversos trabalhos citados na literatura de modelos de predição de EMAn, a confiabilidade dos mesmos ainda é questionável, devido aos escassos trabalhos de validação (Alvarenga *et al.*, 2013a, 2015).

#### **2.4.1 Modelos matemáticos de previsão e inteligência artificial para a determinação dos valores energéticos de alimentos para frangos de corte**

De acordo com Mateos *et al.* (2019), Noblet *et al.* (2022) e Zaefarian *et al.* (2021), são necessárias mais pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de modelos matemáticos preditivos mais robustos para cada alimento ou para grupos de alimentos semelhantes, independentemente do método analítico empregado e, também, que se baseiem em valores de digestibilidade, idade das aves utilizadas na obtenção das equações de predição, o sexo e a metodologia empregada no estudo devido esses serem fatores que podem interferir no valor energético dos alimentos.

#### 2.4.2 Equação de predição: uma visão geral

Segundo Alvarenga *et al.* (2013b), Mariano *et al.* (2020b), Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) e Rochell *et al.* (2011), uma maneira rápida de se determinar EMAn dos alimentos é utilizando equações de predição, que são estabelecidas em função da composição química dos alimentos, eliminando a necessidade de testes biológicos (determinação *in vivo*), que são caros e muitas vezes demorados.

De acordo com Albino e Silva (1996) e Sedghi *et al.* (2011), o uso das equações pode ser útil para aumentar a precisão na formulação e balanceamento de rações para aves, corrigindo a energia dos alimentos em função da variação na composição química e, também, por essa metodologia considerar a correlação existente entre a variável dependente (EMAn) e as variáveis independentes (exemplo: PB, EE, FB). Portanto, espera-se que a variável a ser predita ( $\hat{Y}$ ) assumam correlações com aquelas análises laboratoriais de composição química mais simples e rotineiras realizadas na indústria, ao passo que os bioensaios dependem de equipamentos onerosos, como calorímetro (Silva *et al.*, 2010).

Sabe-se que as equações de predição são importantes para complementar os valores das tabelas e como complementação ao conhecimento dos ingredientes nacionais, uma vez que os valores obtidos durante a análise dos ingredientes são diferentes, em alguns pontos, dos valores obtidos nas tabelas estrangeiras (Alvarenga *et al.*, 2013b).

Janssen (1989), nas Tabelas Europeias de Valores Energéticos de Alimentos para Aves, propôs uma série de equações preditivas para estimar o valor energético de vários alimentos utilizados na alimentação de aves. Nagata *et al.* (2004), compararam os valores energéticos dos híbridos de milho e alguns subprodutos (quirera e gérmen) estimados pelas equações propostas na literatura por Janssen (1989), Rodrigues (2000) e Rodrigues *et al.* (2001) e observaram que os valores de EMAn obtidos pelas equações de Janssen (1989) ficaram superestimados em relação às demais e que a equação que melhor se adequou foi  $EMAn = 4021,8 - 227,55MM$ , proposta por Rodrigues (2000).

Assim como as equações propostas por Janssen (1989), o NRC (1994) também propõe diversas equações para se estimar valores de EMAn, mas sabe-se que o valor energético dos alimentos é afetado pelas condições de solo e clima da região em que são cultivados e, também, pelo número amostral do experimento. Por isso, alguns autores (Nascimento *et al.*, 2009; Rodrigues, 2000) sugerem que o uso de equações estrangeiras pode não resultar na mesma precisão que as determinadas com dados nacionais. Diante disso, Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) propuseram equações de predição de EMAn de alimentos concentrados energéticos e

proteicos aplicando o princípio de meta-análise que utilizou dados oriundos de vários experimentos no Brasil, no intuito de minimizar os efeitos causados pela variabilidade da composição química dos alimentos e pelo baixo número amostral.

É consenso entre os pesquisadores que a precisão do modelo depende das variáveis que o compõem, neste sentido, Borges *et al.* (2003) determinaram equações para estimar os valores de energia do trigo e de seus subprodutos e constataram que a equação de  $EMAn = 4337,0 - 202,0 FB - 156,8 EE$ , que inclui as variáveis FB e EE, foi a que resultou em maior precisão de predição ( $R^2 = 0,93$ ) de EMAn para os alimentos testados, sendo a FB a variável que melhor se correlacionou (negativamente) com os valores de energia metabolizável. No entanto, este fator isolado não é suficiente para determinar uma boa estimativa dos valores energéticos. Resultado já esperado, visto que o desempenho dos frangos de corte depende do tamanho das partículas da fibra e esse efeito pode estar relacionado ao uso de energia dos alimentos (Amerah *et al.*, 2009). Ainda, segundo Nascimento *et al.* (2011a), a FB atua diretamente sobre os valores de EMAn dos alimentos e, também, participa de forma direta e considerável sobre todas as outras variáveis da composição química.

Souza (2009) trabalhando com alimentos de origem animal entre eles a farinha de vísceras de aves, concluiu que os fatores que contribuíram para gerar as equações mais ajustadas para prever a EMAn nas fases de 10-17, 26-33, 40-47 dias, com frangos e com galos, foram a PB, o EE e a MM [ $EMAn = 8034,50 + 38,71 EE - 52,46 PB - 104,14 MM$  ( $R^2 = 63\%$ )].

Alvarenga *et al.* (2011) demonstraram que todas as equações, propostas por Nascimento (2007) e Nascimento *et al.* (2009), estimaram adequadamente a EMAn de vários alimentos concentrados proteicos e energéticos utilizados na indústria de rações para aves. Entretanto, a equação  $EMAn = 4101,33 + 56,28 EE - 232,97 Cinzas - 24,86 FDN + 10,42 FDA$  com  $R^2 = 0,84$  (em que: FDN = fibra em detergente neutro e FDA = fibra em detergente ácido) foi a que demonstrou os melhores resultados com menores erros-padrão em suas estimativas, conforme resultados obtidos no processo de validação.

Cerrate *et al.* (2019) sugeriram que as variáveis proteína digestíveis, carboidratos digestíveis e extrato etéreo digestíveis, geram melhores ajustes ( $R^2 = 0,99$ ) e que os genótipos dos frangos de corte moderno podem estar mais eficientes em metabolizar os componentes dietéticos fornecidos na ração.

Sabe-se que modelos que abrangem grande número de variáveis podem se tornar complexos, já que algumas características como, por exemplo, a densidade e o diâmetro geométrico médio, podem não estarem facilmente disponíveis, o que muitas vezes podem inviabilizar o uso das equações (Nascimento *et al.*, 2011a, 2011b).

Claramente, se faz necessário mais pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de equações preditivas mais robustas e que devem ser baseadas em variáveis analíticas simples (PB, MM, FB, FDN e FDA) e valores de digestibilidade (Zaefarian *et al.*, 2021).

Segundo Alvarenga *et al.* (2013b), Souza (2009) e Zaefarian *et al.* (2021), várias equações aparentemente bem ajustadas aos dados originais, muitas vezes não respondem satisfatoriamente quando testadas na prática, pois as equações são baseadas apenas na composição química dos alimentos, não levando em consideração, por exemplo, a idade das aves e a digestibilidade de nutrientes em cada alimento. Nesse caso, os autores mencionaram alguns problemas práticos das equações de predição que podem surgir devido: 1) a suposição de que as proteínas, carboidratos e lipídios serem considerados igualmente digeríveis em todos os alimentos; 2) não importa quão precisamente as equações sejam, elas não têm aplicação universal, particularmente ao prever EMA de ingredientes individuais em oposição a dietas formuladas; 3) o valor nutricional dos ingredientes da ração, os requisitos das aves e o manejo mudam ao longo dos anos e, além disso, erros analíticos podem afetar a confiabilidade das equações e; 4) a deficiente validação das equações em bioensaios posteriores.

Apesar dos esforços dos pesquisadores para encontrar equações preditivas acuradas, nem todas as tentativas de relacionar as composições químicas à EMAn foram bem sucedidas. Portanto, se torna essencial validar tais equações para estabelecer sua confiabilidade de uso (Alvarenga *et al.*, 2013a, 2015).

#### **2.4.3 Regressão linear múltipla e meta-análise**

Segundo Alvarenga *et al.* (2011) e Garcia Junior (2015), a regressão linear múltipla (RLM) é uma metodologia da estatística tradicional comumente usada pelos pesquisadores no desenvolvimento de modelos matemáticos preditivos. Um dos primeiros relatos de utilização dessa ferramenta foi em 1956, em um experimento conduzido por Carpenter e Clegg (1956), para determinar a EMA em 17 amostras de cereais, subprodutos de cereais e rações mistas para galinhas poedeiras. Posteriormente, a RLM também foi aplicada em pesquisas com suínos (Noblet *et al.*, 1993) e frangos de corte (Mariano *et al.*, 2020; Olukosi, 2021). Entretanto, verificou-se que os resultados obtidos por meio dos métodos de regressão tradicionais têm se mostrado pouco consistentes (Alvarenga *et al.*, 2011; Mariano *et al.*, 2013).

Diante disso, os pesquisadores têm buscado por equações de predição mais consistentes acerca dos valores energéticos e nutricionais de ingredientes tradicionais e alternativos e, por isso, o princípio da meta-análise têm-se demonstrado de grande valia para o desenvolvimento

dessas equações de RLM (Ahmadi *et al.*, 2020; Mariano *et al.*, 2012, 2013, 2020a, 2020b; Nascimento *et al.*, 2009, 2011a, 2011b; Oliveira *et al.*, 2018).

De acordo com Lovatto *et al.* (2007) e Sauviant *et al.* (2008), a meta-análise pode ser definida como um procedimento estatístico que auxilia os pesquisadores a obter conclusões mais confiáveis, por agruparem, em uma métrica comum, dados provenientes de  $n$  experimentos distintos, encontrados na literatura, mas que estão relacionados entre si por se tratarem do mesmo assunto.

Com isso, os métodos estatísticos empregados na meta-análise visam assegurar a obtenção de uma estimativa combinada precisa e acurada, apesar do grande número de observações e da heterogeneidade existente entre os resultados que, geralmente, podem estar relacionados aos fatores como: época do ano e local de execução do experimento, idade e sexo dos animais utilizados, número de repetições e metodologia utilizada na determinação da variável resposta, dentre outros (Sauviant *et al.*, 2008).

A motivação dos pesquisadores em encontrar uma forma de resumir resultados de vários trabalhos se dá, principalmente, devido ao crescente volume de publicações científicas e a geração de conclusões, algumas vezes destoantes, obtidas em diferentes trabalhos sobre o mesmo tema, tornando-se conveniente a escolha do sistema de ponderação dos experimentos (Mariano *et al.*, 2012, 2013; Souza, 2009).

De modo geral, Lovatto *et al.* (2007) descreveram algumas etapas que são necessárias no desenvolvimento de uma meta-análise tais como: a) definição do objetivo do trabalho, do tema da pesquisa; b) sistematização das informações; c) codificação dos dados; d) filtragem dos dados; e) análise dos dados incluídos na base; f) formação de grupos; g) ponderações; e h) escolha de um modelo estatístico.

Mariano *et al.* (2020) e Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) propuseram que os valores energéticos (EMA e EMAn) dos alimentos concentrados de origem vegetal para dietas de frangos de corte podem ser estimados a partir do seguinte modelo de regressão linear múltipla (equação 1):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_6 x_{i6} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$Y_i$  é o valor da EM do alimento, determinado em ensaio metabólico, no  $i$ -ésimo estudo;  $x_{i1}$ ; ...;  $x_{i6}$  representam as variáveis de composição química do alimento, no  $i$ -ésimo estudo; e  $\varepsilon_i$  denota o erro associado à  $i$ -ésima observação, assumido normal e independentemente distribuído, com média 0 e variância  $\sigma_i^2$ .

Dessa forma, Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b) utilizaram o princípio de meta-análise e desenvolveram modelos de RLM para prever os valores de EMAn de alimentos concentrados de origem vegetal, baseados apenas em sua composição química. Para isso, catalogaram-se dados com valores de EMAn e composição química dos alimentos (PB, EE, MM, FB, FDN e FDA), obtidos da literatura brasileira entre os anos de 1986 a 2006. Essa metodologia utilizada pelos autores considera os efeitos de diferentes fatores que interferem na quantificação da EMAn dos alimentos, tais como a época do ano e local de execução do experimento, idade e sexo dos animais utilizados, número de repetições e metodologia utilizada na determinação da variável resposta, sendo a formação de grupos homogêneos determinada por códigos atribuídos a cada fator, o que demonstrou-se ser viável na elaboração de novas equações preditivas de EMAn.

Assim, Nascimento *et al.* (2009) obtiveram duas equações de RLM que melhor se ajustaram para estimar a EMAn dos alimentos concentrados utilizados em dietas de frangos de corte:  $EMAn = 4101,33 + 56,28EE - 232,97MM - 24,86FDN + 10,42FDA$  ( $R^2 = 0,84$ ) e  $EMAn = 4095,41 + 56,84EE - 225,26MM - 22,24FDN$  ( $R^2 = 0,83$ ), sendo as variáveis MM, FDN e FDA consideradas importantes nos modelos ajustados, pois a retirada do modelo ocasionou redução do coeficiente de determinação.

Em 2011a, os mesmos autores ajustaram duas equações para determinar os valores de EMAn de alimentos energéticos utilizados nas dietas avícolas. As equações foram:  $EMAn = 4371,18 - 26,48PB + 30,65EE - 126,93MM - 52,26FB - 25,14FDN + 24,40FDA$  e  $EMAn = 4205,23 + 30,58EE - 130,35MM - 58,29FB - 28,31FDN + 16,71FDA$ , ambas apresentando um  $R^2$  de 81%. Os autores observaram que os teores de FDN e FDA desempenham um papel importante no processo de obtenção dessas equações e devem ser considerados, uma vez que a retirada dessas variáveis do modelo ocasionou redução do coeficiente de determinação de 0,81 para 0,75. Além disso, em 2011b, os autores obtiveram uma equação para estimar a EMAn de alimentos proteicos fornecidos para frangos de corte, descrita como  $EMAn = 2707,71 + 58,63EE - 16,06FDN$  ( $R^2 = 0,81$ ), sendo as variáveis EE e FDN consideradas as principais responsáveis por explicar as possíveis variações nos teores energéticos dos alimentos proteicos.

Dessa maneira, esses estudos possibilitaram observar quais as variáveis da composição química (principalmente, MM, EE, FDN e FDA) estão mais correlacionadas as alterações do valor energético dos alimentos utilizados nas dietas de frangos de corte, viabilizando o desenvolvimento de equações RLM mais acuradas para a predição dos valores de EMAn dos ingredientes. Assim sendo, é possível encontrar na literatura pesquisas, como as realizadas por Alvarenga *et al.* (2011, 2013a), que já validaram as equações propostas por Nascimento *et al.*

(2009, 2011a, 2011b) através de bioensaios com frangos de corte, confirmando que as equações RLM estimam com acurácia a EMAn de alimentos concentrados energéticos e proteicos.

Adiante, Mariano *et al.* (2020a) também propuseram equações de predição utilizando um modelo de regressão linear múltipla ponderada (RLMP), considerando os efeitos principais e de interações entre as variáveis explicativas, para estimar a EMAn de alimentos concentrados energéticos e proteicos comumente usados nas formulações de rações para frangos de corte. Para o ajuste dos modelos de RLMP, os autores utilizaram o banco de dados de alimentos descrito por Nascimento *et al.* (2009), considerando o princípio da meta-análise, sendo a técnica de componentes principais utilizada na formação de grupos homogêneos de resultados experimentais. As doze equações de predição de EMAn foram baseadas no quanto a composição química do alimento (PB, MM, EE e FB) está relacionado com a categoria dos alimentos (concentrados energéticos e concentrados proteicos), com o tipo de alimentos (milho, farelo de soja, seus coprodutos e outros alimentos) e com a categoria de aves (pintos e galos), obtidas por meio da combinação entre os níveis das variáveis categóricas do conjunto de dados. Posteriormente, utilizaram-se dados de EMAn da literatura provenientes de vários ensaios metabólicos para comparação com os valores preditos pelos modelos de RLMP selecionados, obtendo uma acurácia de  $R^2 = 0,87$ . Dessa forma, tais equações podem ser especificamente aplicadas para cada tipo de alimento fornecido nas dietas de frangos de corte.

Garcia Júnior (2015) utilizando a meta-análise de informações da composição química das farinhas de carne e ossos nacionais e internacionais, obteve uma equação de predição da  $EMAn = -2380,51 + 99,35PB + 64,08Ca - 255,28P$ , que apresentou coeficiente de determinação com  $R^2$  de 0,80. Já Oliveira *et al.* (2018) ao utilizarem a mesma metodologia, determinaram equações para estimar os valores de EMAn das farinhas de vísceras de aves (FV) e das farinhas de carne e ossos (FCO) nacionais utilizadas em dietas de frangos de corte e de acordo com os coeficientes de determinação, obtiveram as seguintes equações para FV e FCO:  $EMAn = 6139 - 45,5 PB + 0,356 EB - 123,5 MM$  ( $R^2 = 0,83$ ) e  $EMAn = 2267 + 19,9 PB + 67,9 EE - 44,4 MM$  ( $R^2 = 0,90$ ), respectivamente. Assim, os autores concluíram que, considerando a ampla utilização destes ingredientes em dietas de aves, a composição química, os valores energéticos dos ingredientes de origem animal e sua interação podem ser utilizados como dados para o desenvolvimento de equações para prever os teores EMAn desses alimentos, sendo oportuno validar essas equações.

Todavia, a aplicabilidade e robustez dos resultados da EMAn dos ingredientes quando se emprega o método indireto de RLM na formulação de rações para frangos de corte podem ser afetados por inúmeros fatores, incluindo: a composição química do alimento, os níveis de

inclusão do ingrediente teste na dieta referência, o número de repetições utilizado para cada dieta, o tipo de instalação, a idade e linhagem das aves, o método de bioensaio utilizado, o período de adaptação das aves antes de iniciar as coletas experimentais e o manejo (Olukosi, 2021; Wu *et al.*, 2020).

Embora se tenha inúmeras pesquisas citadas na literatura que utilizem a meta-análise como técnica para reunir estudos independentes e que os processos nesta área estejam bem elucidados, ainda existem alguns cuidados que devem ser considerados ao se realizar a aplicação desse conjunto de técnicas estatísticas. Em suma, Wang e Bushman (1999) relataram que as principais dificuldades para a utilização das técnicas de meta-análise seriam a transformação dos resultados de cada estudo numa métrica comum, a verificação da homogeneidade dos resultados, a modelagem da variação entre estudos e a análise de sensibilidade.

Segundo Noblet *et al.* (2022), cuidados devem ser tomados quando esta abordagem for utilizada na prática, pois quaisquer erros experimentais, humanos ou laboratoriais podem afetar todos os valores estimados de energia dos ingredientes envolvidos, pois todos os cálculos dependem uns dos outros no processo de regressão.

#### **2.4.4 Redes neurais artificiais**

Modelos de redes neurais artificiais (RNAs) têm sido recentemente utilizados na previsão de valores energéticos de alimentos para aves (Ahmadi *et al.*, 2007, 2008; Lotfi *et al.*, 2020; Mariano *et al.*, 2013, 2020a; Perai *et al.*, 2010; Sedghi *et al.*, 2011) em uma tentativa de aumentar a acurácia da determinação desses valores.

As RNAs fazem parte de um subcampo da inteligência artificial ou aprendizado de máquina (Mariano *et al.*, 2014) e consistem em modelos computacionais formados por unidades de processamento simples baseadas na estrutura do cérebro humano, assim chamados de neurônios artificiais (Binoti *et al.*, 2013). Segundo Mariano *et al.* (2013), essas unidades permitem que o sistema simule comportamentos, como aprendizado, capacidade de associação, generalização e abstração, que são baseados na lógica de parâmetros.

Portanto, uma RNA é um sistema adaptativo que muda sua estrutura com base em informações externas ou internas que fluem pela rede e que possui a habilidade de aprender por meio de exemplos, generalizar informações aprendidas e, logo, dar respostas coerentes a novos dados (Mariano *et al.*, 2014). Por causa disso, os modelos de RNA são frequentemente usados

para substituir sistemas matemáticos complexos descritos por inúmeras equações diferenciais (Hunter; Wilamowski, 2011).

De acordo com Abreu *et al.* (2020), a aplicabilidade das RNAs está associada às situações em que as informações de entrada e saída são interligadas por uma relação não linear de variáveis dependentes (por exemplo, EMAn) e independentes (por exemplo, PB, EE, MM). Com isso, as RNAs podem ser utilizadas para prever e representar parâmetros não quantificados a partir de dados avaliados por padrões de comportamento, permitindo assim o desenvolvimento de técnicas para a resolução de problemas complexos (Matin *et al.*, 2012).

Mariano *et al.* (2013) e Perai *et al.* (2010) verificaram em seus estudos que o uso de modelos relacionados às redes neurais artificiais garante previsões mais acuradas dos valores de EMAn do que as obtidas por equações de predição clássicas. De acordo com Mariano (2014), uma das vantagens de prever valores energéticos através de redes neurais artificiais é a possibilidade de incorporar um maior número de variáveis que influenciam a variabilidade da energia metabolizável, algo que não é tão viável em um modelo de regressão múltipla. Além do que, a aplicação prática de modelos de regressão mais complexos se torna inviável para os nutricionistas da área avícola (Mariano, 2014). Dessa forma, ao empregar modelos de redes neurais artificiais, é possível alcançar resultados mais precisos devido ao melhor controle da variabilidade das variáveis que interferem nos valores de EMAn dos alimentos (Mariano, 2014).

Perai *et al.* (2010) realizaram uma comparação de RNA com outras abordagens estatísticas para a previsão da EMVn da farinha de carne e ossos com base em PB, EE e teor de cinzas. Os autores compararam a capacidade preditiva de uma RNA com dois métodos estatísticos: mínimos quadrados parciais (MQP) e RLM utilizando os mesmos conjuntos de dados de treinamento e, obtiveram os resultados de  $R^2$  para os modelos RLM, MQP e RNA de 0,38, 0,36 e 0,94, respectivamente. Por fim, os autores sugeriram que a RNA pode ser usada como uma abordagem promissora para a previsão rápida do valor nutritivo da farinha de carne e ossos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Sedghi *et al.* (2011), ao compararem o método de RNA na previsão da EMAn do sorgo ao método de RLM. Os autores observaram que as RNAs foram mais precisas na estimação e mais eficientes na estimativa desses valores. Esses autores afirmaram que isso se deve, principalmente, à alta correlação entre a composição química do alimento e os valores de energia metabolizável do alimento.

Mariano *et al.* (2013) implementaram um sistema de rede neural multicamada ou *multilayer perceptron* (MLP) para estimar os valores de EMAn de rações energéticas e proteicas de origem vegetal, comumente utilizadas pela indústria de ração avícola. Os autores

observaram que o modelo MLP 7-5-3-1 apresentou a maior acurácia de predição com valores de  $R^2 = 0,86$  e erro percentual absoluto médio (MAPE) de 8,30% quando comparado ao modelo teste MLP 7-5-5-1 com  $R^2 = 0,83$  e MAPE = 8,39%. Assim, o modelo MLP 7-5-3-1 foi considerado o mais adequado pelos autores em prever a EMAn tanto para alimentos energéticos quanto para os proteicos em dietas de frangos de corte. A partir desses resultados, os autores puderam desenvolver uma calculadora chamada *Excel*<sup>®</sup> *AMEn calculator* utilizando o melhor modelo obtido para prever de maneira rápida e eficiente os valores de EMAn de alimentos concentrados para frangos de corte. Posteriormente, essa calculadora deu origem ao aplicativo *Android* denominado *AMEn Predictor* (<https://apkpure.com/br/amen-predictor/com.amenpredictor>), sendo ambos baseados em dados exclusivamente nacionais (Mariano *et al.* 2020a; Nascimento *et al.* 2009; Rodrigues *et al.*, 2016).

No aplicativo *AMEn Predictor* para a determinação dos valores de EMAn de um determinado alimento, devem ser inseridos os seguintes parâmetros de entrada no modelo MLP implementado: categoria do alimento (CAT - alimento concentrado energético ou alimento concentrado proteico), tipo do ingrediente (ING - milho, soja, coprodutos de milho ou soja e outros alimentos), tipo do animal utilizado no bioensaio (ANIMAL - pintos ou galos) e composição química (PB, EE, MM e FB). A partir dessas informações é possível prever os valores de EMAn na matéria seca (MS) ou na matéria natural (MN).

Lotfi *et al.* (2020) também desenvolveram uma calculadora no *Excel*<sup>®</sup>, chamada de *ANN\_WB\_ME\_Poultry*, visando fornecer aos usuários uma ferramenta fácil e rápida para a previsão de valores de EMVn de amostras de farelo de trigo a partir da sua composição química. Os autores compararam os métodos de RLM e de RNA para estimarem a EMVn de amostras de farelo de trigo (FT). Os resultados demonstraram que o modelo de RNA desenvolvido e utilizado na calculadora ( $R^2 = 0,90$ ; Erro quadrático médio (RMSE) = 64,07 kcal kg<sup>-1</sup> MS para conjunto de treinamento; e  $R^2 = 0,89$ ; RMSE= 82,69 kcal kg<sup>-1</sup> MS para o conjunto de teste) produziu valores de predição de EMVn para o FT relativamente melhores do que aqueles produzidos por RLM convencional ( $R^2 = 0,81$ ; RMSE= 86,76 kcal kg<sup>-1</sup>MS para conjunto de treinamento; e  $R^2 = 0,84$ ; RMSE = 86,61 kcal kg<sup>-1</sup> MS para conjunto de teste). Assim, os autores afirmaram que o modelo RNA pode ser utilizado para modelar a relação entre composição química e o conteúdo energético de amostras de farelo de trigo.

Embora a RNA seja considerada robusta e flexível, de acordo com Mariano *et al.* (2013), existem algumas desvantagens em seu uso, pois requer um conjunto de dados de treinamento grande e de alta qualidade; é necessário comparar diferentes arquiteturas para selecionar a

melhor; as variáveis utilizadas em uma RNA devem ser cuidadosamente selecionadas a priori e pode haver risco de *overfitting*.

Segundo Bishop (1995), Haykin (2007) e Statsoft Inc. (2008), o *overfitting* ou sobreajuste, pode ocorrer quando às redes neurais MLP possuírem muitas camadas escondidas e muitos neurônios, ocasionando aumento do tempo de treinamento e, provavelmente, a MLP irá “copiar” ou “decorar” a relação entre os dados de entrada e saída, causando o ajuste perfeito dos dados na fase de treino da rede neural (*overfitting*). Ainda, os autores relatam que isso compromete a capacidade de generalização da MLP, ou seja, é possível ter alta acurácia para o conjunto de treinamento, mas pobre interpolação dos dados para os conjuntos de teste e validação.

Apesar da RNA ser uma proposta promissora para aumentar a acurácia da predição dos valores energéticos dos alimentos, essa metodologia possui particularidades como, por exemplo, a necessidade de um computador com um *software* instalado adequadamente para a execução da predição e, também, um treinamento adequado das redes neurais (Garcia Junior, 2015). Outro ponto, é que os modelos matemáticos são treinados com uma série de dados e são testados com dados diferentes dos que foram utilizados para os treinamentos das redes (Garcia Junior, 2015). Sendo assim, a falta dessas características pode inviabilizar a utilização da RNA para a predição dos valores energéticos dos ingredientes.

Neste sentido, Mariano *et al.* (2020a) destacaram a importância do aplicativo *AMEn Predictor*, gerado com a implementação de uma RNA para prever a EMAn, pois os estudos isolados raramente fornecem respostas definitivas. Dessa forma, o uso do modelo RNA implementado no aplicativo mostrou-se viável, combinando resultados provenientes de vários ensaios distintos, mas relacionados entre si, o qual permitiu estimativas que resumem o todo, com conclusões mais precisas do que aquelas disponíveis de forma isolada.

Contudo, destaca-se que o aplicativo foi desenvolvido utilizando dados catalogados somente da literatura brasileira até o ano de 2007, sendo necessária a atualização do banco de dados (literatura nacional e internacional) e do referido aplicativo para, posteriormente, realizar a sua validação com bioensaios utilizando frangos de corte. Assim, seria possível indicar seu uso de forma segura e acurada na prática, facilitando o dia a dia dos formuladores de rações, uma vez que o uso de dispositivos móveis (celulares, *smartphones*, etc) acompanham os nutricionistas rotineiramente, viabilizando a utilização do aplicativo.

### 2.4.5 Comitê de redes neurais

Na RNA todas as camadas são compostas por neurônios que apresentam capacidade computacional, sendo uma rede progressiva em que as saídas dos neurônios são conectadas apenas às entradas dos neurônios da próxima camada, sem outras conexões dentro das camadas e, conseqüentemente, o sinal de entrada se propaga pela rede, camada por camada, em uma direção progressiva (Mariano *et al.*, 2014).

Já a combinação de várias redes constitui o chamado comitê de redes neurais (CRNAs), podendo ser usada como um método de aprendizado supervisionado ou não supervisionado. Assim, espera-se que um CRNAs possa produzir resultados mais precisos do que qualquer especialista (rede única), porque nessa metodologia o conhecimento de vários especialistas é combinado para chegar a uma decisão (Haykin, 2007; Mariano *et al.*, 2014). De acordo com Mariano *et al.* (2014), o uso de um CRNA busca aprimorar a generalização dos estimadores, evitando o *overfitting* de dados e a convergência da rede para um mínimo local. Ainda, descreveram que um CRNA fornece uma fusão de conhecimentos adquiridos por mais de um componente para chegar a uma solução global, que é supostamente superior àquela alcançada por qualquer componente agindo sozinho.

Mariano *et al.* (2014) objetivaram em sua pesquisa associar alguma incerteza sobre as previsões de redes neurais, considerando os intervalos de credibilidade das previsões de um comitê de rede implementado para estimar os valores de EMAN dos alimentos energéticos e concentrados proteicos, geralmente utilizados pela indústria de ração para aves. Os autores observaram que o comitê formado por N=1000 redes utilizando a moda empírica das previsões como o estimador garantiu uma maior acurácia na previsão dos valores de EMAN de alimentos concentrados para frangos de corte, visto que obteve uma maior porcentagem de acerto da previsão (PCP) = 95,8%. Os autores também avaliaram a acurácia dos modelos com base em seus valores de medidas de erro entre os valores observados e previstos, e a moda da distribuição empírica apresentou menores valores de desvio absoluto médio (MAD = 177,66) e erro percentual absoluto médio (MAPE = 5,97%) em relação ao estimador da média e da mediana. Portanto, o uso de um comitê de rede é recomendado por permitir associar alguma incerteza à previsão usando um intervalo de maior densidade de probabilidade (HPD).

Mariano *et al.* (2020b) compararam o modelo comitê de redes neurais (CRNA) e o modelo de regressão linear múltipla ponderada (RLMP) para estimar a EMAN de alimentos para aves e, com isso, observaram que a PCP foi maior para CRNA (95,83%) quando comparada a equação predita pela RLMP (72,92%) e que os  $R^2$  obtidos para CRNA e equação

predita foram de 0,89 e 0,87, respectivamente. Assim, os autores demonstraram que o comitê de rede neural foi o modelo que apresentou maior acurácia de predição e recomendaram a utilização do modelo CRNA por ser o mais preciso em prever valores de EMAn para alimentos concentrados energéticos utilizados pela indústria avícola, do que aquelas obtidas pela equação de predição por uma RLMP.

Diante disso, os resultados obtidos por Mariano *et al.* (2014, 2020b) reforçam a conclusões de estudos anteriores (Lotfi *et al.*, 2020; Mariano *et al.*, 2013; Perai *et al.*, 2010; Sedghi *et al.*, 2011) de que o uso de modelos relacionados a RNA garante previsões mais precisas do que as obtidas por métodos estatísticos clássicos, na área de nutrição e produção animal.

Entretanto, Mariano *et al.* (2014) mencionaram que a grande desvantagem no uso de um CRNA, ou mesmo de apenas uma RNA, em problemas de predição é que só é possível obter predições pontuais. Segundo os autores, as previsões pontuais não fornecem nenhuma informação sobre as incertezas associadas ou indicam seu nível de confiabilidade e, para resolver este problema e poder avaliar o desempenho geral das RNAs ou CRNAs, se faz necessário considerar intervalos de previsão críveis, que atribuem alguma incerteza às previsões pontuais. Desta maneira, soluções para o cálculo dos intervalos de predição da RNA têm sido propostos na literatura por Chryssolouris *et al.* (1996), Hwang e Ding (1997), Shao *et al.* (1997) e Siwek *et al.* (2009).

#### **2.4.6 Aplicação de redes Bayesianas**

As redes bayesianas (RB) são modelos gráficos, que consistem na representação gráfica e probabilística (distribuições de probabilidade condicional e conjunta) das variáveis (Koller; Friedman, 2009; Scutari; Denis, 2015; Spirtes *et al.*, 2000).

De acordo com Töpner *et al.* (2017), para investigar as correlações existentes entre as características, podem ser utilizados os métodos de aprendizado de RB, uma vez que as RBs são modelos que representam a distribuição conjunta de variáveis aleatórias no que diz respeito às suas independências condicionais. Segundo os autores, existem dois tipos principais de algoritmos para aprendizagem de uma RB: algoritmos baseados em restrições e baseados em pontuação. O primeiro utiliza uma sequência de testes de independência condicional para a aprendizagem da rede entre as variáveis, enquanto o segundo compara o ajuste de muitas redes possíveis (idealmente todas) aos dados empíricos usando uma pontuação (Töpner *et al.*, 2017).

Além das RNAs e CRNAs, as redes bayesianas também podem ser consideradas adequadas para predição em estudos na área de zootecnia devido à sua capacidade superior de capturar e expressar dependências complexas de covariáveis e variáveis resposta quando comparado com modelos de previsão tradicionais (Alvarenga *et al.*, 2020, 2021; Bishop, 2006; Gianola *et al.*, 2011).

Gianola *et al.* (2011) e Morota *et al.* (2013) investigaram o uso de modelos RBs para prever valores fenotípicos a partir de toda as informações moleculares disponíveis advindas de uma base de dados de gado leiteiro e de cultivares de trigo visando que esses modelos sejam capazes de capturar arquiteturas de redes genéticas complexas. E, de acordo com os autores, os resultados sugeriram que as redes bayesianas podem ser úteis em prever características complexas usando informações genômicas de alta dimensão (uma situação em que o número de incógnitas excede o tamanho da amostra), pois essa metodologia pode capturar a não linearidade, de forma adaptativa, podendo ser útil quando a previsão de fenótipos for crucial.

Felipe *et al.* (2015) comparam a eficiência da regressão múltipla (*stepwise*), RB e RNA para prever a produção individual total de ovos de codornas europeias usando as características de peso corporal semanal, produção parcial de ovos e qualidade de ovos e, observaram que modelos de RB e RNA foram melhores em prever o desempenho para a pré-produção total de ovos em relação ao modelo de RLM. Os autores sugeriram que a RB é uma boa ferramenta para descrever distribuições de forma mais parcimoniosa por melhorar a generalização e, além disso, RB trabalhou bem com RNA para pré-seleção de variáveis de entrada para predição do número de ovos produzidos em codornas europeias.

Töpner *et al.* (2017) conduziram um experimento com milhos e utilizaram a RB para analisar as relações entre as características em níveis genômicos e residuais. As RBs foram obtidas através de classificação em termos de qualidade de ajuste e capacidade preditiva, e os comparou com a rede totalmente recursiva de múltiplas características padrão. Assim, os autores concluíram que ao ilustrar as conexões de características com relação à sua natureza genômica e residual separadamente e identificar conexões espúrias, obtiveram uma imagem mais clara das características, e que elas são mais úteis para uma previsão de múltiplas características e no processo de seleção indireta.

No entanto, o uso de RB para trabalhos de zootecnia não se restringe apenas a predição para o melhoramento e seleção genômica em gado leiteiro, cultivares de trigo e milho e, produção de ovos em codornas.

Para encontrar resultados mais precisos de EMAn, Alvarenga *et al.* (2021) propuseram avaliar o uso de redes Bayesianas para a predição dos valores de EMAn de alimentos

energéticos e proteicos de origem vegetal utilizados na formulação de rações para frangos de corte. Após a realização das análises, os autores observaram que o modelo com a maior acurácia (erro quadrático médio = 66529,8 e  $R^2 = 0,87$ ) foi ajustado com o algoritmo max-min hill climb (MMHC) usando 80% e 20% dos dados para treinamento e teste, respectivamente. Assim, concluíram que as previsões dos valores energéticos utilizando essa nova metodologia foram precisos e podem ser recomendados aos profissionais da área de zootecnia para o preparo de rações balanceadas.

De acordo com Alvarenga *et al.* (2021), entre os benefícios do uso de RB, destacam-se: 1) a redução dos custos de ensaios *in vivo* para determinar os valores de EMAn; 2) o aumento na precisão das previsões de EMAn; 3) redução na variabilidade dos valores tabulados para EMAn; 4) expansão do uso de redes Bayesianas para áreas onde o aprendizado de máquina e métodos relacionados estão começando a ser empregado e; 5) a captura da dependência condicional entre variáveis aleatórias em um sentido mais amplo do que os métodos tradicionais podem alcançar.

Desse modo, fica evidente a necessidade de mais estudos aplicando as redes bayesianas, principalmente na área de nutrição animal, pois por se tratar de uma linha de pesquisa inédita em nutrição de aves, outras pesquisas podem ser desenvolvidas por pesquisadores interessados em prever os valores de EMAn de alimentos que são comumente utilizados na alimentação das aves (Alvarenga *et al.*, 2020; 2021).

De maneira geral, a aplicação dos métodos e técnicas computacionais têm sido promissoras e possuem capacidade de impactar, diretamente, o processo produtivo na agroindústria. Porém, Mateos *et al.* (2019) e Zaefarian *et al.* (2021) sugerem aos nutricionistas e gerentes de fábricas de rações que também utilizem sua própria experiência, conhecimento do local de trabalho e raciocínio lógico ao avaliar os prós e contras de cada um dos métodos disponíveis na literatura para estimar o conteúdo energético de ingredientes e dietas. Ainda, segundo eles, sem que haja um bom senso, nenhuma das metodologias disponíveis fornecerá estimativas precisas em condições práticas.

## REFERÊNCIAS

- AARDSMA, M. P.; MITCHELL, R. D.; PARSONS, C. M. Relative metabolizable energy values for fats and oils in young broilers and adult roosters. **Poultry Science**, Champaign, v. 96, n. 7, p. 2320-2329, 2017.
- ABDOLLAHI, M. R.; RAVINDRAN, V.; SVIHUS, B. Pelleting of broiler diets: an overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. **Animal Feed Science Technology**, Netherlands, v. 179, p. 1-23, 2013.
- ABDOLLAHI, M. R. *et al.* Application of apparent metabolizable energy versus nitrogen-corrected apparent metabolizable energy in poultry feed formulations: A continuing conundrum. **Animals**, Switzerland, v. 11, p. 2174, 2021.
- ABREU, L. H. P. *et al.* Artificial neural networks for prediction of physiological and productive variables of broilers. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 1, p. 1-9, 2020.
- AGUIRRE, L. *et al.* Apparent metabolizable energy and ileal amino acid digestibility of commercial soybean meals of different origins in broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 103, n. 7, p. 103786, 2024.
- AHMADI, H. A.; MOTTAGHITALAB, M.; NARIMAN-ZADEH, N. Group method of data handling-type neural network prediction of broiler performance based on dietary metabolizable energy, methionine, and lysine. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 16, p. 494–501, 2007.
- AHMADI, H. *et al.* Prediction model for true metabolizable energy of feather meal and poultry offal meal using group method of data handling-type neural network. **Poultry Science**, Champaign, v. 87, p. 1909-1912, 2008.
- AHMADI, H.; RASOLI MARIVANI, V.; MOHAMMADI, Y. Meta-analysis of metabolizable energy of wheat samples in poultry for determining regression equations based on chemical compositions. **Animal Production**, Indonesia, v. 22, n. 2, p. 281-288, 2020.
- ALBINO, L. F. T.; SILVA, M. A. Valores nutritivos de alimentos para aves e suínos determinados no Brasil. *In: Simpósio Internacional sobre exigências nutricionais de aves e suínos, 1996, Viçosa. Anais...* Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, p. 303-318, 1996.
- ALBINO, L. F. T.; SILVA, M. A. **Tópicos avançados em Exigências Nutricionais para frangos de corte.** p. 59-64. *In: Congresso internacional. PUCRS- Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia. Porto Alegre, 1996.*
- ALVARENGA, R. R. *et al.* Validation of Prediction Equations of Energy Values of a Single Ingredient or Their Combinations in Male Broilers. **Animal Bioscience**, Republic of Korea, v. 28, n. 9, p. 1335-1344, 2015.
- ALVARENGA, R. R. **Avaliação de equações de predição dos valores energéticos do milho e do farelo de soja na formulação de rações para frangos de corte.** 2012. 92 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ALVARENGA, R. R. *et al.* Energetic values of feedstuffs for broilers determined with *in vivo* assays and prediction equations. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 168, p. 257–266, 2011.

ALVARENGA, R. R. *et al.* Formulation of diets for poultry: the importance of prediction equations to estimate the energy values. **Archivos de Zootecnia**, Spain, MG, v. 62, p. 1-11, 2013b.

ALVARENGA, R. R. *et al.* Validation of prediction equations to estimate the energy values of feedstuffs for broilers: Performance and carcass yield. **Asian-Australasian: Journal of Animal Sciences**, Republic of Korea, v.26, p. 1474–1483, 2013a.

ALVARENGA, T. C. *et al.* Application of Bayesian networks to the prediction of the AMEn: a new methodology in broiler nutrition. **Translational Animal Science**, Oxford, v. 5, n. 1, 2021.

ALVARENGA, T. C. *et al.* Inovação na predição dos valores energéticos de alimentos para aves: um estudo bibliométrico sobre as Redes Bayesianas. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v.38, n.3, p.274-289, 2020.

AMERAH, A. M.; RAVINDRAN, V.; LENTLE, R. G. Influence of insoluble fiber and whole wheat inclusion on the performance, digestive tract development and ileal microbiota profile of broiler chickens. **British Poultry Science**, Oxford, v. 50, p. 366-75, 2009.

AZEVEDO, D. M. S. 1997. **Fatores que afetam os valores de metabolizável da farinha de carne e ossos para aves**. 1997. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). p. 58. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

BABATUNDE, O. O.; PARK, C. S.; ADEOLA, O. Nutritional potentials of atypical feed ingredients for broiler chickens and pigs. **Animals**, Switzerland, v. 11, n. 5, p. 1196, 2021.

BARZEGAR, S. *et al.* Metabolizable energy of corn, soybean meal and wheat for laying hens. **Poultry Science (In press)**, Australia, v. 98, n. 11, p. 5876-5882, 2019.

BARZEGAR, S. *et al.* Factors affecting energy metabolism and evaluating net energy of poultry feed. **Poultry Science**, Champaign, v. 99, n. 1, p. 487-498, 2020.

BELKHANCHI, H. *et al.* Formulation, optimization of a poultry feed and analysis of spectrometry, biochemical composition and energy facts. **South African Journal of Chemical Engineering**, Netherlands, v. 44, p. 31-41, 2023.

BENZERTIHA, A. *et al.* *Tenebrio molitor* and *Zophobas morio* full-fat meals in broiler chicken diets: effects on nutrients digestibility, digestive enzyme activities, and cecal microbiome. **Animals**, Switzerland, v. 9, p. 1128, 2019.

BERTECHINI, A. G. **Nutrição de Monogástricos**. 3ª Edição Revisada. Lavras: Editora UFLA, 2021. 375p.

BERTECHINI, A. G. *et al.* Metabolizable energy values of soybean meals and soybean oil for broilers at different ages. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 41, p. e44540, 2019.

BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.B. M.; LEITE, H. G. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Viçosa, MG, v. 8, n. 1, p. 125-129, 2013.

BISHOP, C. M. **Pattern recognition and machine learning**. New York: Springer, 2006. 738p.

BISHOP, C. **Neural networks for pattern recognition**. Oxford: Oxford University, 1995. 482 p.

BORGES, F. M. O. *et al.* Equações de regressão para estimar valores energéticos do grão de trigo e seus subprodutos para frangos de corte, a partir de análises químicas. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Lavras, MG, v. 55, n. 6, p. 734-746, 2003.

BORGES, F. M. O. *et al.* Regression equations to evaluate the energy values of wheat grain and its by-products for broiler chickens from chemical analyses. **Brazilian Journal of Veterinary and Animal Science**, São Paulo, v. 55, p. 734-746, 2003.

BORGES, F. M. O.; ROSTAGNO, H. S.; SAAD, C. E. P. Efeito do consumo de alimento sobre os valores energéticos do grão de trigo e seus subprodutos para frangos de corte, obtidos pela metodologia da alimentação forçada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 28, n. 6, p. 1392-1399, 2004.

BORGES, F. M. O. *et al.* Comparação de métodos de avaliação dos valores energéticos do grão de trigo e seus subprodutos para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v.55, n.6, p.710-721, 2003.

BRUGALLI, I. *et al.* Efeito do tamanho de partícula e do nível de substituição nos valores energéticos da farinha de carne e ossos para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 753-757, 1999.

BRUM, P. A. R. *et al.* Composição química e energia metabolizável de ingredientes para aves. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2000.

BRUMANO, G. *et al.* Composição química e valores de energia metabolizável de alimentos protéicos determinados com frangos de corte em diferentes idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 35, n. 6, p. 2297-2302, 2006.

CAO, M. H.; ADEOLA, O. Energy value of poultry byproduct meal and animal-vegetable oil blend for broiler chickens by the regression method. **Poultry Science**, Champaign, v. 95, n. 2, p. 268-275, 2016.

CARPENTER, K. J.; CLEGG, K. M. The metabolizable energy of feeding stuffs in relation to their chemical composition. **Journal Science Food and Agriculture**, United States, v. 7, n.1, p. 45-51, 1956.

CERRATE, S. *et al.* Predicting nutrient digestibility and energy value for broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 98, n. 9, p. 3994-4007, 2019.

CHRYSSOLOURIS, G. L. M; RAMSEY, A. Confidence interval prediction for neural network models. **IEEE Transactions on Neural Networks**, Cambridge, v. 7, p. 229–232, 1996.

CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil). Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro#:~:text=Fonte%3A%20USDA%2F2023%20Elabora%C3%A7%C3%A3o%3A,TradeMap%2C%20ITC%2C%202023>. Acesso em: 6 nov. 2024.

COBB500. 2022. Broiler-Guide. Cobb-500™ Broiler: Performance e Nutrition Supplement. COBB-VANTRESS, p.16. Disponível em: <https://cobbgenetics.com/assets/Cobb-Files/2022-Cobb500-Broiler-Performance-Nutrition-Supplement.pdf>. Acesso: 10 jul 2024.

CÓRDOVA-NOBOA, H. A. *et al.* Corn drying temperature, particle size, and amylase supplementation influence growth performance, digestive tract development, and nutrient utilization of broilers. **Poultry Science**, Champaign, v.99, n. 11, p. 5681-5696, 2020.

COWIESON, A. J. Strategic selection of exogenous enzymes for corn/ soy-based 470 poultry diets. **Poultry Science**, Champaign, v. 47, p. 1–7, 2010.

COWIESON, A.J.; BEDFORD, M.R.; RAVINDRAN, V. Interactions between xylanase and glucanase in maize-soy-based diets for broilers. **British Poultry Science**, Oxford, v. 51, n. 2, p. 246- 257, 2010.

CVB. CVB Feed Table 2018: Chemical composition and nutritional values of feedstuffs. Wageningen, The Netherlands, **CVB**; 2018.

DALE, N. Advances in defining the nutritive quality of feed ingredients. **Proc. Australian Poultry Science Symposium**, Australia, v. 9, p. 66-73, 1997.

DALE, N.; FULLER, H. L. Correlation of Protein Content of Feedstuffs with the Magnitude of Nitrogen Correction in True Metabolizable Energy Determinations. **Poultry Science**, Champaign, v. 63, p. 1008–1012, 1984.

DUARTE, K. F. *et al.* Efeito dos níveis de energia e programas de alimentação sobre a qualidade de carcaça e desempenho de frangos de corte abatidos tardiamente. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 39-47, 2007.

EMMANS, G. C. Growth, body composition and feed intake. **World's Poultry Science Journal**, United Kingdom, UK, v. 43, p. 208-227, 1987.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de pesquisa de soja e arroz. **Tabela de composição química e valores energéticos para suínos e aves**. 3ª ed. Concórdia: CNPSA, 1991. 97 p. (Documentos, n. 19).

EVONIK. AMINODAT 5.0. **Amino Acid Analysis**. In: Redshaw, M. S. *et al.* eds. Evonik Degussa GmbH, Hanau- Wolfgang, Germany, 2016.

EYNG, C. *et al.* Composição química, valores energéticos e aminoácidos digestíveis verdadeiros de farinhas de vísceras para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, p. 779-786, 2011.

FAO, INRA, CIRAD, AFZ. 2022. Feedipedia: on-line encyclopedia of animal feeds. Disponível em: <http://www.feedipedia.org/>; Acesso: 07 jul. 2024.

FARIA FILHO, D. E. *et al.* Avaliação da farinha de carne e ossos na alimentação de frangos de corte. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 4, p. 001-009, 2002.

FARREL, D. J. Rapid determination of metabolizable energy of foods using cockerls. **British Poultry Science**, Champaign, v. 19, n. 3, p. 303-308, 1978.

FEDNA (Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal). **Revisión de las Normas FEDNA de Composición y Valor Nutritivo de Alimentos para la Fabricación de Piensos Compuestos**, 4th ed.; FEDNA: Madrid, Spain, 2017.

FELIPE, V. P. *et al.* Using multiple regression, Bayesian networks and artificial neural networks for prediction of total egg production in European quails based on earlier expressed phenotypes. **Poultry Science**, Champaign, v. 94, n. 4, p. 772–780, 2015.

FERREIRA, G. S. *et al.* Ajuste preciso do nível de energia na dieta de frangos de corte para controle do desempenho e da composição lipídica da carne. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 1, p.104-110, 2015.

FREITAS, E. R. *et al.* Energia metabolizável de alimentos na formulação de ração para frangos de corte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 107-115, 2006.

GARCIA JUNIOR, A. A. P. **Determinação indireta e validação do valor energético de alimentos de origem animal para frangos de corte**. 2015. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.146 p.

GIACOBBO, F. C. N. *et al.* Composition and availability of nutrients of three corn hybrids dried at different temperatures in the diets of broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 50, p. e20210035, 2021.

GIANOLA, D. H. *et al.* Predicting complex quantitative traits with Bayesian neural networks: a case study with Jersey cows and wheat. **BMC Genetics**, United Kingdom, UK, v. 12, p. 87, 2011.

HAYKIN, S. **Neural networks-a comprehensive foundation**. 3<sup>rd</sup> ed. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 2007.

HILL, F. W.; ANDERSON, D. L. Comparison on metabolizable energy and productive energy determinations with growing chicks. **The Journal of Nutrition**, United States, v. 64, p. 587–604, 1958.

- HUART, F. *et al.* *In vitro* and *in vivo* assessment of the effect of initial moisture content and drying temperature on the feeding value of maize grain. **British Poultry Science**, Oxford, v.59, p. 452-462, 2018.
- HUNTER, D.; WILAMOWSKI, B. Parallel multi-layer neural network architecture with improved efficiency. *In: International conference on human system interaction (HSI 2011)*, Yokohama, Japan, 2011.
- HWANG, J. T. G.; DING, A. A. Prediction intervals for artificial neural networks. **Journal of the American Statistical Association**, United States, v. 92, p.748–757, 1997.
- INRA (**Institut National de la Recherche Agronomique**). Tables de Composition et de Valeur Nutritive des Matieres Premières Destinées aux Animaux d'élevage. INRA ed., Paris, Cedex, France, 2002.
- JANSSEN, W. M. M. A. **European Table of Energy Values for Poultry Feedstuffs**, 3rd ed.; WPSA: Beekbergen, the Netherlands, 1989; 84p.
- JAWORSKI, N. *et al.* Carbohydrate composition and *in vitro* digestibility of dry matter and nonstarch polysaccharides in corn, sorghum, and wheat and coproducts from these grains. **Journal of Animal Science**, Urbana, v. 93, p. 1103e13, 2015.
- JENSEN, L. S. 1991. Subproductos de animales em las formulaciones. **Indust. Avic.**, v. 38, p. 28-31.
- JHA, R. *et al.* Dietary Fiber and Intestinal Health of Monogastric Animals. **Frontiers in Veterinary Science**, Canada, v.6, n.48, 2019.
- KHALIL, M. M. *et al.* Apparent metabolizable energy of cereal grains for broiler chickens is influenced by age. **Poultry Science**, Champaign, v. 100, n. 9, 2021.
- KHALIL, M.M. *et al.* Influence of broiler age on the apparent metabolizable energy of cereal grains determined using the substitution method. **Animals**, Switzerland, v. 12, n. 2, p. 183, 2022.
- KOLLER, D.; FRIEDMAN, N. **Probabilistic graphical models: principles and techniques**. Cambridge: MIT Press, 2009. 1233p.
- LEE, J.; NAM, D. S.; KONG, C. Variability in nutrient composition of cereal grains from different origins. **Springer Plus**, Switzerland, v. 5, p. 419-425, 2016.
- LI, J. *et al.* Use of near-infrared reflectance spectroscopy for the rapid determination of the digestible energy and metabolizable energy content of corn fed to growing pigs. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, China, v.7, p. 1-9, 2016.
- LOPEZ., G.; LEESON, S. Assessment of the nitrogen correction factor in evaluating metabolizable energy of corn and soybean meal in diets for broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 87, n. 2, p. 298-306, 2008.

- LOPEZ, G.; LEESON, S. Relevance of nitrogen correction for assessment of metabolizable energy with broilers to forty-nine days of age. **Poultry Science**, Champaign, v. 86, p. 1696–1704, 2007.
- LOSADA, B. *et al.* The prediction of apparent metabolizable energy content of oil seeds and oil seed by-products for poultry from its chemical components, *in vitro* analysis or near-infrared reflectance spectroscopy. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 16, p. 62–72, 2010.
- LOTFI, M. *et al.* Estimation and Prediction of Metabolizable Energy Contents of Wheat Bran for Poultry. **Journal of Agricultural Science Technology**, India, v. 22, n. 4, p. 965-976, 2020.
- LOVATTO, P. A. *et al.* Meta-análise em pesquisas científicas: enfoque em metodologias. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, p. 285-294, 2007.
- MacLEOD, M. G. Energy utilization: measurement and prediction. *In: Poultry Feedstuffs: Supply, Composition and Nutritive Value*. J.M. McNab and K.N. Boorman, Eds. CABI, Wallingford, United Kingdom, p. 191-217, 2002.
- MAHARJAN, P. *et al.* Effects of dietary energy levels on performance and carcass yield of 2 meat-type broiler lines housed in hot and cool ambient temperatures. **Poultry Science**, Champaign, v. 100, n. 3, 2021.
- MANDALAWI, H. A. *et al.* Metabolizable energy content of traditional and re-esterified lipid sources: Effects of inclusion in the diet on nutrient retention and growth performance of broilers from 7 to 21days of age. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 224, p. 124-135, 2017.
- MAPA. (Ministério da Agricultura e Pecuária). Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202401/exportacoes-do-agronegocio-fecham-2023-com-us-166-55-bilhoes-em-vendas#:~:text=As%20exporta%C3%A7%C3%B5es%20brasileiras%20do%20agroneg%C3%B3cio,US%24%207%2C68%20bilh%C3%B5es>>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* **AMEn Predictor**. 2016. Disponível em: <<https://apkpure.com/br/amen-predictor/com.amenpredictor>>. Acesso em: 7 jul. 2024.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Equações de predição de valores energéticos de alimentos obtidas utilizando meta-análise e componentes principais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1634-1640, 2012.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Prediction of the energy values of feedstuffs for broilers using meta-analysis and neural networks. **Animal**, Cambridge, v. 7, n. 9, p. 1440–1445, 2013.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* **AMEn Predictor**: a mobile app to predict energy values of broilers feedstuffs. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v. 175, 2020. 2020a.

- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Committee neural network and weighted multiple regression to predict the energetic values of poultry feedstuffs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 55, p. e01199, 2020. 2020b.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Neural network committee to predict the AMEn of poultry feedstuffs. **Neural Computing and Applications**, London, v. 25, p. 1903-1911, 2014.
- MARIANO, F. C. M. Q. **Redes neurais na predição de valores energéticos de alimentos para aves**. 2014. 128p. Tese (Doutorado em Estatística e experimentação agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- MARTOSISWOYO, A. W.; JENSEN, L. S. Available energy in meat and bone meal as measured by different methods. **Poultry Science**, Champaign, v. 67, n. 2, p. 280-293, 1988.
- MATEOS, G. G. *et al.* Critical Review of the Procedures Used for Estimation of the Energy Content of Diets and Ingredients in Poultry. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 28, n. 3, p. 506-525, 2019.
- MATIN, H. *et al.* Intestinal broiler microflora estimation by artificial neural network. **Neural Computing and Applications**, London, v. 21, n. 5, p. 1043-1047, 2012.
- McDONALD, P. *et al.* **Animal nutrition**. 6th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 693 p. 2002.
- McNAB, J. M. **Rapid metabolisable energy assays**. *In*: Farm Animal Metabolism and Nutrition; D’Mello, J.P.F., Ed.; CABI Publishing: Oxon, UK, p. 307–315, 2000.
- MELOCHE, K. J. *et al.* Apparent metabolisable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. **Poultry Science**, Champaign, v. 92, p. 3176–3183, 2013.
- MOROTA, G. *et al.* Predicting complex traits using a diffusion kernel on genetic markers with an application to dairy cattle and wheat data. **Genetics Selection Evolution**, France, v. 45, p. 1–15, 2013.
- NASCIF, C. C. C. *et al.* Determinação dos valores energéticos de alguns óleos e gorduras para pintos de corte machos e fêmeas aos 21 dias de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 375-385, 2004.
- NASCIMENTO, G. A. J. **Equações de predição dos valores energéticos de alimentos para aves utilizando o princípio da meta-análise**. 2007. 199 f. Tese (Doutorado em Nutrição de Monogástricos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar os valores energéticos de alimentos concentrados de origem vegetal para aves utilizando a meta-análise. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 7, p. 1265-1271, 2009.
- NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar os valores da EMAn de alimentos proteicos para aves utilizando a meta-análise. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 10, p. 2172-2177, 2011. 2011b.

NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar valores da energia metabolizável de alimentos concentrados energéticos para aves utilizando meta-análise. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 63, n. 1, p. 222-230, 2011. 2011a.

NOBLET, J. *et al.* Digestible, metabolizable and net energy values of 13 feedstuffs for growing pigs: effect of energy system. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v.42, p. 131-149, 1993.

NOBLET, J.; HENRY, Y. Energy evaluation systems for pig diets: a review. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 36, p. 121-141, 1993.

NOBLET, J.; WU, S. B., CHOCT, M. Methodologies for energy evaluation of pig and poultry feeds: A review. **Animal Nutrition**, United States, v. 8, n. 1, p. 185-203, 2022.

NRC (National Research Council). Nutrient Requirements of Poultry, 9th ed.; National Academic Press: Washington, DC, USA, 1994.

ODJO, S. D. P. *et al.* Impact of drying and heat treatment on the feeding value of corn. A. Review. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, Belgium, v.19, p. 301-312, 2015.

OLIVEIRA, C. R. C. de. *et al.* Prediction equations for energy values of animal meals obtained using meta-analysis. **Revista Brasileira De Zootecnia**, Viçosa, v. 47, p. e20180098, 2018.

OLIVEIRA, E. F. M. *et al.* Níveis de Energia Metabolizável para Frangos de Corte de 1 a 21 Dias de Idade Mantidos em Ambiente de Alta Temperatura. **Revista Brasileira De Zootecnia**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 810-816, 2000.

OLUKOSI, O. A. Investigation of the effects of substitution levels, assay methods and length of adaptation to experimental diets on determined metabolisable energy value of maize, barley and soya bean meal. **British Poultry Science**, Oxford, v.62, n.2, p.278-284, 2020.

OLUKOSI, O. A.; COWIESON, A. J.; ADEOLA, O. Age-related influence of a cocktail of xylanase, amylase, and protease or phytase individually or in combination in broilers. **Poultry Science**, Champaign, v.86, p. 77-86, 2007.

OLUKOSI, O. A. *et al.* Short-term partial replacement of corn and soybean meal with high-fiber or high-protein feedstuffs during metabolizable energy assay influenced intestinal histomorphology, cecal short-chain fatty acids, and selected nutrient transporters in 21-day-old broiler chickens. **Animals**, Switzerland, v. 12, p. 2193. 2022.

PARSONS, C. M.; POTTER, L. M.; BLISS. B. A. True metabolizable energy corrected to nitrogen equilibrium. **Poultry Science**, Champaign, v. 61, n. 11, p. 2241-2246, 1982.

PAULA, A. *et al.* Valores de energia metabolizável da farinha de carne e ossos e farinha de vísceras determinados com diferentes níveis de substituição para frangos de corte. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 8, n. 1, p. 51-55, 2002.

PERAI, A. H. et al. A comparison of artificial neural networks with other statistical approaches for the prediction of true metabolizable energy of meat and bone meal. **Poultry Science**, Champaign, v. 89, p. 1562–1568, 2010.

RAVINDRAN, V. Advances and future directions in poultry nutrition: an overview. **Korean Journal of Poultry Science**, Korea, v. 1, p. 53– 62, 2012.

REZAEI, A. *et al.* A New Precision–Fed Chick Assay for Determining True Metabolizable Energy Values of some Poultry Feed Ingredients for Broiler Chickens. **Iranian Journal of Applied Animal Science**, Iran, v. 20, n. 1, p. 103-111, 2020.

ROCHELL, S. J.; KERR, B. J.; DOZIER, W. A. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolisable energy. **Poultry Science**, Champaign, v. 90, p. 1999–2007, 2011.

RODRIGUES, P. B. **Digestibilidade de nutrientes e valores energéticos de alguns alimentos para aves**. 2000. 220 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

RODRIGUES, P. B. *et al.* **AMEn Predictor**: aplicativo para prever a EMAn de alimentos para frangos de corte. *Animal*. In: XXVI Congresso Brasileiro de Zootecnia - ZOOTEC 2016: Cinquenta Anos de Zootecnia no Brasil, 2016, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: RS, 2016. p. 1-3.

RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos do milho, do milho e subprodutos do milho, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1767-1778, 2001.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T. **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2024. v.1. 531p.

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2017. v.1. 482p.

SAKOMURA, N. K. *et al.* Efeito da idade dos frangos de corte na atividade enzimática e digestibilidade dos nutrientes do farelo de soja e soja integral. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 924-935, 2004.

SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. **Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos**. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 2016. 262p.

SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. **Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos**. Jaboticabal: Funep, 2007. 283p.

SAUVANT, D. *et al.* Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. **Animal**, Cambridge, v. 2, n. 8, p. 1203-1214, 2008.

- SCHRAMM, V. G. *et al.* Exogenous  $\alpha$ -amylase improves the digestibility of corn and corn-soybean meal diets for broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 100, n. 4, p. 101019, 2021.
- SCHMIDT, N. S.; SILVA, C. L. da. Pesquisa e Desenvolvimento na Cadeia Produtiva de Frangos de Corte no Brasil. **Revista De Economia E Sociologia Rural**, v. 56, n. 3, p. 467–482, 2018.
- SCOTT, T. A. *et al.* Comparison of sample source (excreta or ileal digest) and age of broiler chick on measurement of apparent digestible energy of wheat and barley. **Poultry Science**, Champaign, v. 77, p. 456-463, 1998.
- SCUTARI, M.; DENIS, J. B. **Bayesian networks with examples in R**. New York: Taylor & Francis Group; 2015. 221p.
- SEDGHI, M. *et al.* Estimation and modeling true metabolizable energy of sorghum grain for poultry. **Poultry Science**, Champaign, v. 90, n. 5, p. 1138-1143, 2011.
- SHAO, R. *et al.* Confidence bounds for neural network representations. **Computer and Chemical Engineering (Suppl.)**, v. 21, p. S1173–S1178, 1997.
- SHIRLEY, R. B.; PARSONS, C. M. 2001. Effect of ash content on protein quality of meat and bone meal. **Poultry Science**, Champaign, v. 80, p. 626-632, 2001.
- SIBBALD, I. R. A bioassay for true metabolizable energy in feedingstuffs. **Poultry Science**, Champaign, v. 55, n. 1, p. 303-308, 1976.
- SIBBALD, I. R. The effect of level of feed intake on metabolizable energy values measured with adult roosters. **Poultry Science**, London, v. 54, p. 1990-1997, 1975.
- SIBBALD, I. R. The TME System of Feed Evaluation: Methodology, Feed Composition Data and Bibliography. **Animal Research Centre**, Ottawa, Ontario, Canada, 1986.
- SIBBALD, I. R.; MORSE, P. M. Pooling excreta prior to calorimetry in bioassay for true metabolizable energy: the effect on estimative of variance. **Poultry Science**, Champaign, v. 61, p. 1853-1858, 1982.
- SIBBALD, I.; SLINGER, S. A biological assay for metabolizable energy in poultry feed ingredients together with findings which demonstrate some of the problems associated with the evaluation of fats. **Poultry Science**, Champaign, v. 42, p.313-325, 1963.
- SILVA, D. L. *et al.* Energia metabolizável e aminoácidos digestíveis de coprodutos de trigo e de farinhas de origem animal em dietas para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 72, n. 6, p. 2402–2407, 2020.
- SILVA, E. P. *et al.* Prediction of metabolizable energy values in poultry offal meal for broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, p. 2237 – 2245, 2010.
- SILVA, J. H. V.; ALBINO, L. F. T.; NASCIMENTO, A. H. Níveis de Energia e Relações Energia: Proteína para Frangos de Corte de 22 a 42 dias de Idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1791-1800, 2001

SIWEK, K.; OSOWSKI, S.; SZUPILUK, R. Ensemble neural network approach for accurate load forecasting in a power system. **International Journal of Applied Mathematics and Computer Science**, Poland, v. 19, p. 303–315, 2009.

SONG, M. *et al.* The age-related metabolizable energy of cereal grains, oilseed meals, corn gluten meals, and feather meals for broilers. **Journal of Animal Science**, Oxford, v. 101, p. skad051, 2023.

SOUZA, R. M. Equações de predição dos valores energéticos de alimentos para aves. 2009. **Tese (Doutorado em Zootecnia)**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2009. 137p.

SPIRITES, P.; GLYMOUR, C.; SCHEINES, R. **Causation, prediction and search**. 2nd ed. Cambridge (MA): The MIT Press, 2000.

STATSOFT INC. **SANN** Overviews - network generalization. Tulsa, OK: Statsoft, 2008. Disponível em:  
<http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=SANN/Overview/SANNOverviewsNetworkGeneralization>.

STEFANELLO, C. *et al.* Research Note: Corn energy and nutrient utilization by broilers as affected by geographic areas and carbohydrases. **Poultry Science**, Champaign, v. 102, n. 2, p. 102366, 2023.

STEFANELLO, C. *et al.* Energy and nutrient utilization of broilers fed soybean meal from two different Brazilian production areas with an exogenous protease. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 221, p. 267-273, 2016.

SVIHUS, B. Starch digestion capacity of poultry. **Poultry Science**, Champaign, v. 93, n. 9, p. 2394-2399, 2014.

THOMAS, D. V.; RAVINDRAN, V.; RAVINDRAN, G. Nutrient digestibility and energy utilisation of diets based on wheat, sorghum or maize by the newly hatched broiler chick. **British Poultry Science**, Oxford, v. 49, n. 4, p. 429-435, 2008.

TÖPNER, K. *et al.* Bayesian networks illustrate genomic and residual trait connections in maize (*Zea mays L.*). **G3 Genes|Genomes|Genetics**, Oxford, v. 7, n. 8, p. 2779–2789, 2017.

TRONI, A. R. *et al.* Composição química e energética de alimentos para frangos de corte. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 4, p. 755–760, 2016.

WALDROUP, P. W. Nutrient requirement of broilers. *In*: Simpósio Internacional sobre exigências nutricionais de aves e suínos, 1996, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1996. p. 55.

WANG, M. C.; BUSHMAN, B. J. **Integration results: through meta-analytic review using SAS software**. Cary: Statistical Analysis System Institute, 1999.

WPSA (World's Poultry Science Association). **European Table of Energy Values for Poultry Feedstuffs**, 3rd ed.; Subcommittee of energy of the working group no 2. Nutrition of the European Federation of Branches of the World's Poultry Science Association; Spelderholt Centre for Poultry Research: Beekbergen, The Netherlands, 1989.

WU, S. *et al.* Historical flaws in bioassays used to generate metabolizable energy values for poultry feed formulation: a critical review. **Poultry Science**, Champaign, v. 99, p. 385– 406, 2020.

XIE, K. *et al.* Evaluation of nitrogen-corrected apparent metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility of different sources of rice and rice milling byproducts in broilers. **Animal**, Switzerland, v. 11, p. 1894, 2021.

ZAEFARIAN, F. *et al.* Trends in feed evaluation for poultry with emphasis on *in vitro* techniques. **Animal Nutrition**, United States, v. 7, n. 2, p. 268-281, 2021.

ZHAO, F. *et al.* Developing a computer controlled simulated digestion system to predict the concentration of metabolizable energy of feedstuffs for rooster. **Journal of Animal Science**, Oxford, v. 92, p. 1537- 47, 2014.

ZIJLSTRA, R. T. *et al.* Near infrared reflectance spectroscopy accurately predicts the digestible energy content of barley for pigs. **Canadian Journal of Animal Science**, Canada, v. 91, p. 301e4, 2011.

ZUIDHOF, M. J. A Review of Dietary Metabolizable and Net Energy: Uncoupling Heat Production and Retained Energy. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 28, n. 2, p. 231-241, 2019.

## **SEGUNDA PARTE – ARTIGOS**

### **ARTIGO 1 - ATUALIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS E DE MODELOS PARA A PREDIÇÃO DA ENERGIA METABOLIZÁVEL DOS ALIMENTOS PARA FRANGOS DE CORTE**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o  
Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

## RESUMO

Objetivou-se determinar modelos de regressão linear múltipla (RLM) e de rede neural artificial (RNA), para estimar a energia metabolizável aparente corrigida pelo nitrogênio retido (EMAn) de alimentos concentrados de origem vegetal e animal para aves, por meio de meta-análise. Nos métodos empregados na obtenção dessas equações de predição, os valores energéticos dos alimentos são estabelecidos em função da composição química dos mesmos. Para isso, foi realizada uma atualização de revisão bibliográfica de estudos nacionais e internacionais, no período de 1986 a 2023, para catalogar informações sobre valores de EMAn e composição química (proteína bruta-PB; extrato etéreo-EE; matéria mineral-MM; fibra bruta-FB, fibra em detergente neutro-FDN, fibra em detergente ácido-FDA, cálcio-Ca e P-fósforo) dos alimentos citados. Posteriormente, formaram-se dois grupos homogêneos distintos, um considerando a metodologia de análise de componentes principais, e outro o sexo, idade das aves e metodologia empregada em ensaios de metabolismo. Para ajustar os modelos de RLM, adotou-se o procedimento *Stepwise* e o critério de Akaike (AIC) na inclusão e exclusão de variáveis no modelo. Nos modelos RNA, o conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em conjuntos de treinamento (80% dos dados) e de teste (20% restantes); ademais, outro conjunto de dados com resultados de bioensaio foi utilizado como dados de teste para cada rede implementada. As equações de RLM que melhor se ajustaram foram:  $EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,6941EE - 209,4305MM - 57,9841FB - 8,1633FDN$ , para concentrados em geral de origem vegetal;  $EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN$ , para concentrados energéticos de origem vegetal;  $EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA$ , para concentrados proteicos de origem vegetal e, por último,  $EMAn = 3137,5850 + 58,5863EE - 46,8114MM - 2,5727Ca$ ;  $EMAn = 3156,0445 + 58,1022EE - 44,7134MM - 19,1335P$  e,  $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$ , para concentrados proteicos de origem animal. O modelo de RNA que apresentou a maior acurácia foi o *Multilayer Perceptron Network* (MPL) 10-5-3-1 usando as variáveis PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, categoria, ingrediente, animal e idade.

**Palavras-chave:** Aves; Composição química; Equação de predição; Métodos indiretos; Rede neural artificial.

## ABSTRACT

The objective was to determine multiple linear regression (RLM) and artificial neural network (ANN) models to estimate nitrogen-corrected apparent metabolizable energy (AMEn) of concentrated foods of plant and animal origin for broilers, through meta-analysis. A bibliographic review of national and international studies was carried out, from 1986 to 2023, to catalog information on AMEn values and chemical composition (crude protein-CP; ether extract-EE; mineral matter-MM; crude fiber-CF, neutral detergent fiber-NDF, acid detergent fiber-ADF, calcium-Ca and P-phosphorus) of the feedstuffs mentioned. Subsequently, two distinct homogeneous groups were formed, one considering the principal component analysis methodology, and the other considering the sex, age of the broilers and the methodology used in metabolism tests. To adjust the RLM models, the Stepwise procedure and the Akaike criterion (AIC) were adopted for the inclusion and exclusion of variables in the model. In the ANN models, the data set was randomly divided into training (80% of the data) and test (remaining 20%) sets; in addition, another data set with bioassay results was used as test data for each implemented network. The RLM equations that best adjusted were:  $AMEn = 4014,4011 + 4,3311CP + 48,6941EE - 209,4305MM - 57,9841CF - 8,1633NDF$ , for concentrated in general of vegetable origin;  $AMEn = 4137,9930 - 15,7041CP + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845CF - 12,117NDF$ , for energy concentrated of vegetable origin;  $AMEn = 2962,9847 + 20,1241CP + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740CF - 14,8843ADF$ , for protein concentrated of vegetable origin and; finally,  $AMEn = 3137,5850 + 58,5863EE - 46,8114MM - 2,5727Ca$ ;  $AMEn = 3156,0445 + 58,1022EE - 44,7134MM - 19,1335P$  and,  $AMEn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$ , for protein concentrates of animal origin. The best adjusted ANN model was MPL 10-5-3-1 using the variables CP, EE, MM, CF, NDF, ADF, category, ingredient, animal and age.

**Keywords:** Artificial neural network; Broiler; Chemical composition; Indirect methods. Prediction equation.

## 1 INTRODUÇÃO

Para que os frangos de corte possam expressar seu máximo potencial produtivo sem aumentar os custos de produção, é fundamental formular rações balanceadas que atendam adequadamente às suas exigências nutricionais. Para isso, é essencial realizar uma avaliação precisa e contínua da composição química e energética dos alimentos concentrados utilizados nessas formulações dietéticas (Mariano *et al.*, 2020a).

De acordo com Abdollahi *et al.* (2021), a energia dietética é considerada o principal componente quantitativo e o mais oneroso quando as dietas estão sendo balanceadas, tendo em vista sua participação na regulação do consumo e na quantidade de nutrientes ingeridos pelas aves. Posto isso, a forma mais utilizada na nutrição de aves para expressar o conteúdo energético dos alimentos é a energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn) devido a sua aplicação prática e da quantidade de dados já disponíveis na literatura para diferentes alimentos (Abdollahi *et al.*, 2021; Mateos *et al.*, 2019; Rostagno *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2020) e, também, por refletir diretamente no desempenho zootécnico e qualidade das carcaças em frangos de corte (Oliveira *et al.*, 2000; Sakomura *et al.*, 2004).

Na prática, sabe-se que a composição química e a EMAn dos alimentos de origem vegetal e animal podem ser afetadas por uma série de fatores como: condições geográficas, variabilidade genética dos cultivares, formas de armazenamento e processamento dos grãos vegetais (Aguirre *et al.*, 2024; Mateos *et al.*, 2019; Stefanello *et al.*, 2023), além da composição e da forma de obtenção de produtos de origem animal (Oliveira *et al.*, 2018). Por isso, é indicado que cada amostra de alimento seja analisada continuamente antes de ser utilizada na formulação de rações para aves devido à grande variabilidade nos valores de EMAn dos alimentos disponíveis no mercado nacional e internacional (Rezaei *et al.*, 2020).

Para amenizar este problema, encontram-se na literatura vários métodos para determinar o conteúdo energético dos alimentos para aves, dos quais pode-se citar: os biológicos (Sibbald, 1976; Sibbald; Slinger, 1963) e os não biológicos (Mateos *et al.*, 2019; Zaefarian *et al.*, 2021), a fim de se obter uma metodologia que melhor estime o valor energético dos alimentos.

No entanto, dependendo da realidade do pesquisador e da fábrica de ração, estas metodologias se tornam inviáveis devido à falta de recursos financeiros, rotinas experimentais e laboratoriais que demandam infraestrutura e mão-de-obra especializada, tempo de execução e, também, ensaios metabólicos realizados com número reduzido de amostras, resultando em dados que podem nem sempre ser precisos (Alvarenga *et al.*, 2013; Mateos *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020).

Em vista disto, Alvarenga *et al.* (2013), Mariano *et al.* (2020a, 2020b) e Nascimento *et al.* (2011a, 2011b), demonstraram alternativas mais rápidas, econômicas e mais aplicáveis de se determinar a EMAn dos alimentos, empregando os métodos indiretos. Nos estudos citados, utilizando o princípio da meta-análise, foram determinadas equações de predição para a EMAn de alimentos para aves, via modelos de regressão linear múltipla (RLM) e de redes neurais artificiais (RNAs). Os modelos foram ajustados em função da composição química dos alimentos, que são obtidas rotineiramente em laboratórios particulares ou dentro da própria empresa de fabricação de ração.

Várias equações foram descritas na literatura por Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) e validadas por Alvarenga *et al.* (2011, 2015) através de bioensaios com frangos de corte, confirmando que as equações de RLM estimam adequadamente a EMAn de alimentos concentrados energéticos e proteicos. No entanto, Mariano *et al.* (2013) verificaram que o uso de modelos relacionados às RNAs garante predições mais acuradas dos valores de EMAn do que as obtidas por modelos de RLM.

Neste sentido, foi desenvolvido o aplicativo *AMEn Predictor* (Mariano *et al.*, 2020a; Rodrigues *et al.*, 2016), que dispõe de um modelo de RNA aliado à técnica de meta-análise para a obtenção de valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal comumente utilizados em dietas para aves. Mariano *et al.* (2020b) enfatizaram a importância do aplicativo *AMEn Predictor* e sua vantagem ao utilizar um maior número de variáveis que venham interferir na variabilidade da energia metabolizável do alimento, o que nem sempre é viável em um modelo de RLM. Além do que, a utilização na prática de modelos de regressão mais complexos torna-se inviável para os nutricionistas da área animal. Assim, com o uso de modelos de RNAs, pode-se obter resultados mais acurados em razão do maior controle da variabilidade.

Contudo, destaca-se que tal aplicativo foi desenvolvido com dados referentes à determinação da EMAn e composição química dos alimentos para aves, publicados em periódicos nacionais e catalogados até o ano de 2007.

Em virtude disso, este trabalho tem como objetivo atualizar os dados que originaram o aplicativo *AMEn Predictor* até o ano de 2023, e obter novas equações utilizando o princípio da meta-análise, os métodos de regressão linear múltipla e de redes neurais artificiais para estimar os valores de EMAn, em função da composição química dos principais alimentos concentrados de origem vegetal e animal utilizados para aves.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Informações utilizadas para a atualização das equações de predição por meio da meta-análise

As informações utilizadas neste trabalho para atualização do banco de dados do aplicativo *AMEn Predictor* (Mariano *et al.*, 2020b; Rodrigues *et al.*, 2016), das equações de regressão linear múltipla (RLM) propostas por Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) e dos modelos de redes neurais artificiais (RNAs) propostos por Mariano *et al.* (2013), referem-se aos valores de energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn) e à composição química dos alimentos concentrados de origem vegetal e animal usualmente utilizados na formulação das rações avícolas. Além disso, foram coletadas informações sobre o sexo e a idade dos animais experimentais, assim como a metodologia empregada no ensaio metabólico (coleta total ou alimentação forçada + coleta total).

A atualização da base de dados foi necessária devido à visibilidade e utilização do aplicativo em outros países (Mariano *et al.*, 2020b). Salienta-se, também, que o aplicativo foi desenvolvido apenas com dados provenientes da literatura nacional, descritos em Nascimento (2007), no período de 1982 a 2007. Por esta razão, além de atualizar os dados da literatura nacional para o período de 2007 a 2023, foi necessário incluir dados referentes à determinação do valor energético e composição química dos alimentos para aves publicados em periódicos internacionais nos últimos 40 anos, bem como dados de EMAn das farinhas de origem animal, as quais ainda não compõem o banco de dados e o aplicativo já disponível, mas que possuem importância econômica para a formulação de dietas para aves.

A pesquisa de artigos foi realizada por meio de uma ampla e minuciosa revisão bibliográfica da literatura nacional e internacional de modo a incluir o máximo possível de estudos sobre o tópico em questão e minimizar os erros que pudessem influenciar na análise de dados. Para isso, utilizou-se as seguintes palavras-chave (*Broilers OR broiler*) AND “*apparent metabolizable energy*” e foram incluídos estudos publicados em periódicos nas seguintes bases de dados digitais: Periódicos CAPES, Scielo, Science Direct, MDPi, Scopus, Web of Science e Google Scholar e, também, obtidos de anais de congressos e simpósios, e trabalhos não indexados como dissertações e teses.

Uma vez identificados, os artigos foram avaliados criticamente quanto à sua qualidade e relevância para os objetivos da meta-análise. Posteriormente, na fase de catalogação dos

dados, os mesmos receberam a denominação de dados completos e incompletos, em função da composição química dos alimentos, conforme descrito em Nascimento *et al.* (2011a, 2011b).

Desse modo, os trabalhos considerados completos possuíam as seguintes variáveis de composição química: proteína bruta (PB), extrato etéreo (EE), matéria mineral (MM), fibra bruta (FB), fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA), e os incompletos àqueles que apresentavam somente PB, EE, MM e FB. Para os alimentos de origem animal, considerou-se as variáveis PB, EE, MM, cálcio (Ca) e fósforo (P) para os trabalhos completos e as variáveis PB, EE e MM para os trabalhos incompletos.

Para obtenção das equações de RLM e de modelos RNAs para estimar a EMAn dos alimentos de origem vegetal (energéticos e proteicos) e animal mais utilizados nas rações de aves, foram catalogadas um total de 1734 informações (Tabela 1). Desse total, obteve-se 1004 informações para estimar a EMAn dos alimentos energéticos (Tabela 1B, do Anexo B), sendo 429 completas e 575 incompletas; enquanto, para estimar a EMAn dos alimentos proteicos de origem vegetal (Tabela 2B, do Anexo B), foram 530 informações catalogadas, sendo 252 e 275 dados completos e incompletos, respectivamente. Por fim, 203 informações foram catalogadas para estimar a EMAn de alimentos proteicos de origem animal (Tabela 3B, do Anexo B), onde 163 informações foram completas e 40 incompletas.

Tabela 1 - Número de informações cadastradas no presente estudo para realização da meta-análise, em função da composição química e valor energético dos alimentos, com base na matéria seca (MS).

| Alimentos concentrados     |                          | Nº de informações <sup>1</sup> |                             |             |     |    |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------|-----|----|
|                            |                          | Completas                      | Incompletas                 | Total       |     |    |
| Origem vegetal             | Energéticos <sup>2</sup> | Milho                          | 242                         | 210         | 452 |    |
|                            |                          | Sub-produtos do milho          | 32                          | 89          | 121 |    |
|                            |                          | Outros                         | 155                         | 276         | 431 |    |
|                            | Proteicos <sup>3</sup>   | Farelo de soja                 | 96                          | 77          | 173 |    |
|                            |                          | Sub-produtos de soja           | 75                          | 86          | 161 |    |
|                            |                          | Sub-produtos do milho          | 50                          | 39          | 89  |    |
|                            |                          | Outros                         | 31                          | 73          | 104 |    |
|                            | Origem animal            | Proteicos <sup>3</sup>         | Farinha de Vísceras de aves | 58          | 14  | 72 |
|                            |                          |                                | Farinha de carne e ossos    | 39          | 8   | 47 |
|                            |                          |                                | Farinha de penas            | 38          | 6   | 44 |
| Farinha de Vísceras Suínas |                          |                                | 10                          | 1           | 11  |    |
| Outros                     |                          |                                | 18                          | 11          | 29  |    |
|                            |                          |                                | <b>Total</b>                | <b>1734</b> |     |    |

<sup>1</sup>Número de informações cadastradas no presente estudo.

<sup>2</sup>Alimento concentrado energético em função da composição química em FB inferior a 18% e PB inferior a 20%, com base na MS;

<sup>3</sup>Alimento concentrado proteico em função da composição química em FB inferior a 18% e PB superior a 20%, com base na MS.

Fonte: Autor (2024).

## 2.2 Metodologia empregada para realização da meta-análise

As informações obtidas com a revisão bibliográfica foram tabuladas de acordo com o alimento, a metodologia empregada no ensaio de metabolismo, o sexo e a idade dos animais experimentais, número de repetições, tipo de alimento (energético ou proteico), assim como também a composição química com base na matéria seca (MS) (percentagens de PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, Ca e P) e energética (EMAn, kcal kg<sup>-1</sup>, MS) dos alimentos em estudo.

Posteriormente, foi realizado o agrupamento dos dados, aplicando-se os princípios de meta-análise, no intuito de formar grupos homogêneos, porém distintos entre si.

### **2.2.1 Critérios empregados para a catalogação (inclusão) das informações**

Para ordenar as informações de interesse desse estudo obtidas na revisão de literatura e para viabilização das análises estatísticas subsequentes, utilizou-se os seguintes critérios de inclusão:

- a) trabalhos nacionais e internacionais conduzidos com frangos de corte no período de 1982 a 2023, independentemente da idade e sexo desses animais;
- b) trabalhos que determinaram a EMAn e composição química de alimentos de origem vegetal (energéticos e proteicos) e de origem animal mais utilizados nas formulações de rações para aves, independentemente da metodologia utilizada e ano de realização;
- c) alimentos classificados e catalogados no banco de dados como energéticos, em função da composição química em FB inferior a 18% e PB inferior a 20%, com base na MS;
- d) alimentos classificados e catalogados no banco de dados como proteicos, em função da composição química em FB inferior a 18% e PB superior a 20%, com base na MS;
- e) catalogação dos valores de EMAn e da composição química dos alimentos (PB, EE, MM, FB, FDN e FDA para alimentos de origem vegetal e animal e, Ca e P para alimentos de origem animal) no banco de dados, com base na MS;
- f) trabalhos realizados no Brasil e no exterior, pois de acordo com alguns pesquisadores, a exemplo de Aguirre *et al.* (2024) e Stefanello *et al.* (2023), a composição química de alimentos oriundos de diferentes regiões e países, geralmente apresentam variações e, conseqüentemente, alterações nos seus valores energéticos.

### **2.2.2 Formação de grupos homogêneos de trabalhos**

As variações no conteúdo energético dos alimentos que podem ser modelados nos experimentos agrupados na meta-análise, geralmente, estão relacionados a fatores como: a época do ano e local de execução do experimento, idade e sexo dos animais utilizados, número

de repetições e metodologia utilizada na determinação da variável resposta (EMAn), dentre outros, sendo a variação química dos alimentos em função desses efeitos que irá refletir na variabilidade dos dados no momento da análise.

Assim, para a formação de grupos homogêneos dos resultados experimentais da meta-análise foram consideradas duas metodologias diferentes. A primeira considerou a análise de componentes principais (ACP) proposta por Mariano *et al.* (2012). Com isso, foram considerados dois tamanhos de grupos, ou seja, 10 e 20 grupos, sendo esses os tamanhos de grupos que apresentaram melhores ajustes em Mariano *et al.* (2012). Para efetuar a ACP foram consideradas as variáveis da composição química dos alimentos estudados: EMAn, PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, Ca e P.

Na segunda maneira, foram considerados os efeitos que não modificam a composição química dos alimentos, mas que ocasionam a variabilidade na energia dos mesmos, conforme a metodologia aplicada por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). Os efeitos considerados foram: sexo, idade dos animais experimentais, metodologia empregada no ensaio metabólico (coleta total ou alimentação forçada + coleta total) e o alimento utilizado. Na Tabela 2 estão apresentados os códigos para cada nível dos efeitos, e a partir desse ponto, foram feitos agrupamentos dos códigos para determinar os grupos que, posteriormente, foram submetidos à análise por mínimos quadrados ponderados (que será explicado adiante).

Tabela 2 - Representação dos códigos aplicados para cada efeito.

| <b>Efeito</b>         | <b>Descrição do efeito</b>             | <b>Código</b> |
|-----------------------|--|---------------|
| Sexo                  | Macho                                  | 1             |
|                       | Fêmea                                  | 2             |
|                       | Misto                                  | 3             |
|                       | Indefinido                             | 4             |
| Idade                 | 1 <sup>a</sup> e 2 <sup>a</sup> semana | 1             |
|                       | 3 <sup>a</sup> e 4 <sup>a</sup> semana | 2             |
|                       | 5 <sup>a</sup> e 6 <sup>a</sup> semana | 3             |
|                       | Indefinido                             | 4             |
| Metodologia           | Coleta total                           | 1             |
|                       | Alimentação forçada + coleta total     | 2             |
| Categoria do alimento | Concentrado Energético (PB menor 20%)  | 1             |
|                       | Concentrado Proteico (PB maior 20%)    | 2             |
| Ingrediente           | Milho ou Farelo de Soja                | 1             |
|                       | Subprodutos de milho ou soja           | 2             |
|                       | Outros alimentos                       | 3             |

Fonte: Autor (2024).

## 2.3 Equações de predição de EMAn usando o princípio da meta-análise

Mariano *et al.* (2012, 2013) e Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b) propuseram e avaliaram algumas equações de predição de EMAn de alimentos comumente usados em formulações de rações para aves com base em sua composição química, sendo essas ajustadas na condução de uma meta-análise.

Portanto, neste estudo foram utilizadas as duas metodologias propostas pelos autores para combinar ou comparar resultados de estudos distintos, mas relacionados: a regressão linear múltipla proposta por Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) e a rede neural artificial proposta por Mariano *et al.* (2013), para a obtenção de modelos atualizados para estimar a EMAn dos alimentos, as quais serão descritos adiante.

Para a aplicação de ambas as metodologias, considerou-se a base de dados atualizada (Tabela 1) para a realização da meta-análise. As listas de referências usadas para a montagem do banco de dados estão disponíveis no Anexo B e descritas nas Tabelas 1B, 2B e 3B, para os alimentos concentrados: energéticos de origem vegetal, proteicos de origem vegetal e proteicos de original animal, respectivamente.

### 2.3.1 Regressão linear múltipla

As estimativas e os parâmetros do modelo estatístico de regressão linear múltipla (RLM) foram determinados de acordo com o método dos mínimos quadrados ponderados (Hoffmann; Vieira, 1997). Para a escolha do fator de ponderação, utilizou-se os grupos pré-determinados no estudo, sendo, portanto, o procedimento adotado para tal ponderação dos mínimos quadrados ponderados, onde considera-se o inverso da variância ( $1/s^2_i$ ) para cada grupo. Com esse fator foi possível determinar a variância existente para a variável dependente do modelo de RLM dentro de cada grupo, nesse caso a EMAn dos alimentos utilizados.

Para elucidar a estrutura de relações entre as variáveis de composição química e de valores energéticos de cada alimento, estimou-se as correlações de Pearson (Draper; Smith, 1981) entre todos os pares possíveis.

Para cada categoria de alimento (energético e proteicos) e concentrados em geral (Tabela 2), foram estimadas as equações de predição dos valores de EMAn em função dos valores de composição química dos alimentos. Os modelos propostos referem-se às equações de regressão linear múltipla da seguinte forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_6 x_{i6} + \varepsilon_i \quad (1)$$

onde  $Y_i$  é o valor da EMAn do alimento, determinado em ensaio metabólico, no  $i$ -ésimo estudo;  $x_{i1}$ ; ...;  $x_{i6}$  representam as variáveis de composição química do alimento, no  $i$ -ésimo estudo; e  $\varepsilon_i$  denota o erro associado à  $i$ -ésima observação, assumido normal e independentemente distribuído, com média 0 e variância  $\sigma_i^2$ .

Para avaliar a importância das variáveis de composição química sobre o valor de EMAn do alimento, estimou-se o coeficiente de determinação parcial de cada variável (Tipo II) no modelo completo. Em seguida, para selecionar a melhor equação preditiva para cada categoria de alimento, utilizou-se o método *Stepwise* (Draper; Smith, 1998) com o objetivo de selecionar variáveis independentes significativas ao modelo, podendo, posteriormente, retirá-las manualmente em busca do modelo que melhor represente os dados.

Neste trabalho, optou-se por utilizar o critério de Akaike (AIC) para a seleção das equações conforme descrito por Mariano *et al.* (2012), pois apesar do critério do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) ser amplamente utilizado para a escolha do melhor modelo, ele pode ser muito influenciado pelo número de parâmetros do modelo estatístico considerado. Sendo assim, quanto menor o valor de AIC melhor é o modelo ajustado.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software* R (R Core Team, 2024).

### 2.3.2 Redes neurais artificiais

Para a predição dos valores de EMAn de cada alimento de origem vegetal, o modelo de RNA ajustado por Mariano *et al.* (2013) considera as seguintes variáveis: composição química (PB, EE, MM, FB), categoria do alimento (1 - concentrado energético; 2 - concentrado proteico), tipo do ingrediente (1 - milho ou farelo de soja; 2 - subprodutos de milho ou farelo de soja; 3 - outros alimentos), tipo do animal utilizado no bioensaio (1 - pintos; 2 - galos).

Para a atualização dos modelos de RNA e em busca de ajustes mais acurados, diferentes filtragens e seleções de variáveis foram consideradas durante o processo de manipulação do banco de dados atualizado. Portanto, no ajuste dos novos modelos de RNA acrescentou-se a idade dos animais, dada em semanas de vida (1 - 1ª e 2ª sem; 2 - 3ª e 4ª sem; 3 - 5ª e 6ª sem; 4 - indefinida) em todos os modelos propostos, e para o ajuste com os dados completos, foram considerados também as variáveis de composição química FDN e FDA.

Contudo, devido a composição química e energética dos alimentos de origem animal serem muito variáveis (Rostagno *et al.*, 2024) em decorrência da matéria-prima utilizada, qualidade e digestibilidade (Oliveira *et al.*, 2018), o número de observações amostrais coletadas na literatura (163 informações) para esses alimentos não foram suficientes para ajustar uma rede neural. Possivelmente, o número de exemplos (informações) de treinamento reduziu a capacidade de generalização dos classificadores (Jain; Duin; Mao, 2000), ou seja, não houve aprendizado suficiente para se fazer uma RNA. Para solucionar esse problema, novos trabalhos serão necessários para a inserção de mais observações ou outras variáveis que ajudem a explicar melhor a variação dos valores de EMAn dos alimentos de origem animal.

Por isso, neste estudo, apenas as informações dos alimentos concentrados de origem vegetal (energéticos e proteicos) puderam ser usados no desenvolvimento de uma rede neural artificial do tipo *Multilayer Perceptron Network* (MLP) para prever a EMAn dos alimentos comumente utilizados nas dietas de aves. Para isso, do conjunto de dados (Tabelas 1B e 2B, do Anexo B) foram filtradas as observações amostrais dentro do intervalo de  $1000 \leq \text{EMAn} \leq 4500$  kcal kg<sup>-1</sup> de MS e, em seguida, este foi dividido aleatoriamente em dois subconjuntos: um para treinamento e desenvolvimento da rede (80% dos dados), e outro para testar a rede, composto pelos 20% restantes das observações catalogadas na meta-análise. Os dados para treinamento devem ser diferentes dos dados de teste, pois, a rede pode memorizar o padrão de dados e, assim, o procedimento teste não seria confiável.

Os parâmetros de entrada implementados na MLP foram: categoria de alimentos para as aves (CAT), ingredientes concentrados (ING), tipo de animais utilizados no bioensaio (ANIMAL), idade dos animais (IDADE) e composição química dos alimentos (PB, EE, MM, FB, FDN e FDA). A variável de saída foram os valores de EMAn obtidos nos estudos. Com isso, diferentes estruturas foram implementadas com objetivo de selecionar a melhor.

Para ajuste dos modelos de redes neurais artificiais foi utilizado o *software* FANN TOOL 1.2 (<http://code.google.com/p/fanntool/>). No ajuste dos modelos, foi usado o algoritmo de treinamento iRPROP, conforme descrito por Igel e Husken (2000) e realizado por Mariano *et al.* (2013). A inicialização dos pesos da rede foi de maneira aleatória, e o treinamento da rede neural ocorreu até um limite máximo de 500.000 épocas. A seleção da função de ativação e da quantidade de neurônios intermediários foi baseada no erro quadrático médio (m.s.e.). Além disso, o m.s.e. serviu como critério para encerrar o treinamento, que terminou por causa do número máximo de épocas estabelecido.

Assim, foram ajustadas diferentes RNAs, com uma ou duas camadas ocultas, e diferentes funções de ativação para as camadas ocultas e para o neurônio de saída. A taxa de aprendizado e o *momentum* durante o treinamento foram fixados em 0,7 e 0, respectivamente.

Para a validação dos modelos de RNA, foram utilizadas 20 informações de composição química e de EMAN de alimentos energéticos e proteicos de origem vegetal provenientes de dois ensaios metabólicos com frangos de corte Cobb 500<sup>®</sup>, utilizando o método tradicional de coleta total de excretas, os quais foram realizados por Alvarenga *et al.* (2011).

Por fim, a acurácia de cada um dos modelos de RNA foi verificada com base em medidas de erro entre os valores de EMAN observados e os preditos, sendo consideradas as seguintes métricas: Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), m.s.e., desvio absoluto médio (MAD), erro percentual absoluto médio (MAPE) e viés (Bias), conforme definido por Bolzan *et al.* (2008) e Perai *et al.* (2010). Tais medidas foram calculadas para as amostras de treinamento, teste e validação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Equações de regressão linear múltipla dos alimentos concentrados de origem vegetal e animal selecionadas neste estudo

As equações de predição dos valores de EMAN foram determinadas para as seguintes categorias de alimentos concentrados comumente utilizados em rações avícolas: a) energéticos e proteicos de origem vegetal (Tabelas 1B e 2B, do Anexo B); b) somente energéticos de origem vegetal (Tabelas 1B, do Anexo B); c) somente proteicos de origem vegetal (Tabelas 2B, do Anexo B) e; d) proteicos de origem animal (Tabela 3B, do Anexo B). Dessa maneira, os procedimentos estatísticos foram realizados para os dados completos (Tabela 1), sendo esse o conjunto de dados que obteve melhores ajustes em Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b), levando-se em consideração os valores de  $R^2$  para as equações ajustadas.

##### a) Alimentos concentrados em geral (energéticos + proteicos) de origem vegetal:

Na Tabela 3 estão apresentadas as equações obtidas utilizando 681 informações completas (Tabela 1) de composição química para os alimentos concentrados em geral, aplicando o método *Stepwise* com o critério de Akaike (AIC) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Tabela 3 - Equações gerais obtidas neste estudo para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados (energéticos + proteicos) de origem vegetal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).

| Equações gerais determinadas para alimentos concentrados de origem vegetal |            |                                       |          |           |          |         |     |                    |                |
|--|------------|---------------------------------------|----------|-----------|----------|---------|-----|--------------------|----------------|
| Equação  | Intercepto | <sup>1</sup> Parâmetros estimados (%) |          |           |          |         |     | AIC <sup>(a)</sup> | R <sup>2</sup> |
|  |            | PB                                    | EE       | MM        | FB       | FDN     | FDA |                    |                |
| 1 <sup>(b)</sup>   | 4009,3390  | +4,1379                               | +49,5271 | -208,1356 | -55,0896 | -8,5416 | -   | 9598,17            | 0,68           |
| 2 <sup>(c)</sup>   | 4014,4011  | +4,3311                               | +48,6941 | -209,4305 | -57,9841 | -8,1633 | -   | 9563,11            | 0,70           |
| 3 <sup>(d)</sup>   | 3304,6036  | +7,3461                               | +69,1040 | -166,5581 | -54,1044 | -       | -   | 10114,16           | 0,52           |

<sup>1</sup>Parâmetros estimados: PB = proteína bruta; EE = extrato etéreo; MM = matéria mineral; FB = fibra bruta; FDN = fibra em detergente neutro e; FDA = fibra em detergente ácido.

<sup>(a)</sup>Critério de Akaike.

<sup>(b)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 10 grupos.

<sup>(c)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 20 grupos.

<sup>(d)</sup>Atualização da metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). Grupos homogêneos definidos pela combinação dos níveis de sexo, idade e metodologia usada no ensaio metabólico com frangos de corte.

Fonte: Autor (2024).

Neste trabalho, optou-se por utilizar o AIC como critério de seleção das equações conforme descrito por Mariano *et al.* (2012), pois esse critério tem como característica a escolha de modelos com menor número de variáveis sem penalizar a acurácia dos mesmos. Assim, quanto menor o valor de AIC melhor é o modelo estatístico ajustado.

Diante disso, a equação geral 2 que utilizou a metodologia ACP com 20 grupos (EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,6941EE - 209,4305MM - 57,9841FB - 8,1633FDN) foi a que melhor se ajustou neste estudo para determinar o valor de EMAn dos alimentos concentrados, com AIC = 9563,11 e R<sup>2</sup> de 0,70. Nascimento *et al.* (2009) consideraram 293 informações completas (PB, EE, MM, FB, FDN e FDA) e obtiveram duas equações ajustadas para prever a EMAn de alimentos concentrados: EMAn = 4101,33 + 56,28EE - 232,97MM - 24,86FDN + 10,42FDA (R<sup>2</sup> = 0,84) e EMAn = 4095,41 + 56,84EE - 225,26MM - 22,24FDN (R<sup>2</sup> = 0,83).

Esse ajuste com R<sup>2</sup> inferior nos resultados do presente trabalho em relação ao encontrado na literatura, pode ser em função da variabilidade existente entre os animais. Nos últimos anos, os programas de melhoramento genético e a nutrição dos frangos de corte evoluíram significativamente, alterando a eficiência com que os animais aproveitam os nutrientes e o conteúdo energético contidos nas rações (Choi *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024).

Outro fator a ser considerado é a variabilidade existente entre os alimentos catalogados, tanto na EMAn, quanto na composição química, haja visto que foram consideradas a soma de

informações de duas categorias de alimentos concentrados (energéticos e proteicos) diferentes, provenientes de diferentes regiões e países. Assim, subentende-se que os alimentos possuem composição química muito diferente e, conseqüentemente, a equação de predição pode subestimar ou superestimar os valores de EMAn em função do peso das variáveis independentes que as compõem.

Segundo Nascimento *et al.* (2009), os teores de FDN e FDA apresentam correlações negativas com a EMAn dos alimentos concentrados e possuem grande influência na variabilidade energética dos mesmos e, portanto, não devem ser desconsiderados em modelos de predição de EMAn. No entanto, ao observar os modelos de predição de EMAn ajustados com o conjunto de dados atualizado neste estudo, a FDA não participou de nenhuma das equações e a FDN não esteve presente na equação 3, sendo um outro fator que pode ter contribuído para a redução do coeficiente de determinação.

#### b) Alimentos concentrados energéticos de origem vegetal

Na Tabela 4 são demonstradas as equações obtidas utilizando 429 informações completas (Tabela 1) de composição química para os alimentos concentrados energéticos, aplicando o método *Stepwise* com o critério de Akaike (AIC) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Tabela 4 - Equações obtidas neste estudo para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados energéticos de origem vegetal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).

| Equações determinadas para alimentos energéticos de origem vegetal |            |                                       |           |           |           |          |          |                    |                |
|--|------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|--------------------|----------------|
| Equação  | Intercepto | <sup>1</sup> Parâmetros estimados (%) |           |           |           |          |          | AIC <sup>(a)</sup> | R <sup>2</sup> |
|  |            | PB                                    | EE        | MM        | FB        | FDN      | FDA      |                    |                |
| 1 <sup>(b)</sup>   | 4131,3020  | -22,1248                              | +70,3404  | -130,1873 | -103,6068 | -12,7029 | +25,5118 | 5968,18            | 0,54           |
| 2 <sup>(c)</sup>   | 4137,9930  | -15,7041                              | +54,8548  | -123,6490 | -71,2845  | -12,117  | -        | 5890,93            | 0,50           |
| 3 <sup>(d)</sup>   | 3944,1406  | -66,9332                              | +135,7135 | -165,4716 | -119,0989 | -        | +53,5921 | 6226,81            | 0,64           |

<sup>1</sup>Parâmetros estimados: PB = proteína bruta; EE = extrato etéreo; MM = matéria mineral; FB = fibra bruta; FDN = fibra em detergente neutro e; FDA = fibra em detergente ácido.

<sup>(a)</sup>Critério de Akaike.

<sup>(b)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 10 grupos.

<sup>(c)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 20 grupos.

<sup>(d)</sup>Atualização da metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). Grupos homogêneos definidos pela combinação dos níveis de sexo, idade e metodologia usada no ensaio metabólico com frangos de corte.

Fonte: Autor (2024).

A equação que melhor se ajustou para prever a EMAn dos alimentos concentrados energéticos foi a  $EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN$ , com AIC de 5890,93 e  $R^2$  de 0,50, que utilizou a metodologia ACP com 20 grupos (equação 2). Nascimento *et al.* (2011a) também obtiveram uma equação para estimar os valores de EMAn de alimentos energéticos, mais simples, com apenas cinco variáveis estudadas:  $EMAn = 4205,23 + 30,58EE - 130,35MM - 58,29FB - 28,31FDN + 16,71FDA$  ( $R^2 = 0,81$  e  $n = 197$  informações), utilizando a metodologia de agrupamento por sexo, idade e método usado no ensaio metabólico com frangos de corte e a meta-análise.

De acordo com Rodrigues *et al.* (2001), equações com grande número de variáveis, apesar de serem mais precisas nas estimativas, podem se tornar inviabilizadas, pois poderá aumentar o custo e o tempo das análises laboratoriais em relação àquelas com menor número de variáveis. Assim, uma equação gerada com menor número de variáveis e com valores do critério de escolha do modelo adequados, a exemplo de  $R^2$  e AIC, geralmente, são as selecionadas pelos autores uma vez que poderá reduzir o tempo de obtenção dos resultados laboratoriais e proporcionar maior rapidez para formulação de rações (Garcia Junior, 2015).

Em relação ao número de informações utilizadas para a obtenção das equações de predição de EMAn, Nascimento *et al.* (2011a) observaram em seu estudo que ao considerar na análise apenas as informações completas do milho, a equação ajustada para a predição de EMAn apresentou  $R^2$  de 13%, elevou-se para 33% quando essas informações foram para milho e seus subprodutos energéticos e, por fim, apresentou melhores resultados, com  $R^2$  de 81%, quando consideraram as informações para a categoria de alimentos energéticos. Portanto, é possível que quanto maior for o número de informações e maior variabilidade entre os valores de EMAn na análise, maior poderá ser a precisão da equação ajustada para determinar os valores de EMAn de alimentos energéticos, por meio do princípio de meta-análise.

c) Alimentos concentrados proteicos de origem vegetal

Na Tabela 5 estão as equações de predição obtidas utilizando 252 informações completas (Tabela 1) de composição química para os alimentos concentrados energéticos, aplicando o método *Stepwise* com o critério de Akaike (AIC) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Tabela 5 - Equações obtidas neste estudo para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados proteicos de origem vegetal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).

| Equações determinadas para alimentos proteicos de origem vegetal |            |                                   |           |           |           |     |          |                    |                |
|--|------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----|----------|--------------------|----------------|
| Equação  | Intercepto | <sup>1</sup> Parâmetros estimados |           |           |           |     |          | AIC <sup>(a)</sup> | R <sup>2</sup> |
|  |            | PB                                | EE        | MM        | FB        | FDN | FDA      |                    |                |
| 1 <sup>(b)</sup>   | 2962,9847  | +20,1241                          | +55,9157  | -216,9283 | -11,6740  | -   | -14,8843 | 3493,42            | 0,84           |
| 2 <sup>(c)</sup>   | 2912,6629  | +20,7391                          | +54,3630  | -187,2556 | -26,6337  | -   | -21,8534 | 3542,20            | 0,86           |
| 3 <sup>(d)</sup>   | 3944,1406  | -66,9332                          | +135,7135 | -165,4716 | -119,0989 | -   | +53,5921 | 6226,81            | 0,65           |

<sup>1</sup>Parâmetros estimados: PB = proteína bruta; EE = extrato etéreo; MM = matéria mineral; FB = fibra bruta; FDN = fibra em detergente neutro e; FDA = fibra em detergente ácido.

<sup>(a)</sup>Critério de Akaike.

<sup>(b)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 10 grupos.

<sup>(c)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 20 grupos.

<sup>(d)</sup>Atualização da metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). Grupos homogêneos definidos pela combinação dos níveis de sexo, idade e metodologia usada no ensaio metabólico com frangos de corte.

Fonte: Autor (2024).

A equação 1 que utilizou a metodologia ACP com 10 grupos ( $EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA$ ) foi a que melhor se ajustou para estimar os valores de EMAn para o conjunto de dados atualizados, com AIC de 3493,42 e R<sup>2</sup> de 0,84. Nascimento *et al.* (2011b) consideraram 67 informações completas de composição química (PB, EE, MM, FB, FDN e FDA) e obtiveram a seguinte equação para determinar a EMAn de alimentos proteicos de origem vegetal:  $EMAn = 2707,71 + 58,63EE - 16,06FDN$ , com R<sup>2</sup> de 0,81. Já Mariano *et al.* (2012) ao considerarem 67 informações completas de alimentos concentrados proteicos e aplicarem a metodologia ACP com 10 grupos, obtiveram a equação de  $EMAn = 4144,914 + 53,137EE - 204,644MM - 26,214FB - 20,260FDN$ , com AIC de -42,219 e R<sup>2</sup> de 0,71.

Portanto, a equação selecionada para alimentos proteicos de origem vegetal neste trabalho utilizando meta-análise juntamente com ACP apresenta acurácia quando comparado às equações propostas por Nascimento *et al.* (2011b) e Mariano *et al.* (2012). Com isso, após sua validação, poderá ser indicada para determinar os valores energéticos dessa categoria de alimentos para frangos de corte e facilitar o processo de formulação de rações, ao invés de executarem experimentos *in vivo* específicos com aves como em Rodrigues *et al.* (2002) e Alvarenga *et al.* (2011), demorados e onerosos.

d) Alimentos concentrados proteicos de origem animal

As equações de predição de regressão linear múltipla obtidas utilizando 163 informações completas (Tabela 1) de composição química para os alimentos concentrados proteico de origem animal, aplicando o método *Stepwise* com o critério de Akaike (AIC) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ), encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Equações obtidas neste estudo para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrados proteicos de origem animal, em função da composição química dos alimentos utilizados para frangos de corte (valores expressos com base na matéria seca, MS).

| Equações determinadas para alimentos proteicos de origem animal |            |                                   |          |          |         |          |                    |                |
|---|------------|-----------------------------------|----------|----------|---------|----------|--------------------|----------------|
| Equação   | Intercepto | <sup>1</sup> Parâmetros estimados |          |          |         |          | AIC <sup>(a)</sup> | R <sup>2</sup> |
|   |            | PB                                | EE       | MM       | Ca      | P        |                    |                |
| 1 <sup>(b)</sup>  | 3213,4380  | -                                 | +53,9769 | -49,3310 | -       | -        | 2498,19            | 0,64           |
| 2 <sup>(c)</sup>  | 3137,5850  | -                                 | +58,5863 | -46,8114 | -2,5727 | -        | 2523,51            | 0,56           |
| 3 <sup>(c)</sup>  | 3156,0445  | -                                 | +58,1022 | -44,7134 | -       | -19,1335 | 2523,21            | 0,56           |
| 4 <sup>(c)</sup>  | 3172,5776  | -                                 | +57,7278 | -45,5500 | +8,0873 | -31,4115 | 2525,01            | 0,56           |

<sup>1</sup>Parâmetros estimados: PB = proteína bruta; EE = extrato etéreo; MM = matéria mineral; Ca = Cálcio; e P = Fósforo.

<sup>(a)</sup>Critério de Akaike.

<sup>(b)</sup>Atualização da metodologia proposta por Mariano *et al.* (2012). ACP = análise de componentes principais com 10 grupos.

<sup>(c)</sup>Atualização da metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). Grupos homogêneos definidos pela combinação dos níveis de sexo, idade e metodologia usada no ensaio metabólico com frangos de corte.

Fonte: Autor (2024).

Na Tabela 6 é possível observar que a equação 1 apresentou o menor valor de AIC (2498,19) em relação às demais equações preditivas. No entanto, nota-se que as variáveis Ca e P não se encontram nesse modelo e devido a correlação negativa dessas variáveis com a EMAn dos alimentos de origem animal (Oliveira *et al.*, 2018), optou-se por selecionar as equações 2, 3 e 4. Já se é sabido, que as farinhas de origem animal são fontes importantes de proteína, cálcio e fósforo na alimentação de frangos de corte (Oliveira *et al.*, 2018; Troni *et al.*, 2016), o que evidencia a importância dessas variáveis estarem presentes nos modelos preditivos de EMAn para alimentos de origem vegetal.

Oliveira *et al.* (2018) definiram equações de predição de EMAn para farinhas de vísceras de aves ( $EMAn = 6802 - 213,3EE - 127,3Ca + 10,47Idade$ ,  $R^2 = 0,92$ ) e para farinhas de carne e ossos ( $EMAn = 2789 - 72EE + 14Ca + 20,28Idade$ ,  $R^2 = 0,91$ ), por meio de meta-análise. Os autores utilizaram o sexo e a idade dos animais para formação de grupos homogêneos e obtenção dos modelos preditivos de RLM.

Garcia Júnior (2015), adotou a metodologia de Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b) para a formação de grupos homogêneos, e a seleção de equações foi feita pelo método de *Stepwise*, utilizando-se o critério de AIC para a determinar os modelos matemáticos com os melhores ajustes. Assim, o autor obteve diferentes equações para predizer a EMAn de farinhas de origem animal e farinhas de carne e osso para os grupos de dados nacionais, internacionais e nacionais ou internacionais, que incluíam as variáveis energia bruta, PB, MM, Ca e P.

Observa-se que três equações se ajustaram (Tabela 6) com  $R^2$  semelhantes (0,56), para determinar a EMAn dos alimentos proteicos de origem animal e devem ser testadas futuramente através de ensaios metabólicos realizados com frangos de corte em diferentes idades, conforme estudo conduzido por Alvarenga *et al.* (2011, 2015) e Oliveira *et al.* (2018). No caso de a resposta da validação seja idêntica e confiável estatisticamente nas três situações, poderá ser adotada a(s) equação(s) com menos variáveis. Dolz e De Blas (1992) obtiveram equações predição utilizando apenas duas variáveis (PB e EE), as quais foram responsáveis por mais de 96% da variabilidade total nas estimativas dos valores de EMAn para farinha de carne e ossos. Já Souza (2009), observou que a equação que melhor se ajustou na determinação da EMAn de alimentos proteicos de origem animal foi a que continha as variáveis PB, EE e MM (EMAn =  $-7184,50 + 112,91 \text{ PB} + 113,33 \text{ EE} + 118,90 \text{ MM}$ ;  $R^2 = 0,63$ ). Entretanto, nota-se que as variáveis que fazem parte do modelo podem variar em função da origem e composição do alimento, ou grupo de alimentos o qual as equações são estimadas.

Diante disso, conforme já mencionado anteriormente por Rodrigues *et al.* (2001) e Mariano *et al.* (2012), uma equação com menos variáveis, mas que forneça uma boa estimativa da EMAn do alimento proteico de origem animal estudado, pode minimizar o tempo e custo de obtenção das análises laboratoriais e proporcionar um processo de formulação com maior acurácia.

De modo geral, o  $R^2$  inferior encontrado neste estudo quando comparado aos trabalhos obtidos na literatura, pode ter sido em decorrência da variabilidade da composição química encontrada nas categorias de alimentos oriundos de diversas regiões e países, além dos avanços nas áreas de melhoramento genético e nutrição de frangos de corte que melhoraram a eficiência de aproveitamento dos nutrientes e da energia contida na ração.

Ressalta-se que para a condução desta meta-análise foram contabilizadas informações de composição química e de EMAn de estudos nacionais e internacionais, sendo que a maioria dos autores citados (Alvarenga *et al.*, 2011; 2015; Mariano *et al.*, 2012; Nascimento *et al.*, 2009, 2011a, 2011b; Oliveira *et al.*, 2018) obtiveram equações de predição de EMAn utilizando apenas dados nacionais. Segundo Stefanello *et al.* (2023), a composição química de alimentos

oriundos de diferentes cultivares e regiões tendem a apresentar grandes variações e, conseqüentemente, alterações nos seus valores de energia.

Além disso, as informações catalogadas são provenientes de experimentos realizados com animais de sexo e idade diferentes, sendo a variabilidade da EMAn inevitável, concordando com Noblet, Wu e Choct (2022), os quais afirmam que a composição química, metabolizabilidade e os métodos de processamento dos alimentos, bem como a idade das aves submetidas aos experimentos, sob diferentes metodologias empregadas, causam alterações nos valores energéticos dos alimentos.

Já o critério de AIC não pode ser comparado com os AICs dos outros modelos propostos, pois só pode ser comparado os valores de AICs de análises feitas com a mesma base de dados (Garcia Junior, 2015). Desse modo, apesar do R<sup>2</sup> ter sido baixo, o valor de AIC demonstrou-se mais acurado para selecionar os melhores modelos de predição de EMAn para as categorias de alimentos estudadas. Portanto, recomenda-se, sempre que possível, a utilização conjunta de outros critérios de seleção e, posterior, validação dos modelos (Mariano *et al.*, 2012).

### 3.2. Coeficiente de correlação dos alimentos concentrados de origem vegetal e animal

As correlações entre todas as variáveis da composição química e valores de EMAn dos alimentos concentrados energéticos e proteicos de origem vegetal, estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de correlação de Pearson estimados entre as variáveis de composição química dos alimentos concentrados de origem vegetal.

|      | <sup>1</sup> EMAn | PB       | EE       | MM       | FB       | FDN      | FDA |
|------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| EMAn | 1                 |          |          |          |          |          |     |
| PB   | -0,3419**         | 1        |          |          |          |          |     |
| EE   | 0,1878**          | 0,1158** | 1        |          |          |          |     |
| MM   | -0,6853**         | 0,6229** | 0,2426** | 1        |          |          |     |
| FB   | -0,6557**         | 0,2376** | 0,1512** | 0,5881** | 1        |          |     |
| FDN  | -0,5552**         | -0,0741* | 0,1368** | 0,3555** | 0,7332** | 1        |     |
| FDA  | -0,4819**         | 0,3041** | 0,2190** | 0,4799** | 0,7282** | 0,6202** | 1   |

<sup>1</sup>EMAn = energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio; PB = proteína bruta; EE = extrato etéreo; MM = matéria mineral; FB = fibra bruta; e FDN = fibra em detergente neutro; FDA = fibra em detergente ácido.

\*significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste t ( $p < 0,05$ ).

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste t ( $p < 0,01$ ).

Fonte: Autor (2024).

Das seis variáveis de composição química dos alimentos concentrados de origem vegetal, cinco se correlacionaram negativamente ( $p < 0,01$ ) com a EMAn dos mesmos, obedecendo a seguinte ordem de importância: MM (-0,6853), FB (-0,6557), FDN (-0,5552), FDA (-0,4819) e PB (-0,3419), podendo causar alterações nos valores energéticos à medida que seus teores se elevam na composição alimentar. Apenas o teor de EE correlacionou-se positivamente (0,1878;  $p < 0,01$ ) com a EMAn, resultado semelhante foi descrito por Nascimento *et al.* (2009) ao observarem que entre todos os parâmetros utilizados para determinar as equações de predição, o EE foi o único que teve correlação positiva (0,269;  $p < 0,01$ ) com os valores de EMAn. Já para as demais variáveis independentes, o efeito foi negativo: MM (-0,753), FB (-0,705), FDN (-0,575), FDA (-0,427) e PB (-0,378).

A matéria mineral atuou expressivamente sobre os valores de EMAn dos alimentos, compondo todas as equações ajustadas (Tabelas 3, 4 e 5), no entanto, se correlacionou negativamente com a EMAn (-0,6853) e positivamente ( $p < 0,01$ ) com todos os nutrientes, como a PB (0,6239), FB (0,5881), FDA (0,4799), FDN (0,3555) e EE (0,2426). Esses resultados corroboram com os encontrados por Nascimento *et al.* (2009) e Rodrigues *et al.* (2001) em que a MM foi a fração que mais se correlacionou aos valores energéticos dos alimentos concentrados energéticos e proteicos, participando de praticamente todas as equações estimadas em seus estudos. Entretanto, segundo Nascimento *et al.* (2009) o aumento da MM do alimento pode resultar em uma redução da matéria orgânica, que é geradora de energia e, conseqüentemente, o valor energético do alimento pode diminuir.

Alvarenga *et al.* (2015) validaram oito equações para estimar a EMAn de alimentos concentrados de origem vegetal obtidas da literatura nacional e observou que a MM estava presente em seis dos modelos validados. Com isso, fica evidente a importância da MM e sua contribuição na variabilidade energética dos alimentos.

A correlação da PB e FB (0,2376;  $p < 0,01$ ) pode provocar efeitos indiretos sobre os valores de EMAn de alimentos concentrados, haja visto que o aumento da PB do alimento ocasiona aumento da FB. Com isso, os teores de FDN e FDA por estarem correlacionados aos teores de FB dos alimentos (0,7332 e 0,7282, respectivamente), também podem ter seus valores elevados, ocasionando a redução dos valores energéticos dos alimentos concentrados.

As correlações negativas entre os componentes da fibra e o valor da EMAn dos alimentos podem ser explicados por Cowieson, Bedford e Ravindran (2010). De acordo com esses autores, a parede celular das fibras dos vegetais possui um conteúdo variável de polissacarídeos não amiláceos (PNAs) podendo ser potencialmente antagônicos à utilização de nutrientes pelo animal. Embora o milho e o farelo de soja sejam ingredientes altamente

digestíveis, esses autores, estimam que as aves podem deixar de aproveitar em torno de 400 a 450 kcal kg<sup>-1</sup> de energia proveniente da dieta devido à indisponibilidade dos nutrientes na composição provocados pelos efeitos negativos dos PNAs. Portanto, deve-se incluir as variáveis FDN e FDA nas equações de predição de EMAn de alimentos de origem vegetal visto sua importância.

Na Tabela 8 estão demonstradas as correlações entre todas as variáveis da composição química e valores de EMAn dos alimentos concentrados proteicos de origem animal.

Tabela 8 - Coeficientes de correlação de Pearson estimados entre as variáveis de composição química dos alimentos concentrados proteicos de origem animal.

|      | <sup>1</sup> EMAn | PB        | EE       | MM       | Ca       | P |
|------|-------------------|-----------|----------|----------|----------|---|
| EMAn | 1                 |           |          |          |          |   |
| PB   | 0,4740**          | 1         |          |          |          |   |
| EE   | 0,0644            | -0,5406** | 1        |          |          |   |
| MM   | -0,6757**         | -0,8647** | 0,3813** | 1        |          |   |
| Ca   | -0,5752**         | -0,7656** | 0,3554** | 0,8552** | 1        |   |
| P    | -0,5954**         | -0,7449** | 0,3138** | 0,8501** | 0,9271** | 1 |

<sup>1</sup>EMAn = energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio; PB = proteína bruta; EE = extrato etéreo; MM = matéria mineral; Ca = cálcio e; P = fósforo.

\*significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste t ( $p < 0,05$ ).

\*\*significativo ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste t ( $p < 0,01$ ).

Fonte: Autor (2024).

Para os alimentos de origem animal, os coeficientes de correlação entre EMAn com PB, MM, Ca e P foram significativos ( $p < 0,01$ ), com exceção de EE. A correlação da EE com a EMAn foi baixa (0,0644) e não significativa ( $p > 0,05$ ). Esse resultado pode ser explicado pela falta de padronização na etapa de extração de gordura no processo de fabricação das farinhas de origem animal. Silva *et al.* (2010) também observaram a baixa correlação entre EE e as demais variáveis químicas e atribuíram esse resultado a quantidade de gordura adicionada no digestor, devido à falta de padronização nesse processo por parte das empresas de produção de subprodutos de origem animal. Segundo Butolo (2010), níveis elevados de EE podem diminuir o tempo de armazenamento das farinhas de origem animal, aumentando sua suscetibilidade à rancificação.

A MM apresentou correlação significativa e negativa com EMAn (-0,6757) e PB (-0,8647), e positivamente com EE (0,3813), Ca (0,8552) e P (0,8501). Com isso, a MM possui uma participação efetiva na determinação dos valores de EMAn dos alimentos de origem

animal. De acordo com Eynng *et al.* (2011), altos níveis de MM nos alimentos, junto com os íons de Ca e de sódio, pode ocasionar a saponificação das gorduras presentes nas farinhas de origem animal, reduzindo o seu aproveitamento energético pelos frangos de corte.

Oliveira *et al.* (2018) observaram que o principal fator de variação na produção de farinhas de carne e ossos é a porcentagem de ossos na mistura, ou seja, maiores concentrações de ossos diminuem os teores de PB e EB e, conseqüentemente, aumentam os teores de MM. Silva *et al.* (2010) ao avaliarem as farinhas de vísceras de aves também notaram que a EMAn estava correlacionada negativamente com MM, Ca e P.

Karakas *et al.* (2001) utilizando farinha de carne e ossos bovina e suína, com diferentes teores de MM na alimentação de frangos de corte, observaram que altos níveis de MM (acima de 43%) e altos níveis de inclusão nas dietas (acima de 20%) diminuíram os valores de EMAn, provavelmente, porque níveis elevados de Ca e P fornecidos pela alta inclusão da farinha comprometeram a utilização de outros nutrientes. Por isso, Sakomura e Rostagno (2007) sugerem a inclusão de 20 % desse tipo de farinha na ração referência, pois acima desse valor ocorre desequilíbrio de nutrientes que pode reduzir o consumo e subestimar o valor energético do alimento.

Diante disso, coeficientes de correlação altos e significativos entre as variáveis independentes (PB, EE, MM, Ca e P) e a variável dependente (EMAn) corroboram com os resultados encontrados da literatura e ajudam a compreender as variações nos valores energéticos dos alimentos de origem animal. Ao saber que a EMAn sofre influência de vários fatores, é importante que a escolha das variáveis que compoñham o modelo de predição de EMAn respeite o maior coeficiente de correlação que exercerá, conseqüentemente, maior influência sobre a EMAn, no entanto, deve-se atentar a aplicabilidade desta equação.

De acordo com Nascimento *et al.* (2011a, 2011b), modelos estatísticos que compreendem um grande número de variáveis tornam-se complexos e podem inviabilizar algumas análises químicas, que não são facilmente disponíveis e, isso, pode impedir o uso da equação. Por isso, considerando que determinação de MM é um procedimento fácil e prático (Oliveira *et al.*, 2018), é possível usá-la como um instrumento para estimar a composição química, haja visto que, conforme afirmam Najafabadi *et al.* (2007), o teor de MM é um bom indicador da composição química de farinhas de origem animal.

### 3.3 Modelos de redes neurais artificiais do tipo *Multilayer Perceptron Network* para alimentos concentrados de origem vegetal

Dentre as várias redes neurais ajustadas, com uma ou duas camadas ocultas, foram escolhidos dois modelos *Multilayer Perceptron Network* (MLP) que apresentaram a melhor precisão na previsão dos valores de EMAn. Para os neurônios ocultos do modelo 1, utilizou-se uma função de ativação rápida tipo ‘sigmoideal’, enquanto o neurônio de saída usou uma função ‘cosseno simétrico’. Já o modelo 2, considerou a função de ativação rápida tipo ‘sigmoideal’ para a única camada oculta e a função ‘gaussiana simétrica’ para o neurônio da camada de saída.

A Tabela 9 traz os resultados das estatísticas para verificar a adequabilidade dos modelos, para os conjuntos de treinamento, teste e validação dos dois modelos selecionados. Essas estatísticas refletem as medições do erro de previsão com base na diferença entre os valores de EMAn observados e os previstos. Um valor de  $R^2$  mais próximo de um, um Bias mais próximo de zero e menores valores de m.s.e., MAPE e MAD indicam maior precisão do modelo.

Tabela 9 - Estatísticas usadas para verificar a adequabilidade do ajuste e a precisão de dois modelos de redes neurais artificiais do tipo *Multilayer Perceptron Network* (MLP) aplicados aos dados obtidos em ensaios metabólicos com frangos de corte.

| Estatísticas <sup>(a)</sup> | Modelo 1 de RNA                        |           |           | Modelo 2 de RNA         |          |           |
|-----------------------------|--|-----------|-----------|-------------------------|----------|-----------|
|                             | <sup>1</sup> MPL 10-5-3-1 <sup>1</sup> |           |           | <sup>2</sup> MPL 10-5-1 |          |           |
|                             | Treinamento                            | Teste     | Validação | Treinamento             | Teste    | Validação |
| $R^2$                       | 0,89                                   | 0,76      | 0,89      | 0,79                    | 0,90     | 0,85      |
| MAD                         | 186,87                                 | 232,57    | 186,87    | 476,31                  | 189,13   | 221,94    |
| MAPE                        | 5,99                                   | 8,77      | 5,99      | 25,74                   | 6,41     | 6,82      |
| m.s.e                       | 48747,12                               | 118284,20 | 48747,12  | 278686,20               | 49981,84 | 62971,01  |
| Bias                        | -31,92                                 | -25,16    | -31,92    | -148,80                 | -59,38   | 17,02     |

<sup>(a)</sup> $R^2$  – Coeficiente de Determinação; MAD – desvio absoluto médio; MAPE – erro percentual absoluto médio; m.s.e – erro quadrático médio; Bias – viés.

<sup>1</sup>Funções de ativação: 1st layer: like sigmoide, 2st layer: cosseno simétrico. Variáveis: PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, CAT, ING, ANIMAL e IDADE.

<sup>2</sup>Funções de ativação: 1st layer: like sigmoide, 2st layer: gaussiana simétrica. Variáveis: PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, CAT, ING, ANIMAL, IDADE.

Fonte: Autor (2024).

No modelo MLP 10-5-3-1 foi possível observar valores menores de m.s.e., MAD e MAPE em comparação ao modelo MLP 10-5-1, para os dados de treinamento. Além disso, o

modelo 1 demonstrou valores de  $R^2$  mais próximos de um (0,89) e de Bias mais próximo de zero (-31,92) quando comparado ao modelo 2 ( $R^2 = 0,79$  e Bias = -148,80) no conjunto de treinamento. Já para o conjunto teste, o modelo MLP 10-5-1 garantiu uma melhor generalização na predição dos valores de EMAn, exceto se considerando que o Bias (-25,16) do modelo 1 foi mais próximo de zero do que o modelo 2 (-59,38).

Para efeitos de seleção final do melhor modelo, optou-se pela verificação de sua generalização também no conjunto de validação, em que se obteve para o primeiro modelo um maior valor de  $R^2$  e menores valores para as medidas de erro MAD, MAPE e m.s.e, se comparado ao MLP 10-5-1 (Tabela 9). Portanto, a partir destas análises, o novo modelo MLP 10-5-3-1 usando as variáveis PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, categoria, ingrediente, animal e idade proposto neste estudo apresentou uma boa capacidade de generalização, o que permite seu uso com novos conjuntos de dados.

Anteriormente, Mariano *et al.* (2013, 2020b) criaram um aplicativo denominado *AMEn Predictor* (<https://apkpure.com/br/amen-predictor/com.amenpredictor>) usando essa metodologia baseada em RNA e um banco de dados contendo os valores de composição química e de EMAn de alimentos concentrados (energéticos e proteicos) de origem vegetal comumente utilizados nas dietas de aves proposto por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). No aplicativo supracitado, tem-se implementado o modelo MLP 7-5-3-1 que utiliza as variáveis PB, EE, MM, FB, categoria, ingrediente e animal, permitindo aos usuários predizer a EMAn dos alimentos de origem vegetal para as aves. Para esse modelo, os autores obtiveram valores de  $R^2$  iguais a 0,91 e 0,86 para os conjuntos de treinamento e teste, respectivamente.

Apesar do modelo de MLP 7-5-3-1 descrito por Mariano *et al.* (2013, 2020b) demonstrar-se mais acurado em relação ao modelo de MLP 10-5-3-1 proposto neste estudo (Tabela 9), destaca-se que o modelo implementado no aplicativo *AMEn Predictor* está desatualizado, pois utilizaram-se informações de composição química e de EMAn dos alimentos de origem vegetal catalogadas da literatura nacional, no período de 1982 a 2007. Ademais, o aplicativo não contempla as variáveis de FDN, FDA e nem a idade dos animais as quais, também, possuem influência na determinação dos valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal utilizados nas rações das aves (Khalil *et al.*, 2021, Lopes *et al.*, 2024).

Em virtude disso, o aplicativo deverá ser atualizado com o novo modelo de RNA obtido, o MLP 10-5-3-1. Lembrando que este novo modelo considerou a base de dados atualizada, em que foram catalogados registrados de alimentos para aves disponíveis na literatura nacional e internacional, no período de 1982 a 2023. Vale ressaltar que o referido modelo é adequado para

prever a EMAn de alimentos de origem vegetal, comumente utilizados em rações para frangos de corte, tais como milho, sorgo, soja, farelo de soja, trigo e farinha de trigo.

Além disso, devido à importância econômica e nutricional dos alimentos concentrados proteicos de origem animal, tais como farinhas de vísceras de aves, farinhas de carne e ossos, farinha de penas e farinhas de vísceras suínas, na formulação de dietas para as aves (Oliveira *et al.*, 2018), outros tipos de RNA e técnicas adicionais deverão ser exploradas em estudos futuros para otimizar a generalização das redes (por exemplo, validação cruzada, parada antecipada e identificação de outros parâmetros de entradas que possam contribuir para a construção de uma MLP) para que essa categoria de alimento (concentrados proteicos de origem animal) possa também ser incluída no aplicativo *AMEn Predictor*.

O modelo MLP selecionado neste estudo tem maior precisão ( $R^2 = 0,89$ ) (Tabela 9) do que os modelos obtidos por Nascimento *et al.* (2011a, 2011b), Mariano *et al.* (2012) e Alvarenga *et al.* (2021), em que os autores obtiveram equações para estimar a EMAn de alimentos proteicos e energéticos para frangos de corte, por meio de métodos de regressão, componentes principais e redes bayesianas. Seus modelos apresentaram valores de  $R^2$  de 0,81, 0,74 e 0,87, respectivamente.

Em contrapartida, observou-se resultados semelhantes a este estudo ( $R^2 = 0,89$ ) nos trabalhos conduzidos por Mariano *et al.* (2014, 2020a) quando utilizaram o comitê de redes neurais para estimar a EMAn de alimentos para aves. Os resultados obtidos por esses autores reforçam as conclusões de estudos anteriores (Alvarenga *et al.*, 2015; Mariano *et al.*, 2013, 2020b) de que o uso de modelos relacionados à RNA garante previsões mais precisas do que as obtidas por métodos estatísticos clássicos, na área de nutrição e produção animal.

Segundo Abreu *et al.* (2020), a aplicabilidade das RNAs está associada às situações onde as informações de entrada e saída são interligadas por uma relação não linear de variáveis dependentes (por exemplo, EMAn) e independentes (por exemplo, PB, EE, MM, FB, FDN e FDA).

O uso de RNA possui vantagens por não existir a necessidade de suposições restritivas e por sua capacidade de aprender soluções com base nos dados fornecidos para treinamento (aprendizagem adaptativa), para criar sua própria organização ou representação de informações recebidas durante o tempo de aprendizagem e analisar padrões complexos (Lotfi *et al.*, 2020; Mariano *et al.*, 2013). Por causa disso, os modelos de RNA são frequentemente usados para substituir sistemas matemáticos complexos descritos por inúmeras equações diferenciais (Hunter; Wilamowski, 2011; Lotfi *et al.*, 2020).

Outra vantagem da utilização das RNAs para inferir os valores de EMAn dos alimentos para aves é que, nessas redes, é viável adicionar um número maior de variáveis que podem influenciar na variabilidade da EMAn, algo que nem sempre é possível em outros métodos estatísticos, como na regressão linear múltipla (Mariano *et al.*, 2013, 2014).

De modo geral, a aplicação dos métodos estatísticos clássicos (RLM) e das técnicas computacionais como a RNA, têm sido promissores e possuem capacidade de impactar, diretamente, o processo produtivo na agroindústria. No entanto, segundo Mateos *et al.* (2019) e Zaefarian *et al.* (2021), é importante que os nutricionistas e gerentes de fábricas de rações utilizem sua própria experiência, conhecimento do local de trabalho e raciocínio lógico ao avaliar os prós e contras de cada um dos métodos disponíveis na literatura para estimar o conteúdo energético de ingredientes e dietas. Tendo em vista que, sem que haja um bom senso, nenhuma das metodologias disponíveis fornecerá estimativas precisas em condições práticas (Zaefarian *et al.*, 2021).

Portanto, o uso de novas metodologias, a criação de aplicativos (por exemplo *AMEn Predictor*) e de *softwares* capazes de avaliar o valor energético dos alimentos usados nas formulações de dietas para os frangos de corte em tempo real, com base apenas na composição química dos alimentos, sejam de baixo custo e que considerem os vários fatores que influenciam a variabilidade da EMAn (por exemplo, PB, EE, MM, FB, idade), são de fundamental importância para o setor avícola, pois dispensa o uso de bomba calorimétrica e bioensaios.

Entretanto, apesar dos diversos trabalhos citados na literatura sobre modelos de predição de EMAn para diferentes alimentos, a confiabilidade dos mesmos ainda é questionável, devido aos escassos trabalhos de validação com frangos de corte (Alvarenga *et al.*, 2013a, 2015). Posto isto, para que o aplicativo e outros métodos indiretos possam ser indicados aos profissionais da área de nutrição e produção avícola é necessário testar a confiabilidade da estimativa em pesquisas futuras, ou seja, comparar os valores estimados pelo modelo obtido com os valores observados nos ensaios *in vivo* com frangos de corte, para as diferentes categorias de alimento.

## 4 CONCLUSÃO

Os modelos atualizados de RLM considerados adequados pelo critério de AIC para a predição de EMAn são:

- $EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,6941EE - 209,4305MM - 57,9841FB - 8,1633FDN$ , para alimentos concentrados em geral de origem vegetal;
- $EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN$ , para alimentos energéticos de origem vegetal;
- $EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA$ , para alimentos proteicos de origem vegetal e;
- $EMAn = 3137,5850 + 58,5863EE - 46,8114MM - 2,5727Ca$ ;  $EMAn = 3156,0445 + 58,1022EE - 44,7134MM - 19,1335P$  e, por último,  $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$ , para alimentos proteicos de origem animal.

O modelo de RNA atualizado que apresentou uma boa capacidade de generalização do conjunto de dados deste estudo foi uma rede artificial do tipo *Multilayer Perceptron Network* (MLP) 10-5-3-1, que adota PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, categoria, ingrediente, animal e idade como variáveis de entrada para predizer a EMAn de alimentos para aves.

Diante do exposto, as equações de RLM e o modelo de RNA deverão ser validados em trabalhos futuros, utilizando a metodologia de ensaios metabólicos com aves em diferentes fases de criação, no intuito de comparar os valores estimados de EMAn pelos modelos com os valores de EMAn observados *in vivo* com frangos de corte. Assim, espera-se que as equações de RLM e o modelo RNA atualizados possam ser indicados com acurácia para os profissionais da área de produção e nutrição de não ruminantes, para aumentar a precisão da formulação de dietas para frangos de corte.

## REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, M. R.; WILTAFSKY-MARTIN, M.; RAVINDRAN, V. Application of apparent metabolizable energy versus nitrogen-corrected apparent metabolizable energy in poultry feed formulations: A Continuing Conundrum. **Animals**, Switzerland, v. 11, p. 2174, 2021.
- ABREU, L. H. P. *et al.* Artificial neural networks for prediction of physiological and productive variables of broilers. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 1, p. 1-9, 2020.
- AGUIRRE, L. *et al.* Apparent metabolizable energy and ileal amino acid digestibility of commercial soybean meals of different origins in broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 103, n. 7, p. 103786, 2024.
- ALVARENGA, R. R. *et al.* Energetic values of feedstuffs for broilers determined with in vivo assays and prediction equations. **Animal Feed Science and Technology**, v. 168, n. 3-4, p. 257-266, 2011.
- ALVARENGA, R. R. *et al.* Formulation of diets for poultry: the importance of prediction equations to estimate the energy values. **Archivos de Zootecnia**, Spain, MG, v. 62, p. 1-11, 2013.
- ALVARENGA, R. R. *et al.* Validation of prediction equations of energy values of a single ingredient or their combinations in male broilers. **Animal Bioscience**, Republic of Korea, v. 28, n. 9, p. 1335-1344, 2015.
- ALVARENGA, T. C. *et al.* Application of Bayesian networks to the prediction of the AMEn: a new methodology in broiler nutrition. **Translational Animal Science**, Oxford, v. 5, n. 1, 2021.
- BOLZAN, A. C. *et al.* Egg hatchability prediction by multiple linear regression and artificial neural networks. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 10, p. 97-102, 2008.
- BUTOLO, J. E. Qualidade de ingredientes na alimentação animal. 2ª Ed., **Colégio Brasileiro de Nutrição Animal**, Campinas, SP, 2010.
- CHOI, J. *et al.* Nutritional strategies to improve meat quality and composition in the challenging conditions of broiler production: A Review. **Animals**, Switzerland, v. 13, n. 8, p. 1386, 2023.
- COWIESON, A.J.; BEDFORD, M.R.; RAVINDRAN, V. Interactions between xylanase and glucanase in maize-soy-based diets for broilers. **British Poultry Science**, Oxford, v. 51, n. 2, p. 246- 257, 2010.
- DOLZ, S.; BLAS, C. de. Metabolizable energy of meat and bone meal from Spanish rendering plants as influenced by level of substitution and method of determination. **Poultry Science**, Champaign, v. 71, n. 2, p. 316-322, Feb. 1992.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3rd ed. New York: J. Wiley, 1998.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed. New York: John Wiley, 1981. 709p.

EYNG, C. *et al.* Composição química, valores energéticos e digestibilidade verdadeira dos aminoácidos de farinhas de carne e ossos e de peixe para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 3, p. 575-580, 2011.

GARCIA JUNIOR, A. A. P. **Determinação indireta e validação do valor energético de alimentos de origem animal para frangos de corte**. 2015. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.146 p.

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. São Paulo: HUCITEC, 1977.

HUNTER, D.; WILAMOWSKI, B. Parallel multi-layer neural network architecture with improved efficiency. *In: International conference on human system interaction (HSI 2011)*, Yokohama, Japan, 2011.

IGEL, C.; HUSKEN, M. **Improving the RPROP learning algorithm**. Proceedings of Second International Symposium on Neural Computing NC 2000, 23–26 May, Berlin, Germany, p. 115–21, 2000.

JAIN, A. K.; DUIN, R. P. W.; MAO, J. Statistical pattern recognition: a review. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, United States, v. 22, n. 1, p. 4-37, 2000.

KARAKAS et al., Nutritive Value of the Meat and Bone Meals from Cattle or Pigs in Broiler Diets. **Poultry Science**, Champaign, v. 80, n. 8, p. 1180–1189, 2001.

KHALIL, M. M. *et al.* Apparent metabolizable energy of cereal grains for broiler chickens is influenced by age. **Poultry Science**, Champaign, v. 100, n. 9, 2021.

LOPES, E. C. *et al.* Effect of different levels of whole corn germ on energy values and ileal digestibility in broilers. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 96, n. 3, p. e20230078, 2024.

LOTFI, M. *et al.* Estimation and prediction of metabolizable energy contents of wheat bran for poultry. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Iran, v. 22, n. 4, p. 965-976, 2020.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* AMEn Predictor: a mobile app to predict energy values of broilers feedstuffs. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v. 175, 2020. 2020b.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Committee neural network and weighted multiple regression to predict the energetic values of poultry feedstuffs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 55, p. e01199, 2020. 2020a.

- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Equações de predição de valores energéticos de alimentos obtidas utilizando meta-análise e componentes principais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1634-1640, 2012.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Neural network committee to predict the AMEn of poultry feedstuffs. **Neural Computing and Applications**, United Kingdom, v. 25, p. 1903-1911, 2014.
- MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Prediction of the energy values of feedstuffs for broilers using meta-analysis and neural networks. **Animal** (Cambridge), v.7, n.9, p. 1440–1445, 2013.
- MATEOS, G. G. *et al.* Critical review of the procedures used for estimation of the energy content of diets and ingredients in poultry. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 28, n. 3, p. 506-525, 2019.
- NAJAFABADI, H. J. *et al.* Determination of chemical composition, mineral contents, and protein quality of poultry by-product meal. **International Journal of Poultry Science**, Pakistan, v. 6, p. 875-882, 2007.
- NASCIMENTO, G. A. J. **Equações de predição dos valores energéticos de alimentos para aves utilizando o princípio da meta-análise.** 2007. 199 f. Tese (Doutorado em Nutrição de Monogástricos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar os valores da EMAn de alimentos proteicos para aves utilizando a meta-análise. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 10, p. 2172-2177, 2011. 2011b.
- NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar os valores energéticos de alimentos concentrados de origem vegetal para aves utilizando a meta-análise. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 7, p. 1265-1271, 2009.
- NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar valores da energia metabolizável de alimentos concentrados energéticos para aves utilizando meta-análise. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 63, n. 1, p. 222-230, 2011. 2011a.
- NOBLET, J.; WU, S. B., CHOCT, M. Methodologies for energy evaluation of pig and poultry feeds: A review. **Animal Nutrition**, United States, v. 8, n. 1, p. 185-203, 2022.
- NRC (National Research Council). **Nutrient Requirements of Poultry**, 9th ed.; National Academic Press: Washington, DC, USA, 1994.
- OLIVEIRA, C. R. C. de. *et al.* Prediction equations for energy values of animal meals obtained using meta-analysis. **Revista Brasileira De Zootecnia**, Viçosa, v. 47, p. e20180098, 2018.
- OLIVEIRA, E. F. M. *et al.* Níveis de energia metabolizável para frangos de corte de 1 a 21 dias de idade mantidos em ambiente de alta temperatura. **Revista Brasileira De Zootecnia**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 810-816, 2000.

PERAI, A. H. *et al.* A comparison of artificial neural networks with other statistical approaches for the prediction of true metabolizable energy of meat and bone meal. **Poultry Science**, Champaign, v. 89, p. 1562–1568, 2010.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Software.

REZAEI, A. *et al.* A new precision–fed chick assay for determining true metabolizable energy values of some poultry feed ingredients for broiler chickens. **Iranian Journal of Applied Animal Science**, Iran, v. 20, n. 1, p. 103-111, 2020.

RODRIGUES, P. B. *et al.* *AMEn Predictor*: aplicativo para prever a EMAn de alimentos para frangos de corte. Animal. In: XXVI Congresso Brasileiro de Zootecnia - ZOOTEC 2016: Cinquenta Anos de Zootecnia no Brasil, 2016, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: RS, 2016. p. 1-3.

RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos da soja e subprodutos da soja, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 1771-1782, 2002.

RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos do milheto, do milho e subprodutos do milho, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1767-1778, 2001.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T. **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2024. v.1. 531p.

SAKOMURA, N. K. *et al.* Efeito da idade dos frangos de corte na atividade enzimática e digestibilidade dos nutrientes do farelo de soja e soja integral. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 924-935, 2004.

SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. **Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos**. Jaboticabal: Funep, 2007. 283p.

SIBBALD, I. R. A bioassay for true metabolizable energy in feedingstuffs. **Poultry Science**, Champaign, v. 55, n. 1, p. 303-308, 1976.

SIBBALD, I.; SLINGER, S. A biological assay for metabolizable energy in poultry feed ingredients together with findings which demonstrate some of the problems associated with the evaluation of fats. **Poultry Science**, Champaign, v. 42, p.313-325, 1963.

SILVA, E. P. *et al.* Prediction of metabolizable energy values in poultry offal meal for broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, p. 2237 – 2245, 2010.

SOUZA, R. M. **Equações de predição dos valores energéticos de alimentos para aves**. 2009. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009. 123p.

STEFANELLO, C. *et al.* Research Note: Corn energy and nutrient utilization by broilers as affected by geographic areas and carbohydrases. **Poultry Science**, Champaign, v. 102, n. 2, p. 102366, 2023.

TRONI, A. R. *et al.* Composição química e energética de alimentos para frangos de corte. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 4, p. 755–760, 2016.

WANG, Q. *et al.* Genetic improvement of duration of fertility in chickens and its commercial application for extending insemination intervals. **Poultry Science**, Champaign, v. 103, n. 3, p. 103438, 2024.

WU, S. *et al.* Historical flaws in bioassays used to generate metabolizable energy values for poultry feed formulation: a critical review. **Poultry Science**, Champaign, v. 99, p. 385–406, 2020.

ZAEFARIAN, F. *et al.* Trends in feed evaluation for poultry with emphasis on in vitro techniques. **Animal Nutrition**, United States, v. 7, n. 2, p. 268-281, 2021.

**ARTIGO 2 - VALIDAÇÃO DE MODELOS PARA PREDIÇÃO DE VALORES  
ENERGÉTICOS DE ALIMENTOS PARA FRANGOS DE CORTE EM DIFERENTES  
IDADES**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o  
Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

## RESUMO

O objetivo do presente estudo foi avaliar e validar um conjunto de equações de regressão linear múltipla (RLM), o modelo disponível no aplicativo *AMEn Predictor* e um modelo de rede neural artificial (RNA) gerados por meta-análise para estimar a energia metabolizável corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn) de alimentos de origem vegetal e animal comumente utilizados na formulação de rações para frangos de corte machos. Para isso, foram conduzidos dois experimentos de metabolismo (*in vivo*) com frangos de corte Cobb 500<sup>®</sup> em crescimento (15 a 23 dias de idade) e na fase final de criação (36 a 42 dias de idade). Foram determinadas a EMAn de amostras de milho, do farelo de soja, do farelo de trigo, da farinha de carne e ossos (FCO) e mistura entre as FCOs. Também foram realizadas as análises laboratoriais para a determinação da composição química dos alimentos testados, a qual foi utilizada no cálculo da EMAn pelos métodos indiretos propostos. A análise estatística foi feita por meio do ajustamento de equação de regressão linear simples de valores observados *in vivo* sobre os valores estimados por cada método indireto, para cada um dos modelos. Para os alimentos de origem vegetal, apenas as equações de RLM não estimaram satisfatoriamente os valores de EMAn dos alimentos teste, embora o *AMEn Predictor* e o modelo de RNA tenham sido eficientes para estimar a EMAn dos alimentos; contudo, em alguns casos houve superestimação e subestimação dos valores de EMAn preditos em relação aos observados nos bioensaios. Para os alimentos de origem animal, todas as equações de RLM demonstraram-se eficazes para estimar a EMAn dos alimentos teste. Conclui-se que o *AMEn Predictor* e a RNA (MLP 10-5-3-1) podem ser utilizados para estimar, de forma satisfatória, a EMAn de alimentos de origem vegetal, e a equação  $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$  foi a mais indicada para estimar o valor energético dos alimentos de origem animal utilizados para frangos de corte.

**Palavras-chave:** Aves; *AMEn Predictor*; Coleta total; Métodos indiretos; Valor energético.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate and validate a set of maximum linear regression (MLR) equations, an AMEn Predictor application, and an artificial neural network (ANN) model generated by meta-analysis to estimate the metabolizable energy corrected for nitrogen balance (AMEn) of plant- and animal-origin feeds commonly used in the formulation of diets for male broilers. For this purpose, two metabolism experiments (*in vivo*) were conducted with Cobb 500<sup>®</sup> broilers in growth (15 to 23 days of age) and in the final phase of rearing (36 to 42 days of age). The AMEn of samples of corn, soybean meal, wheat bran, meat and bone meal (MBM), and a mixture of MBMs were determined. Also, laboratory analyses for determination of chemical composition of the tested feedstuffs were performed, which were utilized in calculating AMEn by the proposed indirect methods. The statistical analysis was made by adjustment of simple linear regression of observed *in vivo* values on the estimated values by each indirect method, for each of the models. For plant-based foods, only the RLM equations did not satisfactorily estimate the AMEn values of the tested foods, although the AMEn Predictor and the ANN model were efficient in estimating the AMEn of these foods, in some cases there was overestimation and underestimation of the predicted AMEn values in relation to the observations in the bioassays. For animal-based foods, all the RLM equations were found to estimate the AMEn of the tested foods. It is concluded that the AMEn Predictor and the ANN (MLP 10-5-3-1) can be used to satisfactorily estimate the AMEn of plant-based foods, and the selection  $AMEn = 3172.5776 + 57.7278EE - 45.5500MM + 8.0873Ca - 31.4115P$  was the most suitable for estimating the energy value of animal-origin feeds used for broiler.

**Keywords:** AMEn Predictor; Broilers; Energy value; Methods indirects; Total collection.

## 1 INTRODUÇÃO

A formulação de dietas para frangos de corte envolve uma combinação criteriosa de diversos alimentos e subprodutos que fornecem energia e nutrientes para atender às necessidades nutricionais das aves durante as fases de criação (Babatunde; Park; Adeola, 2021).

Considerando a variedade de alimentos que podem ser utilizados na formulação de ração para aves, faz-se fundamental o conhecimento e atualização contínua da composição química e dos valores de energia metabolizável (EM) dos ingredientes da ração (Belkhanchi *et al.*, 2023; Mariano *et al.*, 2020a; Rezaei *et al.*, 2020).

Está bem elucidado que a energia dietética influencia no desenvolvimento das aves (Abdollahi *et al.*, 2021; Alvarenga *et al.*, 2015; Belkhanchi *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2020). Diante disso, para formular uma dieta precisa que atenda satisfatoriamente às exigências energéticas dos frangos de corte, é necessário conhecer os valores energéticos dos alimentos (Aguirre *et al.*, 2024; Alvarenga *et al.*, 2015; Mariano *et al.*, 2020a). A forma mais utilizada na nutrição de aves para expressar o valor energético dos alimentos é a EMAn (energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio) (Abdollahi *et al.*, 2021; Mateos *et al.*, 2019).

Na literatura é possível encontrar inúmeras metodologias para determinar o conteúdo energético de rações para aves, como ensaios biológicos (*in vivo*) envolvendo a coleta total de excretas (Sibbald; Slinger, 1963), alimentação de precisão (Sibbald, 1976) ou o método rápido (Farrel, 1978); assim como ensaios não biológicos que são os testes *in vitro* (Zaefarian *et al.*, 2021) e refletância no infravermelho próximo (NIRS) (Belkhanchi *et al.*, 2023; Mateos *et al.*, 2019); tabelas de composição química e energética dos alimentos (NRC, 1994; Rostagno *et al.*, 2017; 2024) e, por último, equações de predição (Mariano *et al.*, 2020a; Nascimento *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2018) e modelos computacionais (Alvarenga, 2019; Mariano *et al.*, 2020b) que se baseiam na composição química dos alimentos.

De acordo com Alvarenga *et al.* (2015) e Mariano *et al.* (2020, 2020a, 2020b), as tabelas e as equações preditivas disponibilizam rapidamente os valores de EMAn, pois são estabelecidas em função da composição química dos alimentos, eliminando a necessidade de testes biológicos (determinação *in vivo*), que são onerosos e muitas vezes demorados. No entanto, os valores de EMAn informados nas tabelas existentes de composição química dos alimentos podem ser muito variáveis devido ao progresso da genética de plantas, mudanças na composição química dos ingredientes, métodos de ensaios de EM e o próprio melhoramento genético das aves ao longo do tempo, fazendo que sua validade seja limitada (Mateos *et al.*, 2019; Zaefarian *et al.*, 2021).

Por outro lado, o uso de equações e modelos computacionais podem ser uma alternativa rápida, econômica e mais aplicável de se determinar a EMAn dos alimentos, pois são estabelecidos em função da composição química obtida em laboratório, podendo ser atualizadas continuamente, bem como possibilitam acrescentar um maior número de variáveis que venham interferir na variabilidade da EMAn como, idade e sexo das aves (Alvarenga *et al.*, 2013; Alvarenga *et al.*, 2021; Mariano *et al.*, 2020a, 2020b).

Apesar dos diversos trabalhos citados na literatura de modelos de predição de EMAn, a confiabilidade dos mesmos ainda é questionável, devido aos escassos trabalhos de validação (Alvarenga *et al.*, 2013, 2015). Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar e validar um conjunto de equações de regressão linear múltipla (RLM), o aplicativo *AMEn Predictor* e um modelo de rede neural artificial (RNA) gerados por meta-análise para estimar a EMAn de alimentos de origem vegetal e animal comumente utilizados na formulação de rações para frangos de corte machos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Ensaio metabólicos

Para validação das equações de predição de EMAn, do modelo de rede neural artificial (RNA) e do modelo disponível no aplicativo *AMEn Predictor* foram conduzidos dois experimentos de metabolismo (*in vivo*) no período de maio a julho de 2023. Nos ensaios experimentais, foi utilizado o método de coleta total de excretas, para determinar a energia metabolizável aparente, corrigida para balanço de nitrogênio (EMAn, kcal kg<sup>-1</sup>) de três diferentes lotes de milho (M = 1, 2 e 3), três lotes de farelo de soja (FS = 1, 2 e 3), três lotes de farelo de trigo (FT = 1, 2 e 3), 4 lotes de farinha de carne e ossos (FCO = 1, 2, 3 e 4) e duas misturas de farinhas de carne e ossos (FCO = 1+4 e 2+4); com frangos de corte em crescimento no experimento I (15 a 23 dias de idade) e, no experimento II, na fase final de criação (35 a 42 dias de idade).

Todos os procedimentos experimentais foram aprovados pelo Comitê de Ética no Uso de Animais da UFLA (Protocolo nº 032/23).

### 2.1.1 Instalações e manejo dos animais

Os ensaios de metabolismo foram conduzidos em uma instalação de criação de frangos de corte situada no Setor de Avicultura da Faculdade de Zootecnia e Medicina Veterinária da Universidade Federal de Lavras (FZMV/UFLA), Minas Gerais, Brasil (coordenadas 21° 14' de latitude Sul, 45° 00' de longitude Oeste e 918 m de altitude). De acordo com o sistema de classificação internacional de Köppen, o clima predominante nesta área é classificado como Cwa, indicando um clima subtropical mesotérmico com verões quentes e chuvosos, bem como invernos frios e secos (Sá Júnior *et al.*, 2012).

Foram utilizados 400 pintos de corte da linhagem Cobb 500® no experimento I, e 240 no experimento II (sendo sequencial ao experimento I, diferindo na idade e número de aves por gaiola).

Os animais foram adquiridos em incubatório comercial, com um dia de idade (peso médio de  $44 \pm 2,3$  g) e alojados em galpão convencional de alvenaria, sob piso com cama de maravalha até atingirem a idade proposta para o ensaio I de 14 dias e de 35 dias para o ensaio II, ou seja, após o término do experimento I os animais retornavam para essa instalação até atingir a idade proposta para a execução do experimento II. Nesse período, as aves receberam uma ração para frangos de corte formulada a base de milho e farelo de soja (Tabela 1), de acordo com as exigências nutricionais recomendadas por Rostagno *et al.* (2017) para cada fase de criação.

Para a realização dos experimentos I (fase de crescimento) e II (fase final), aos 14 e 35 dias de idade, respectivamente, as aves foram homogeneizadas pelo peso, sendo que o peso médio para o experimento I foi de  $455 \pm 33$  g e para o experimento II de  $2697,8 \pm 0,189$  g. Posteriormente, as aves foram transferidas para uma sala de metabolismo e alojadas em gaiolas metabólicas (50 cm de largura, 50 cm de profundidade e 50 cm de altura) equipadas com um comedouro do tipo calha; um bebedouro automático infantil (experimento I) e trocado para um bebedouro tipo calha (experimento II) seguindo as recomendações do manual da linhagem de acordo com a faixa etária dos animais (Cobb, 2019) e uma bandeja de alumínio revestida de plástico sob o piso.

As variáveis ambientais do microclima interno da sala de metabolismo, temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , °C) e umidade relativa do ar (UR, %), foram controladas diariamente por um termohigrômetro digital (marca Kasvi, modelo K29-5070H) e obteve-se as seguintes médias:  $23,4 \pm 1,6$ °C de  $t_{bs}$  e  $65,2 \pm 2,2$ % de UR para fase de crescimento e  $19,5 \pm 3,3$ °C de  $t_{bs}$

e de UR média de  $59,6 \pm 9,8\%$  para a fase final de criação das aves. A sala também possuía exaustores aos quais foram programados para acionar caso a  $t_{bs}$  atingisse  $25^{\circ}\text{C}$ .

Durante o alojamento na sala de metabolismo, os animais foram submetidos a um programa de 24 horas de luz artificial no intuito de estimular o consumo de ração e, a ração e água foram fornecidas à vontade.

### **2.1.2 Delineamento experimental e dietas**

Os frangos de corte Cobb 500® foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com dezesseis tratamentos, sendo quinze rações-testes mais a ração referência, com cinco repetições de cinco aves no experimento I e três aves no experimento II, por unidade experimental. Isto se fez necessário pelo dimensionamento da estrutura física da unidade experimental e tamanho das aves no período estudado.

Os tratamentos, em cada fase da pesquisa, consistiram de uma ração referência formulada a base de milho e farelo de soja, suplementada com vitaminas e minerais seguindo as recomendações de Rostagno *et al.* (2017), para atender as exigências nutricionais dos frangos de corte para cada fase de criação (Tabela 1), e outras quinze rações contendo os alimentos-testes, sendo três amostras distintas de milho, do farelo de soja, do farelo de trigo; quatro amostras distintas da farinha de carne e ossos (FCO) e 2 misturas entre as FCOs. As amostras de milho e farelo de trigo foram incorporadas na ração referência em 40%, do farelo de soja em 30% e das farinhas de carne e ossos em 20%, todos com base na matéria natural (MN, kg) (Matterson; Potter; Stutz, 1965).

Tabela 1 - Composição centesimal e calculada da ração referência utilizada durante todo o período experimental, da matéria natural (MN, %).

|   | Períodos de criação de frangos de corte (dias de idade) |        |         |         |
|---|---|--------|---------|---------|
|   | 1 a 7   | 8 a 21 | 22 a 35 | 36 a 42 |
| <b>Ingredientes (%)</b>                           |   |        |         |         |
| Milho fubá  | 45,60   | 47,22  | 51,28   | 61,86   |
| Soja farelo, 45%                                  | 45,35   | 43,78  | 40,05   | 31,19   |
| Óleo de soja                                      | 4,75  | 5,08   | 5,06    | 3,87    |
| Fosfato bicálcico, 18,5%                          | 1,98  | 1,72   | 1,48    | 1,15    |
| Calcário  | 0,96  | 0,87   | 0,83    | 0,69    |
| Sal comum   | 0,54  | 0,52   | 0,50    | 0,48    |
| DL-Metionina, 99%                                 | 0,35  | 0,35   | 0,31    | 0,26    |
| L-Lisina HCL, 99%                                 | 0,15  | 0,14   | 0,16    | 0,20    |
| L-Treonina, 98,5%                                 | 0,06  | 0,06   | 0,07    | 0,06    |
| Cloreto de colina, 60%                            | 0,05  | 0,05   | 0,05    | 0,03    |
| Salinomicina, 12%                                 | 0,03  | 0,03   | 0,03    | 0,03    |
| Suplemento vitamínico <sup>1</sup>                | 0,10  | 0,10   | 0,10    | 0,10    |
| Suplemento mineral <sup>2</sup>                   | 0,10  | 0,10   | 0,10    | 0,10    |
| Total   | 100,00  | 100,00 | 100,00  | 100,00  |
| <b>Composição nutricional calculada*</b>          |   |        |         |         |
| Energia Metabolizável (EM kcal kg <sup>-1</sup> ) | 3000  | 3050   | 3100    | 3150    |
| Proteína Bruta (%)                                | 24,65   | 23,96  | 22,58   | 19,39   |
| Lisina digestível (%)                             | 1,36  | 1,31   | 1,24    | 1,07    |
| Metionina + Cistina digestível (%)                | 0,99  | 0,98   | 0,91    | 0,79    |
| Fósforo disponível (%)                            | 0,48  | 0,43   | 0,38    | 0,31    |
| Cálcio (%)  | 1,01  | 0,91   | 0,82    | 0,66    |
| Sódio (%)   | 0,23  | 0,22   | 0,21    | 0,20    |

<sup>1</sup>Níveis por kg de suplemento: ácido fólico 902,5 mg; ácido pantotênico 12,0 g; biotina 77,0 mg; niacina 40,0 g; selênio 349,6 mg; vitamina An 8.800.000,0 UI; vitamina B1 2.499,0 mg; vitamina B12 16.200,0 mcg; vitamina B2 5.704,0 mg; vitamina B6 3.998,4 mg; vitamina D3 3.000.000,0 UI; vitamina E 30.000,0 UI; vitamina K3 2198,1 mg. <sup>2</sup>Níveis por kg de suplemento: cobre 7.000,0 mg; ferro 50,0g; iodo 1500,0 mg; manganês 67,5 g; zinco 45,6g.

\*Composição calculada de acordo com Rostagno *et al.* (2017).

Fonte: Autor (2024).

### 2.1.3 Procedimentos experimentais

Para os ensaios de metabolismo I e II, foi adotado o método tradicional de coleta total de excretas (Sibbald; Slinger, 1963).

As aves tiveram acesso livre às rações experimentais e a água, por um período de dez dias, sendo sete de adaptação às gaiolas metabólicas e à alimentação (período pré-experimental) e três dias de coleta total de excretas (período experimental) (Rodrigues *et al.*, 2005).

As rações foram mantidas em baldes identificados com cada parcela. Vinte e quatro horas antes do início do período da coleta de excretas, os comedouros foram esvaziados e os baldes tiveram a quantidade de ração pesada e padronizada. Durante o período experimental, os comedouros foram verificados e completados com a ração experimental três vezes ao dia, para evitar desperdício.

Nos períodos I (21 a 23 dias de idade) e II (40 a 42 dias de idade) de coleta das excretas, as bandejas foram previamente revestidas com plástico resistente sob o piso de cada gaiola, a fim de se evitar perdas de excretas. A coleta foi realizada uma vez ao dia, iniciando sempre às oito horas da manhã. Ao final dos períodos de coletas I e II, os comedouros foram novamente esvaziados e as sobras (comedouro e balde) foram pesadas para a determinação do consumo de ração (g) durante os períodos.

Das excretas, foi retirado todo material estranho (penas e partículas de rações) antes de serem acondicionadas em sacos plásticos previamente identificados e armazenadas em *freezer*, à temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$ , até o final do período dos ensaios I e II, quando foram descongeladas, pesadas e homogeneizadas. Em seguida, foram retiradas alíquotas de 400 gramas que foram submetidas a uma pré-secagem em estufa de ventilação forçada ( $55^{\circ}\text{C}$ ) durante 72 horas. Posteriormente, foram novamente pesadas para a determinação da matéria seca a  $105^{\circ}\text{C}$  e moídas em moinho “tipo faca”, com peneira de dois milímetros e, então, encaminhadas às análises laboratoriais.

#### **2.1.4 Parâmetros avaliados e análises laboratoriais**

Nas amostras de excretas (ensaios de metabolismo I e II) e das rações referências, foram realizadas análises químicas para a determinação dos teores de matéria seca (MS), energia bruta (EB) e nitrogênio (N), sendo a EB determinada em bomba calorimétrica IKA<sup>®</sup> modelo C-200 e a quantificação de nitrogênio obtida por combustão/TCD, método Ba 4e-93 da AOCS (1998) no equipamento Leco modelo FP 828. As análises de MS foram realizadas conforme descritas por Silva e Queiroz (2002).

Para os alimentos-testes, determinaram-se os valores de MS, EB, N, proteína bruta (PB), extrato etéreo (EE), fibra bruta (FB), fibra em detergente neutro (FDN) e ácido (FDA) e matéria mineral (MM), conforme técnicas descritas pelo INCT-Ciência Animal (Detmann *et al.*, 2021).

Todos os procedimentos foram conduzidos no Laboratório Multiusuário de Pesquisa Animal da FZMV/UFLA.

Amostras de milho e farelo de soja, também, foram encaminhadas ao laboratório de bromatologia para a determinação do teor de amido nos lotes de milho e para a realização das análises de atividade ureática e solubilidade da proteína em hidróxido de potássio (KOH) para os lotes de farelo de soja. Já para as farinhas de carne e ossos, realizaram-se testes de peróxidos, rancidez, índice de acidez, teste de éber, digestibilidade da proteína em pepsina a 0,002% e contaminação bacteriana (pesquisa de *Salmonella* e contagem de *Clostridium perfringens*) para determinar a qualidade das farinhas e, também, determinou-se os valores de cálcio (Ca) e fósforo (P). Todas as análises foram realizadas conforme descrito no Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal (2017).

Uma vez obtidos os resultados de MS, N e EB dos alimentos, rações referências e excretas, foram calculados os valores de energia metabolizável aparente (EMA, kcal kg<sup>-1</sup>) e corrigidos para a retenção de nitrogênio (EMAn, kcal kg<sup>-1</sup>), conforme as equações propostas por Matterson, Potter e Stutz (1965):

$$\text{EMA da RR ou RT} = \frac{\text{EB}_{\text{INGERIDA}} - \text{EB}_{\text{EXCRETADA}}}{\text{MS}_{\text{INGERIDA}}}$$

$$\text{EMA do alimento} = \text{EMA da RR} + \frac{\text{EMA da RT} - \text{EMA da RR}}{\text{g alimento/g ração}}$$

$$\text{EMAn da RT ou RR} = \frac{\text{EB}_{\text{INGERIDA}} - (\text{EB}_{\text{EXCRETADA}} + 8,22 \times \text{BN})}{\text{MS}_{\text{INGERIDA}}}$$

$$\text{EMAn do alimento} = \text{EMAn da RR} + \frac{\text{EMAn da RT} - \text{EMAn da RR}}{\text{g alimento/g ração}}$$

em que:

RR - ração referência; RT - ração teste; EB - energia bruta; MS - matéria seca e BN - balanço de nitrogênio ( $N_{\text{ingerido}} - N_{\text{excretado}}$ ).

Para o cálculo dos coeficientes de metabolizabilidade da energia bruta (CMEB) e da matéria seca (CMMS), fez-se uso das fórmulas descritas por Sakomura e Rostagno (2007).

$$\text{CMEB do alimento} = \frac{\text{EMAn alimento}}{\text{EB alimento}} \times 100$$

$$\text{CMMS do alimento} = \text{CMMS da RR} + \frac{\text{CMMS da RT} - \text{CMMS da RR}}{\% \text{ de inclusão do alimento}}$$

Os valores de EMA, EMAn e dos coeficientes de metabolizabilidade da matéria seca e da energia bruta foram submetidos à análise de variância após teste de normalidade (Shapiro – Wilk), comparados entre os lotes dos alimentos testados pelo intervalo de confiança a 95%. Diferenças foram consideradas significativas quando  $p < 0,05$ . As diferenças entre as médias dos tratamentos foram avaliadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o *Software R* (R CORE TEAM, 2024).

## 2.2 Métodos indiretos selecionados para a predição da EMAn dos alimentos de origem vegetal e animal para frangos de corte

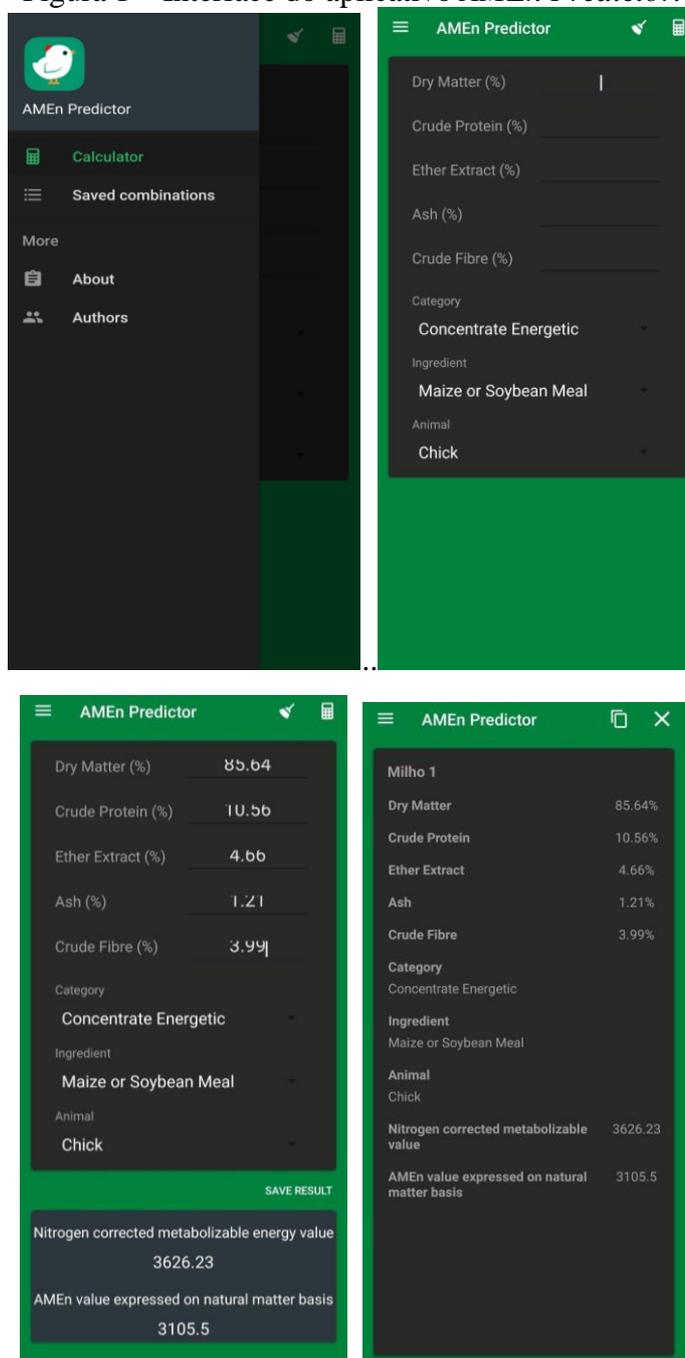
Os valores de composição química dos alimentos-testes determinados em laboratório foram utilizados para estimar os valores de EMAn através dos seguintes métodos indiretos: a) aplicativo *Android* denominado *AMEn Predictor* (<https://apkpure.com/br/amen-predictor/com.amenpredictor>), que utiliza uma rede neural artificial (RNA); b) modelo de RNA proposto por Mariano *et al.* (2013, 2020b) atualizado e; c) equações de regressão linear múltipla (RLM) propostos por Nascimento *et al.* (2011a, 2011b) e Mariano *et al.* (2012) atualizados. As equações e modelos de predição de EMAn selecionados foram descritos a seguir:

### (a) Aplicativo AMEn Predictor

Mariano *et al.* (2013, 2016, 2020b) desenvolveram um aplicativo denominado *AMEn Predictor* (Figura 1) que utiliza uma metodologia baseada em rede neural artificial (RNA) para estimar a EMAn de alimentos concentrados de origem vegetal, utilizando principalmente a composição química do alimento, que é obtida em laboratórios bromatológicos. A RNA foi desenvolvida usando um banco de dados coletado por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b). Esse banco de dados compila informações contendo valores de composição química (PB, EE, MM, FB, FDN e FDA) e valores energéticos de alimentos concentrados energéticos e proteicos

de origem vegetal, provenientes de estudos conduzidos no Brasil com frangos de corte e galos, no período de 1967 a 2007.

Figura 1 – Interface do aplicativo *AMEn Predictor*.



Fonte: Apkpure (2024).

O aplicativo *AMEn Predictor* (Mariano *et al.*, 2016) é baseado em uma rede neural artificial do tipo *Multilayer Perceptron Network* (MLP) 7-5-3-1. O modelo implementado utilizou os seguintes parâmetros de entrada: categoria do alimento (CAT - Alimento concentrado energético ou alimento concentrado proteico), tipo do ingrediente (ING - milho, soja, coprodutos de milho ou soja e outros alimentos), tipo do animal utilizado no bioensaio (ANIMAL - pintos ou galos) e composição química (PB, EE, MM e FB).

Os dados de composição química dos alimentos selecionados nos experimentos I e II deste estudo foram inseridos no aplicativo *AMEn Predictor*, sendo selecionadas as opções conforme a classificação do alimento (concentrado proteico ou concentrado energético), tipo de ingrediente (milho ou coproduto do milho; soja ou coproduto da soja; outros alimentos) e empregou-se a categoria animal “pintos”. Assim, obteve-se os valores preditos de EMAn pelo aplicativo de todos os alimentos avaliados.

#### b) Modelo de RNA atualizado

Em virtude da aplicabilidade do *AMEn Predictor* na área de produção e nutrição avícola, viu-se a necessidade de atualizar o banco de dados proposto por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b) e, em seguida, atualizar o modelo de RNA que compõe o aplicativo proposto por Mariano *et al.* (2013, 2016, 2020b).

Diante disso, o banco de dados foi atualizado com dados contendo valores de composição química (PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, Ca e P) e de EMAn de alimentos concentrados de origem vegetal e animal comumente utilizados na formulação de dietas para frangos de corte. Os dados foram provenientes da literatura nacional e internacional obtidos de experimentos conduzidos com frangos de corte e galos, no período de 1982 a 2023.

A partir do novo banco de dados, utilizando o princípio da meta-análise para sumarizar os resultados independentes obtidos nos estudos, atualizou-se o modelo de RNA que compõe o aplicativo e obteve-se o modelo MLP 10-5-3-1 cujas variáveis de entrada são: PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, categoria, ingrediente, animal e idade. Ressalta-se que no MLP 7-5-3-1, implementado na primeira versão do aplicativo, as variáveis de FDN, FDA e idade (definida por semanas de vidas) dos animais não faziam parte do modelo.

Assim, para verificar a acurácia de predição, os valores preditos de EMAn foram obtidos para cada um dos alimentos selecionados neste estudo. Para isso, foram utilizados como dados de entrada na RNA as informações conforme a classificação da categoria do alimento (CAT: 1 - concentrado energético; 2 - concentrado proteico), tipo do ingrediente (ING: 1 – milho ou farelo de soja; 2 - subprodutos de milho ou farelo de soja; 3 – outros alimentos), tipo do animal

utilizado no bioensaio (ANIMAL: 1 – pintos; 2 - galos), idade do animal (IDADE: 1 – 1ª e 2ª sem; 2 – 3ª e 4ª sem; 3 – 5ª e 6ª sem; 4 – indefinida) e os valores de composição química dos alimentos, obtidos nos ensaios I e II. No entanto, seguindo as especificações dos animais utilizados nos ensaios metabólicos, para a variável ANIMAL inseriu-se sempre a opção “1 – pintos” e, para IDADE dos animais, as opções “2 – 3ª e 4ª sem” e “3 – 5ª e 6ª sem”, para todos os alimentos testados.

c) Equações de regressão linear múltipla atualizadas

Com a atualização do banco de dados proposto por Nascimento *et al.* (2009, 2011a, 2011b), houve a necessidade de atualizar também as equações de RLM obtidas por esse autor e as que foram determinadas por Mariano *et al.* (2012) para a predição da EMAn de alimentos concentrados energéticos e proteicos de origem vegetal. Além disso, devido à importância econômica e nutricional dos alimentos concentrados proteicos de origem animal na nutrição de frangos de corte (Oliveira *et al.*, 2018) gerou-se equações de RLM para esses alimentos a partir do novo banco de dados. Assim, obteve-se as seguintes equações atualizadas:

- Para alimentos concentrados em geral de origem vegetal:

$$EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,6941EE - 209,4305MM - 57,9841FB - 8,1633FDN;$$

- Para alimentos energéticos de origem vegetal:

$$EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN;$$

- Para alimentos proteicos de origem vegetal:

$$EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA$$

e;

- Para alimentos proteicos de origem animal:

$$EMAn = 3137,5850 + 58,5863EE - 46,8114MM - 2,5727Ca; EMAn = 3156,0445 + 58,1022EE - 44,7134MM - 19,1335P$$

$$EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P,$$

Para obter os valores estimados da EMAn dos alimentos testados, aplicou-se os valores de composição química determinados neste estudo.

### 2.3 Validação das equações e aplicativo *AMEn Predictor*

Os valores de EMAn previstos com o aplicativo *AMEn Predictor*, pelo modelo de RNA e pelas equações de RLM foram comparados com aqueles determinados nos ensaios metabólicos I e II com frangos de corte em duas faixas etárias. Assim, o procedimento de validação das equações avaliadas foi realizado ajustando um modelo de regressão linear simples dos valores observados (variável dependente) sobre os valores preditos (variável independente), conforme descrito por Detmann *et al.* (2005) e realizado por Alvarenga *et al.* (2011, 2015).

Após verificados os pressupostos do modelo de regressão linear simples, as estimativas dos parâmetros de regressão foram testadas sob as hipóteses:

$$\begin{array}{ll} H_0: \beta_0 = 0 & H_0: \beta_1 = 1 \\ H_a: \beta_0 \neq 0 & H_a: \beta_1 \neq 1 \end{array}$$

Em caso de não rejeição de ambas as hipóteses de nulidade, optou-se pela similaridade entre valores preditos e observados. O erro padrão estimado, que mede a variabilidade em torno da linha de regressão, foi calculado com base no conjunto de valores previstos (Neter *et al.*, 1985):

$$S_{est} = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y')^2}{N - 2}}$$

em que  $S_{est}$  = erro padrão da estimativa;  $Y$  = valor previsto;  $Y'$  = valor observado;  $N - 2$  = graus de liberdade do resíduo obtido na análise de variação da regressão.

Para todos os procedimentos estatísticos empregados, adotou-se  $\alpha = 0,05$ . As análises estatísticas foram realizadas, utilizando-se *Software R* (R CORE TEAM, 2024).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Composição química dos alimentos

Os valores de composição química e de energia bruta dos alimentos utilizados nos experimentos I e II estão apresentados na Tabela 2.

De modo geral, os valores da composição química dos alimentos estudados diferiram em alguns aspectos, quando comparados aos valores encontrados nas tabelas de literaturas nacionais (Alvarenga *et al.*, 2011; EMBRAPA, 1991; Rodrigues *et al.*, 2001, 2002; Rostagno *et al.*, 2024; Stefanello *et al.*, 2023) quanto da internacional (Aguirre *et al.*, 2024; CVB, 2018; FEDNA, 2017; NRC, 1994). Todavia, estas diferenças eram esperadas, pois podem ocorrer variações na composição dos alimentos devido a diversos fatores, como condições geográficas, variabilidade genética dos cultivares, condições de plantio, fertilidade do solo, formas de armazenamento e processamento dos grãos (Aguirre *et al.*, 2024; Borges *et al.*, 2003; Stefanello *et al.*, 2023). Essas variações evidenciam a importância e a necessidade de revisões periódicas nos valores de composição dos alimentos.

Tabela 2 - Composição química dos alimentos testados, expressos na matéria seca (MS).

| Alimento                 | Lote | MS <sup>1</sup> * | EB*                   | PB*   | EE*   | MM*   | FB*   | FDA*  | FDN*  | Ca**  | P**  | Amido** | KOH** | Atividade ureática** |
|--------------------------|------|-------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---------|-------|----------------------|
|                          |      | %                 | kcal kg <sup>-1</sup> | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %    | %       | %     | %                    |
| Milho                    | 1    | 85,64             | 4492                  | 10,56 | 4,66  | 1,21  | 3,99  | 4,95  | 22,35 | 0,14  | 0,29 | 70,48   | -     | -                    |
|                          | 2    | 87,08             | 4433                  | 9,89  | 3,75  | 1,01  | 4,75  | 4,05  | 16,97 | 0,11  | 0,24 | 70,30   | -     | -                    |
|                          | 3    | 87,11             | 4479                  | 9,95  | 4,16  | 1,06  | 3,93  | 4,94  | 18,43 | 0,14  | 0,30 | 71,93   | -     | -                    |
| Farelo de soja           | 1    | 87,52             | 4657                  | 54,04 | 1,00  | 5,93  | 4,57  | 8,14  | 19,80 | 0,23  | 0,59 | -       | 95,32 | 0,03                 |
|                          | 2    | 88,48             | 4704                  | 53,91 | 3,44  | 6,13  | 3,51  | 8,86  | 25,99 | 0,27  | 0,64 | -       | 92,92 | 0,01                 |
|                          | 3    | 87,60             | 4743                  | 54,68 | 3,14  | 5,62  | 3,90  | 8,77  | 15,99 | 0,27  | 0,67 | -       | 95,25 | 0,02                 |
| Farelo de trigo          | 1    | 88,79             | 4568                  | 18,02 | 3,63  | 4,61  | 10,16 | 16,05 | 47,54 | 0,16  | 1,05 | -       | -     | -                    |
|                          | 2    | 87,42             | 4191                  | 18,30 | 2,77  | 4,71  | 10,46 | 14,01 | 42,30 | 0,17  | 1,02 | -       | -     | -                    |
|                          | 3    | 88,40             | 4544                  | 19,34 | 4,64  | 4,33  | 10,06 | 17,41 | 52,53 | 0,17  | 1,07 | -       | -     | -                    |
| Farinha de carne e ossos | 1    | 94,37             | 3553                  | 50,76 | 10,12 | 37,05 | 0,69  | -     | -     | 13,30 | 6,12 | -       | -     | -                    |
|                          | 2    | 95,69             | 3375                  | 50,68 | 8,82  | 37,42 | 0,70  | -     | -     | 13,82 | 6,50 | -       | -     | -                    |
|                          | 3    | 94,19             | 3917                  | 52,34 | 13,44 | 29,76 | 0,58  | -     | -     | 12,16 | 6,39 | -       | -     | -                    |
|                          | 4    | 94,18             | 3794                  | 51,50 | 11,37 | 33,30 | 0,67  | -     | -     | 14,04 | 6,75 | -       | -     | -                    |
|                          | 5    | 94,15             | 3928                  | 52,47 | 12,33 | 32,51 | 0,63  | -     | -     | 13,53 | 6,72 | -       | -     | -                    |
|                          | 6    | 93,30             | 4386                  | 53,70 | 14,56 | 28,44 | 0,73  | -     | -     | 12,98 | 6,59 | -       | -     | -                    |

<sup>1</sup>MS = Matéria Seca; EB = Energia Bruta; EE = Extrato Etéreo; PB = Proteína Bruta; MM = Matéria Mineral; FB = Fibra Bruta; FDA = Fibra em Detergente Ácido; FDN = Fibra em Detergente Neutro; Ca = Cálcio; P = Fósforo; KOH = Solubilidade da proteína em hidróxido de potássio.

\* Análises realizadas no Laboratório de Pesquisa Animal do DZO/FZMV - UFLA, de acordo com INCT – CA (2021).

\*\* Análises segundo o Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal (2017).

Fonte: Autor (2024).

Os valores de MS dos alimentos variaram de 85,64 a 95,69%. Alimentos utilizados na alimentação animal devem apresentar, no mínimo, 86% de MS (MAPA, 2011), assim todos os lotes de milho estão dentro do que é considerado adequado quanto à umidade para compor as rações. De acordo com Galliard (1986) e Vanier (2017), para que não haja deterioração dos lipídeos, carboidratos e proteínas presentes nos grãos de cereais e leguminosas durante o período de armazenamento, o teor máximo de umidade deve ser de 14%. Caso contrário, o alimento deve ser utilizado imediatamente ou seco adequadamente (Silva *et al.*, 2009).

Os valores de EE e MM dos milhos 2 e 3 foram inferiores aos descritos nas Tabelas Brasileiras (Rostagno *et al.*, 2024). Os valores de PB, FB, FDA e FDN foram superiores para ambos os milhos quando comparados aos valores tabelados (Rostagno *et al.*, 2024), podendo observar variações mais proeminentes no milho do lote 1 cujos valores de PB, FDA e FDN foram superiores em 27,56%, 27,88% e 30,43%, respectivamente.

A porcentagem de amido na composição dos milhos 1, 2 e 3 foi de 70,30, 70,48 e 71,93%, respectivamente, estando acima dos valores encontrados por Oliveira (2019) de 63,34, 63,43 e 64,00% aos estudar três diferentes lotes de milho e dos valores observados por Stefanello *et al.* (2023) em duas regiões do Brasil, sendo de 64,70% para o milho de origem Norte e de 59,30% para o milho de origem Sul. No entanto, os valores de amido deste estudo (Tabela 2) se assemelham aos das Tabelas Brasileiras (Rostagno *et al.*, 2024) que variou de 69,88 a 71,56%. O amido é a principal forma de reserva energética nos vegetais, sendo uma fonte dietética de energia para as aves e está relacionado à digestibilidade e ao valor energético dos alimentos (Herwig *et al.*, 2019).

De acordo com Stefanello *et al.* (2023), os nutrientes e o conteúdo energético do milho podem não ser completamente digeridos no intestino delgado dos frangos de corte, uma vez que o amido resistente pode representar de 2 a 6% do amido total. Por isso, é importante a avaliação contínua do teor de amido nos diferentes lotes de milhos usados nas dietas para frangos de corte, pois quanto maior for a variação nos teores de amido total, maior é a probabilidade de aumento na fração do amido resistente, o qual é potencialmente antagônico à utilização de nutrientes e energia pelo animal (Singh; Kim, 2021; Svihus, 2014).

Quanto ao farelo de soja, a MS e a PB foram semelhantes aos apresentados por Rostagno *et al.* (2024). Os farelos de soja 2 e 3 tiveram teores de EE, MM e FB diferentes ao das Tabelas Brasileiras (Rostagno *et al.*, 2024) bem como, a FDA e a FDN dos farelos de soja 1, 2 e 3. Os teores de PB dos farelos de soja apresentados na Tabela 2 foram superiores aos teores de PB encontrados por Aguirre *et al.* (2024) que obtiveram 49,90, 46,00 e 45,90% de PB para os farelos de soja oriundos do Brasil, da Argentina e dos Estados Unidos da América (EUA),

respectivamente. Em outra pesquisa, Aguirre *et al.* (2022) afirmou que os farelos de soja oriundos do Brasil sempre possuem maiores teores de PB quando comparado aos de outros países como os EUA, pois sabe-se que fatores como o tipo de semente, solo, latitude e práticas agrícolas afetam o teor de nitrogênio e, conseqüentemente, a PB do alimento.

Os valores de solubilidade da proteína em hidróxido de potássio (KOH) indicam se os grãos de soja foram submetidos a um processamento térmico deficiente ou excessivo, sendo que o farelo de soja com tratamento adequado deve apresentar solubilidade entre 80 a 90%, (Araba; Dale, 1990a, 1990b; Bellaver; Snizek Júnior, 1999; Butolo, 2010; EMBRAPA, 2022). Com isso, nota-se que as amostras de farelo de soja 1 (95,32%), 2 (92,92%) e 3 (95,25%) ficaram acima do preconizado como ideal. Dessa forma, com base nestes resultados, possivelmente, houve um subprocessamento dos lotes de farelo de soja, segundo esses autores.

O teste de atividade ureática é considerado eficiente para indicar a desnaturação dos fatores antinutricionais (FANs) da soja (Butolo, 2010). Assim, é possível notar que os três lotes de farelo de soja (Tabela 2) ficaram dentro do limite inferior dos padrões referidos na literatura (0,01 a 0,20 unidades de pH, citado por Lima *et al.*, 2011), demonstrando que houve a inativação dos inibidores de tripsina, obtendo-se um produto de boa qualidade nutricional (Butolo, 2010).

Nos lotes de farelo de trigo, os valores de EE variaram de 2,77 a 4,64%, com média de 3,68%. Esse valor foi inferior ao descrito por Rostagno *et al.* (2024) nas Tabelas Brasileiras, em que os autores atribuem a média de 3,84% de EE para o farelo de trigo. Em contrapartida, os teores de EE dos farelos de trigo 1 e 3 (Tabela 2) foram superiores ao encontrado na pesquisa de Troni *et al.* (2016) que observou um teor de EE de 3,14% para esse alimento. Segundo Silva *et al.* (2014), o EE é o componente que mais contribui para o aumento dos valores energéticos, pois a oxidação de 1g de gordura gera cerca de 9,4 kcal de EB, enquanto 1g de proteína é capaz de gerar 5,6 kcal de EB e 1g de carboidratos 4,15 kcal de energia.

Ao analisar os lotes de farelo de trigo, observou-se que os valores de FDA e FDN dos farelos de trigo 1 e 3 (Tabela 2) foram superiores aos encontrados por Rostagno *et al.* (2017) de 14,80% para FDA e de 44,97% para FDN e por Troni *et al.* (2016) de 12,31% para FDA e 44,37% para FDN. Ressalta-se que a fibra alimentar presente no farelo de trigo, tanto em formas solúveis quanto insolúveis, pode exercer efeitos antinutricionais em frangos de corte ao reduzir o aproveitamento energético da ração e a digestibilidade de outros nutrientes por alterar a viscosidade da digesta, ocasionando a queda de desempenho dos animais em crescimento (Singh; Kim, 2021).

O teor de umidade das farinhas de carne e ossos (FCO) avaliadas está abaixo de 8%, conforme recomendado por Butolo (2002). Segundo o autor, as farinhas de origem animal com umidade acima de 8% estão mais propensas à decomposição, aumento da população microbiana e acidificação, no entanto, a umidade abaixo desse nível está geralmente associada ao processamento inadequado do produto.

Considerando a classificação descrita nas Tabelas Brasileiras (Rostagno *et al.*, 2024), as FCO utilizadas neste trabalho podem ser classificadas no grupo de 52% de PB (níveis entre 50,01 e 55%). Comparando a composição química e o valor de energia bruta com os dados apresentados nas Tabelas Brasileiras (Rostagno *et al.*, 2024) observa-se variação em alguns componentes. O valor médio de EE neste trabalho foi 10,36% menor que o valor tabelado por Rostagno *et al.* (2024), enquanto a EB foi 11,02% menor. Entretanto, o valor médio de Ca determinado nas FCOs utilizadas neste trabalho foi de 13,30%, enquanto nas tabelas (Rostagno *et al.*, 2024) o valor é de 10,44%. Já o valor médio de P foi de 6,51%, enquanto nas tabelas editadas por Rostagno *et al.* (2024), o valor foi de 5,15%.

Todas as FCOs atenderam as exigências da Divisão de Fiscalização de Alimentos para Animais (Difisa, 1989), com teores de fósforo acima de 3,80%, independente do teor de proteína. A relação cálcio:fósforo máxima permitida é de 2,2:1 (Difisa, 1989) e todas as amostras atenderam a essa exigência, onde a relação média ficou de 2,04:1, resultado semelhante foi encontrado por Sartorelli *et al.* (2003) de 1,92:1.

Na literatura encontram-se trabalhos (Silva *et al.*, 2012; Troni *et al.*, 2016) referentes ao uso de FCOs com teor de PB próximos às farinhas utilizadas nesse experimento. Segundo Cao e Adeola (2016), os teores de EB, PB, MM, EE e Ca são muito variáveis devido à proporção de matéria-prima (carne e ossos) utilizada para a obtenção da farinha, em virtude da falta de padronização no processamento. Portanto, deve-se ter cuidado ao utilizar esse tipo de alimento nas formulações de dietas para as aves.

A farinha de carne e ossos é uma importante fonte de proteína, cálcio e fósforo na alimentação de frangos de corte (Oliveira *et al.*, 2018; Troni *et al.*, 2016). Sendo assim, para determinar se o produto pode ser usado na alimentação animal é necessário realizar análises de monitoramento e verificar os parâmetros de qualidade das farinhas, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de qualidade das farinhas de carne e ossos testadas\*.

| Alimento                        | Lote | Teste de Éber <sup>1*</sup> | Índice de Peróxidos (Meq peróxido kg <sup>-1</sup> ) | Teste de Rancidez - Reação de kreiss | Índice de acidez (mgKOH g <sup>-1</sup> MS) | Digestibilidade da proteína em pepsina a 0,002% (%MS) | <i>Salmonella</i> | <i>Clostridium perfringens</i> (UFC g <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|------|-----------------------------|--|--------------------------------------|---|---|-------------------|---|
| <b>Farinha de carne e ossos</b> | 1    | Negativo                    | 0,05   | Negativo                             | 1,52  | 78,63   | Ausente           | 10  |
|                                 | 2    | Negativo                    | 0,05   | Negativo                             | 1,66  | 77,69   | Ausente           | <10 <sup>1</sup>                                      |
|                                 | 3    | Negativo                    | 0,10   | Negativo                             | 1,44  | 78,36   | Ausente           | 10  |
|                                 | 4    | Negativo                    | 0,15   | Negativo                             | 0,89  | 79,44   | Ausente           | 12  |
|                                 | 5    | Negativo                    | 0,12   | Negativo                             | 1,15  | 80,02   | Ausente           | 15  |
|                                 | 6    | Negativo                    | 0,12   | Negativo                             | 1,00  | 79,33   | Ausente           | 10  |

<sup>1</sup>Padrão: Teste de Éber = Negativo; Índice de Peróxidos = máximo 10 Meq; Teste de Rancidez = negativo ou positivo; Índice de Acidez = máximo 4 mg; Digestibilidade da proteína em pepsina 0,002 % = Mínimo 30%; *Salmonella* = ausente em 25 g; *Clostridium perfringens* = -.

\*Análises segundo o Compêndio Brasileiro de Alimentação Animal (2017).

Fonte: Autor (2024).

Com relação aos parâmetros de qualidade das FCOs, observa-se que todos os requisitos foram atendidos (Tabela 3). Silva *et al.* (2011) relatam que a ausência de padrão industrial, a possibilidade de recontaminação com *Salmonella* após a esterilização do produto e a variabilidade físico-química de sua composição, podem, alterar o aproveitamento energético, o que limita a sua utilização em dietas para frangos de corte. Por isso, dados referentes à qualidade microbiológica das farinhas de origem animal após o processamento industrial são necessários e devem ser observados em conjunto com os valores energéticos, de aminoácidos digestíveis e de acordo com a produtividade das aves (Silva *et al.*, 2020).

Diante do exposto, fica evidente que as variações de composição e do conteúdo de energia disponível nos alimentos de origem vegetal e animal são inevitáveis. Assim, torna-se imprescindível avaliar e atualizar periodicamente a composição química dos lotes comerciais dos alimentos antes de incorporá-los na formulação das rações destinadas aos frangos de corte (Rezaei *et al.*, 2020), no intuito de melhorar o aproveitamento de nutrientes, otimizar o custo da ração e promover o êxito da atividade avícola.

### **3.2 Valores energéticos determinados com pintos nas fases de crescimento e final**

Na Tabela 4 estão descritos os valores de EMA e de EMAn dos alimentos proteicos e energéticos determinados com pintos em crescimento e final de criação por meio da coleta total de excretas e seus respectivos erros padrões da média (SEM). Ao observar os valores de EMA e EMAn, nota-se que não houve variações significativas entre os lotes de milho, farelo de soja e farelo de trigo ( $p > 0,05$ ), apenas nos lotes das farinhas de carne e ossos foram encontradas diferenças significativas ( $p < 0,001$ ), o que provavelmente se deve às variações encontradas na composição química.

Tabela 4 - Valores médios de energia metabolizável aparente (EMA, kcal kg<sup>-1</sup>) e aparente corrigida para nitrogênio retido (EMAn, kcal kg<sup>-1</sup>) dos alimentos energéticos e proteicos, determinados com frangos de corte em crescimento (Ensaio I - 21 a 23 dias de idade) e final (Ensaio II- 40 a 42 dias de idade), e seus respectivos erros padrões das médias (SEM). Valores expressos em matéria seca (MS).

| Alimento                 | Lote | Ensaio I (n = 400) |     |             |     | Ensaio II (n = 240) |     |             |     |
|--------------------------|------|--------------------|-----|-------------|-----|---------------------|-----|-------------|-----|
|                          |      | EMA                | SEM | EMAn        | SEM | EMA                 | SEM | EMAn        | SEM |
| Milho                    | 1    | 3427               | 42  | 3423        | 43  | 3522                | 66  | 3365        | 59  |
|                          | 2    | 3423               | 64  | 3423        | 59  | 3449                | 109 | 3364        | 99  |
|                          | 3    | 3401               | 62  | 3332        | 59  | 3700                | 73  | 3583        | 65  |
| <b>Média</b>             |      | <b>3417</b>        |     | <b>3392</b> |     | <b>3557</b>         |     | <b>3437</b> |     |
| p-valor                  |      | 0,9395             |     | 0,4136      |     | 0,1408              |     | 0,1048      |     |
| Farelo de soja           | 1    | 2613               | 103 | 2494        | 103 | 2802                | 80  | 2536        | 69  |
|                          | 2    | 2477               | 105 | 2428        | 77  | 2603                | 94  | 2369        | 74  |
|                          | 3    | 2500               | 168 | 2444        | 134 | 2607                | 149 | 2380        | 130 |
| <b>Média</b>             |      | <b>2530</b>        |     | <b>2455</b> |     | <b>2671</b>         |     | <b>2428</b> |     |
| p-valor                  |      | 0,7313             |     | 0,9035      |     | 0,3848              |     | 0,4118      |     |
| Farelo de trigo          | 1    | 1831               | 108 | 1750        | 99  | 2101                | 77  | 1994        | 67  |
|                          | 2    | 1847               | 120 | 1762        | 115 | 2159                | 124 | 2024        | 112 |
|                          | 3    | 2003               | 89  | 1902        | 94  | 2268                | 116 | 2110        | 105 |
| <b>Média</b>             |      | <b>1894</b>        |     | <b>1805</b> |     | <b>2176</b>         |     | <b>2043</b> |     |
| p-valor                  |      | 0,4753             |     | 0,5257      |     | 0,5545              |     | 0,6878      |     |
| Farinha de carne e ossos | 1    | 2625 c*            | 133 | 2361 c      | 131 | 2914 b              | 68  | 2642 b      | 53  |
|                          | 2    | 2459 c             | 75  | 2185 c      | 49  | 2779 b              | 127 | 2319 c      | 104 |
|                          | 3    | 3118 b             | 159 | 2799 b      | 102 | 2951 b              | 71  | 2608 b      | 71  |
|                          | 4    | 3545 b             | 118 | 3066 b      | 85  | 2770 b              | 53  | 2407 c      | 52  |
|                          | 5    | 3289 b             | 174 | 2901 b      | 117 | 2957 b              | 94  | 2555 b      | 88  |
|                          | 6    | 4190 a             | 135 | 3858 a      | 105 | 4204 a              | 119 | 3788 a      | 105 |
| <b>Média</b>             |      | <b>3204</b>        |     | <b>2862</b> |     | <b>3096</b>         |     | <b>2720</b> |     |
| p-valor                  |      | <0,001             |     | <0,001      |     | <0,001              |     | <0,001      |     |

\*a, b, c Médias seguidas por diferentes letras na coluna diferem pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

Fonte: Autor (2024).

A diferença observada entre os valores de EMA e EMAn é normal, haja visto que os valores de energia metabolizável foram determinados com aves em crescimento no Ensaio I e aves na fase final de criação no Ensaio II. Segundo Sakomura e Rostagno (2007), as aves podem ter a mesma metabolizabilidade dos alimentos, mas com diferentes graus de retenção nitrogenada possuirão diferentes valores de energia excretada. Ainda, de acordo com Wolynetz e Sibbald (1984), em condições de consumo à vontade, os valores de EMA são superiores aos de EMAn, quando o balanço de nitrogênio é positivo. Como, neste estudo, as aves consumiram ração à vontade, o valor de nitrogênio retido foi maior do que o excretado, por isso, a EMA

superou os valores de EMAn. Além disso, é necessário corrigir os valores determinados de energia pelo balanço de nitrogênio devido à dificuldade de assegurar que todas as aves apresentem a mesma taxa de crescimento e/ou retenção de nitrogênio durante um ensaio metabólico (Abdollahi *et al.*, 2021; Lopez; Leeson, 2007).

Com relação à EMAn, observa-se que os valores médios encontrados no ensaio I são inferiores aos do ensaio II para milho e farelo de trigo, sendo observada uma redução de 1,33% e 1,10%, respectivamente, indicando que no ensaio II as aves aproveitaram melhor o conteúdo energético desses alimentos devido ao avançar da idade. Khalil *et al.* (2021), trabalhando com trigo, sorgo, cevada e milho, investigaram a influência da idade dos frangos de corte nos valores de EMA e EMAn, e observaram que a idade, independentemente do alimento, tem impacto substancial nos valores de EMA e EMAn, sendo superiores nas idades acima de 21 dias, quando seu sistema digestório já está desenvolvido.

As amostras de farelo de soja utilizadas no ensaio I com frangos de corte em crescimento (21 a 23 dias de idade) apresentaram, em média, 2455 kcal de EMAn  $\text{kg}^{-1}$  de MS, resultado semelhante ao encontrado por Rodrigues *et al.* (2002) que foi de 2404 kcal de EMAn  $\text{kg}^{-1}$  de MS e por Oliveira (2019), de 2464 kcal  $\text{kg}^{-1}$ , para a fase de crescimento.

No ensaio II com frangos de corte na fase final de criação (40 a 42 dias de idade), as amostras de farelo de soja apresentaram, em média, 2428 kcal de EMAn  $\text{kg}^{-1}$  de MS, valor abaixo do encontrado por Zonta *et al.* (2006) que foi de 2581 kcal  $\text{kg}^{-1}$  e por Bertechini *et al.* (2019) de 2751 kcal  $\text{kg}^{-1}$ , para essa fase final de criação. A diferença observada no valor médio da EMAn do farelo de soja, possivelmente se deve às diferenças encontradas na composição química, principalmente, no EE do farelo de soja 1 (Tabela 2).

Ost *et al.* (2005), também observaram diferença no valor médio de EMAn (2412 kcal  $\text{kg}^{-1}$ ) em decorrência do baixo teor de EE (1,19%) encontrado em uma das amostras de farelo de soja testadas, semelhante ao encontrado neste estudo para o farelo de soja 1 (EE = 1,00%). De fato, o teor de EE é um dos componentes que mais contribuem para o aumento dos valores de EMAn (Silva *et al.*, 2014). Outro fator que pode ter contribuído foi o subprocessamento observado nas amostras de farelo de soja demonstrado nos resultados analíticos de solubilidade da proteína em KOH (Tabela 2), isso pode ser um indício de que os fatores antinutricionais ainda estavam presentes nos farelos de soja testados neste estudo. Nesse contexto, os frangos de corte podem deixar de aproveitar em torno de 400 a 450 kcal  $\text{kg}^{-1}$  de energia proveniente da dieta devido à indisponibilidade dos nutrientes na composição (Cowieson; Bedford; Ravindran, 2010).

O valor médio de EMAn obtido para os lotes de farelo de trigo no ensaio I, foi de 1805 kcal kg<sup>-1</sup>, resultado semelhante ao encontrado por Troni *et al.* (2006) que foi de 1788 kcal kg<sup>-1</sup>, porém, superiores aos encontrados por Ning *et al.* (2022) que avaliaram cinco farelos de trigo relatando valor médio de EMAn de 1650 kcal kg<sup>-1</sup>, para a fase de crescimento. Já no ensaio II, o valor médio obtido foi de 2043 kcal de EMAn kg<sup>-1</sup> de MS, valor inferior aos encontrados por Generoso *et al.* (2008) de 2319 kcal kg<sup>-1</sup> e por Silva *et al.* (2020) de 3534 kcal kg<sup>-1</sup>, para a fase final de criação. De acordo com Choct, Annison e Trimble (1992) e Singh e Kim (2021), as pentosanas solúveis do trigo pode depreciar a digestibilidade do amido, da proteína e dos lipídeos nas dietas de aves e, conseqüentemente, afetam a metabolizabilidade desse alimento.

Em relação aos valores energéticos das amostras de farinhas de carne e ossos, houve diferenças significativas ( $p < 0,001$ ) nos valores de EMA e EMAn em ambos os lotes e fases de criação (ensaio I e II) (Tabela 4), sendo justificado pela diferença na composição química (Tabela 2). Em geral, as FCOs possuem composição química muito variável devido à dificuldade dos setores de graxaria de abatedouros em adotarem um padrão contínuo do material produzido, que varia de acordo com tipo de processamento e as proporções de seus constituintes (Albino; Silva, 1996).

A FCO 6 apresentou valores mais elevados de EMA (4190 kcal kg<sup>-1</sup> no ensaio I, e 4204 kcal kg<sup>-1</sup> no ensaio II) e EMAn (3858 kcal kg<sup>-1</sup> no ensaio I, e 3788 kcal kg<sup>-1</sup> no ensaio II), quando comparada às outras farinhas (Tabela 4). Um dos fatores que pode ter contribuído para essa variabilidade seria o teor de EE mais elevado encontrado na FCO 6 em relação às demais (Tabela 2). Segundo Silva *et al.* (2010), as variações observadas no teor de EE dos alimentos de origem animal podem estar relacionadas ao processamento do ingrediente, como é desengordurado e até aos fatores operacionais na fábrica (rampas com água, prensa de rosca ou transporte mecânico). Outro fator poderia estar relacionado ao alto teor de EB (4386 kcal kg<sup>-1</sup>) em decorrência do alto teor de PB (53,70%) e baixo teor de MM (28,44%) encontrado na FCO 6 em relação às demais, pois, de acordo com Oliveira *et al.* (2018), a EMAn desses alimentos está altamente correlacionada com a PB (0,787) e EB (0,836) e negativamente com MM (-0,846), Ca (-0,505) e P (-0,741).

Os maiores valores de MM (Tabela 2) encontrados nas FCOs 1 e 2 podem ter ocasionado os menores valores de EMA e EMAn no ensaio I e de EMAn no ensaio II, pois, uma quantidade maior de MM, junto com os íons de cálcio e de sódio, pode ocasionar a saponificação das gorduras presentes nas farinhas de origem animal e reduzir sua utilização pelas aves (Eyng *et al.*, 2011). Resultados semelhantes foram descritos por Troni *et al.* (2016).

O valor médio de EMAn obtido para as FCOs no ensaio I, foi de 2862 kcal kg<sup>-1</sup>, resultado semelhante ao encontrado por Silva *et al.* (2012) que foi de 2736 kcal kg<sup>-1</sup>, porém, inferiores aos encontrados na maioria dos estudos (Oliveira *et al.*, 2018; Sartorelli *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2020; Troni *et al.*, 2016) em que as farinhas foram classificadas entre 40 e 48 % de PB, diferentemente deste estudo a qual foi classificada com 50% de PB. No ensaio II, o valor médio obtido foi de 2720 kcal de EMAn kg<sup>-1</sup> de MS, valor superior ao encontrado por Nunes *et al.* (2005) de 2496 kcal kg<sup>-1</sup>, em que a FCO foi classificada com 48% de PB.

Diante disso, diversos fatores podem ter afetado os valores de EMA e EMAn neste estudo, mas o conteúdo de PB, EB, EE e MM (Tabela 2), provavelmente são os que mais contribuíram para as variações encontradas nas FCOs estudadas.

### **3.3 Coeficientes de metabolizabilidade de nutrientes**

Os coeficientes de metabolizabilidade da matéria seca (CMMS) e da energia bruta (CMEB) estão descritos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. O CMMS foi significativo para as farinhas de carne e ossos (FCO) do ensaio II ( $p < 0,05$ ), sendo o maior valor encontrado para a FCO 6. Já o CMEB, foi significativo para as FCOs dos ensaios I e II ( $p < 0,001$ ), cujos maiores valores encontrados foram nas FCOs 4 e 6 no ensaio I, e FCO 6 no ensaio II.

Tabela 5 - Valores médios do coeficiente de metabolizabilidade da matéria seca (CMMS, %) dos alimentos para frangos de corte nas fases de crescimento (Ensaio I - 21 a 23 dias de idade) e final (Ensaio II - 40 a 42 dias de idade) de criação, e seus respectivos erros padrões da média (SEM).

| Alimento                 | Lote | Ensaio I |      | Ensaio II |      |
|--------------------------|------|----------|------|-----------|------|
|                          |      | CMMS     | SEM  | CMMS      | SEM  |
| Milho                    | 1    | 77,53    | 1,00 | 81,73     | 1,47 |
|                          | 2    | 78,46    | 1,61 | 81,13     | 2,34 |
|                          | 3    | 76,21    | 1,37 | 86,54     | 1,96 |
| p-valor                  |      | 0,5144   | -    | 0,1416    | -    |
| Farelo de soja           | 1    | 38,72    | 1,91 | 58,91     | 1,60 |
|                          | 2    | 40,52    | 2,96 | 57,82     | 1,74 |
|                          | 3    | 42,94    | 4,63 | 54,51     | 2,68 |
| p-valor                  |      | 0,6806   | -    | 0,3252    | -    |
| Farelo de trigo          | 1    | 38,70    | 2,64 | 47,90     | 2,13 |
|                          | 2    | 44,21    | 2,65 | 48,32     | 2,95 |
|                          | 3    | 44,49    | 2,80 | 53,18     | 2,73 |
| p-valor                  |      | 0,2696   | -    | 0,3210    | -    |
| Farinha de carne e ossos | 1    | 62,26    | 1,73 | 65,74 b*  | 0,79 |
|                          | 2    | 53,60    | 4,04 | 66,97 b   | 2,09 |
|                          | 3    | 61,11    | 6,22 | 67,19 b   | 1,11 |
|                          | 4    | 70,22    | 4,50 | 65,94 b   | 0,91 |
|                          | 5    | 66,19    | 5,90 | 65,07 b   | 1,12 |
|                          | 6    | 67,79    | 2,88 | 73,04 a   | 1,33 |
| p-valor                  |      | 0,1639   | -    | 0,002     | -    |

\*a, b Médias seguidas por diferentes letras na coluna diferem pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 - Valores médios do coeficiente de metabolizabilidade da energia bruta (CMEB, %) dos alimentos para frangos de corte nas fases de crescimento (Ensaio I - 21 a 23 dias de idade) e final (Ensaio II - 40 a 42 dias de idade) de criação, e seus respectivos erros padrões das médias (SEM).

| Alimento                 | Lote | Ensaio I |      | Ensaio II |      |
|--------------------------|------|----------|------|-----------|------|
|                          |      | CMEB     | SEM  | CMEB      | SEM  |
| Milho                    | 1    | 76,20    | 0,95 | 74,92     | 1,31 |
|                          | 2    | 77,22    | 1,34 | 75,89     | 2,22 |
|                          | 3    | 74,38    | 1,31 | 79,99     | 1,45 |
| p-valor                  |      | 0,2803   | -    | 0,1257    | -    |
| Farelo de soja           | 1    | 53,55    | 2,21 | 54,45     | 1,49 |
|                          | 2    | 51,62    | 1,64 | 50,37     | 1,58 |
|                          | 3    | 51,53    | 2,82 | 50,18     | 2,73 |
| p-valor                  |      | 0,7806   | -    | 0,2767    | -    |
| Farelo de trigo          | 1    | 38,31    | 2,17 | 43,66     | 1,46 |
|                          | 2    | 38,86    | 2,53 | 44,64     | 2,47 |
|                          | 3    | 41,87    | 2,07 | 46,43     | 2,30 |
| p-valor                  |      | 0,5083   | -    | 0,6552    | -    |
| Farinha de carne e ossos | 1    | 66,45 b* | 3,68 | 74,36 b   | 1,50 |
|                          | 2    | 64,72 b  | 1,44 | 68,70 c   | 3,08 |
|                          | 3    | 71,47 b  | 2,61 | 66,58 c   | 1,81 |
|                          | 4    | 80,81 a  | 2,24 | 63,44 c   | 1,37 |
|                          | 5    | 73,86 b  | 2,98 | 65,05 c   | 2,23 |
|                          | 6    | 87,97 a  | 2,40 | 86,36 a   | 2,39 |
| p-valor                  |      | <0,001   | -    | <0,001    | -    |

\*a, b, c Médias seguidas por diferentes letras na coluna diferem pelo teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ).  
Fonte: Autor (2024).

Os CMMS foram crescentes com a idade das aves e maiores para os lotes de milho, farelo de soja e farelo de trigo no ensaio II quando comparado ao ensaio I, demonstrando um melhor aproveitamento dos nutrientes em aves adultas (Tabela 5). Em geral, as aves adultas (a partir dos 14 dias de idade) são mais eficientes em metabolizar os nutrientes do que as aves jovens, com diferenças mais pronunciadas para ingredientes de difícil digestão, como materiais ricos em fibras, gorduras saturadas e, especialmente, em ingredientes de ração contendo substâncias antinutritivas, como polissacarídeos não amiláceos (PNAs), devido a mudanças ocorridas nas atividades enzimáticas e na taxa de passagem da digesta pelo trato gastrointestinal que está mais desenvolvido (Khalil *et al.*, 2021).

Em relação às FCOs, apenas no ensaio II houve diferença significativa entre os lotes do alimento ( $p < 0,05$ ) (Tabela 5). O maior valor de CMMS pode ser observado na FCO 6 com 73,04%, resultado semelhante ao encontrado por Oliveira (2016) de 75,46% e superior ao encontrado por Oliveira (2018) de 69,54%. Comparando o CMMS (Tabela 5) e os valores de EMA e EMAn (Tabela 4), nota-se que a FCO 6 foi a que apresentou maior utilização da energia em relação às outras farinhas.

As variações encontradas no CMMS (Tabela 5) dos alimentos podem ser explicadas pelo fato de que os alimentos de diferentes origens sofrem processamentos diferentes, resultando em matérias-primas de diferentes qualidades (Nunes *et al.*, 2005).

Os CMEB do milho, farelo de soja e farelo de trigo foram estatisticamente iguais ( $p > 0,05$ ) (Tabela 6). Entretanto, numericamente, os valores de CMEB obtidos no ensaio II para milho 1 e 2 e farelo de soja 2 e 3 foram menores em relação ao ensaio I. Ao comparar esses resultados aos valores de EMAn do ensaio II (Tabela 4), nota-se que esses alimentos também apresentaram menores valores de EMAn e, conseqüentemente, menor utilização de energia quando comparado ao ensaio I. Essas diferenças possivelmente ocorreram devido a variação na composição química encontrada nesses alimentos (Tabela 2), principalmente, nos valores de PB, FDA e FDN dos milhos 1 e 2, e EE, MM, FB e subprocessamento dos farelos de soja 2 e 3, evidenciando que a composição química pode interferir no aproveitamento energético dos alimentos utilizados nas dietas de frangos de corte (Rezaei *et al.*, 2020).

Com relação às CMEB das FCOs, houve diferenças significativas ( $p < 0,001$ ) entre os lotes dos alimentos nos ensaios I e II (Tabela 6). Desse modo, é possível notar que houve melhor aproveitamento da energia quando se utilizou as FCOs 4 (80,81%) e 6 (87,97%) no ensaio I e a FCO 6 (86,36%) no ensaio II. Esses resultados foram superiores aos descritos na literatura por Oliveira (2018) de 71,23%, Nunes *et al.* (2005) de 67,71% e Silva *et al.* (2012) de 64,00%.

O pior aproveitamento da energia foi verificado nas FCOs 3, 4 e 5 no ensaio II, sendo inferiores aos observados no ensaio I, demonstrando que as aves adultas possivelmente tiveram maior dificuldade em metabolizar a energia contida na dieta. Coincidentemente, nessas amostras de FCOs foram observados valores de Ca e P (Tabela 2) superiores aos descritos nas Tabelas Brasileiras (Rostagno *et al.*, 2024) de 10,00% para Ca e 4,93% para P. Apesar do nível de inclusão da FCO na dieta referência ter sido de 20% como preconizado na literatura (Matterson; Potter; Stutz, 1965; Sakomura; Rostagno, 2007), pode ter ocorrido o desbalanço de nutrientes, possivelmente por causa dos elevados níveis de Ca e P contidos na dieta, o que acarretou excessos de íons cálcio, magnésio, sódio, entre outros, no lúmen intestinal das aves,

resultando em saponificação das gorduras presentes na farinha de carne e ossos, reduzindo a metabolizabilidade da EB pelas aves (Eyng *et al.*, 2011; Nunes *et al.*, 2005).

De acordo com Nunes *et al.* (2005) e Ravindran *et al.* (2005), a variabilidade na metabolizabilidade das farinhas de carne e ossos reflete tanto os danos causados pelo processamento térmico, necessário para a eliminação dos agentes patogênicos, quanto as quantidades relativas de proteína muscular e colágeno presentes nas matérias-primas. A temperatura utilizada no processamento das farinhas de origem animal geralmente é elevada e pode proporcionar reações entre os nutrientes, o que os tornam indigestíveis, ocasionando redução no valor energético dos alimentos (Nunes *et al.*, 2005).

As informações supracitadas neste estudo reafirmam que para aumentar a precisão no processo de formulação da ração para as aves deve-se adotar métodos que viabilizem a obtenção dos valores de EMAn de forma rápida e menos onerosa, quando comparado aos bioensaios. Assim, a aplicação de métodos estatísticos (Alvarenga *et al.*, 2011, 2013, 2015) e técnicas computacionais (Alvarenga *et al.*, 2021; Mariano *et al.*, 2013, 2020a, 2020b) têm-se demonstrado promissoras, pois os valores de EMAn dos alimentos podem ser estabelecidos apenas em função da composição química obtida em laboratório.

Contudo, apesar de muitos estudos publicados na literatura descreverem diferentes métodos indiretos para prever a EMAn de alimentos concentrados de origem vegetal e animal usados em dietas de frangos de corte, ainda não há relatos suficientes que venham comprovar a acurácia de tais métodos. Portanto, faz-se necessário testar a confiabilidade da estimativa desses métodos e compará-los com os valores de EMAn obtidos nos ensaios *in vivo* com frangos de corte (Alvarenga *et al.*, 2011, 2015).

### **3.4 Valores energéticos estimados por métodos indiretos e *in vivo* com frangos de corte em duas idades**

Na Tabela 7 são demonstrados os valores médios de EMAn observados obtidos por meio de ensaio metabólico com frango de corte em duas fases de criação: crescimento (21 a 23 dias de vida) e final (40 a 42 dias de vida) usando a coleta total de excretas, e os valores de EMAn preditos pelo aplicativo *AMEn Predictor*, modelo de RNA (MLP 10-5-3-1) e equações de regressão linear múltipla (RLM) para os alimentos-teste energéticos (milho e farelo de trigo) e proteicos (farelo de soja) de origem vegetal.

Tabela 7 - Energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn, kcal kg<sup>-1</sup>) de alguns alimentos energéticos e proteicos de origem vegetal, obtida por ensaio de metabolismo (ensaio I, n= 400 e ensaio II, n = 240) com frangos de corte em duas faixas etárias, e por métodos indiretos: aplicativo *AMEn Predictor*, rede neural artificial (RNA) e regressão linear múltipla (RLM). Valores expressos na matéria seca (MS).

| Alimento        | Lote         | EMAn observados |           | EMAn preditos <sup>(a)</sup> |                       |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------------|------|------|------|
|                 |              | Ensaio I        | Ensaio II | AMEn<br>Predictor            | RNA<br>(MLP 10-5-3-1) |      | RLM  |      |
|                 |              |                 |           |                              | Idade                 |      | 1    | 2    |
|                 |              | crescimento     | final     | 2                            | 3                     | 1    | 2    |      |
| Milho           | 1            | 3423            | 3365      | 3626                         | 3630                  | 3786 | 3619 | 3522 |
|                 | 2            | 3423            | 3364      | 3358                         | 3624                  | 3787 | 3614 | 3519 |
|                 | 3            | 3332            | 3583      | 3599                         | 3703                  | 3831 | 3661 | 3576 |
|                 | <b>Média</b> | 3392            | 3437      | 3528                         | 3652                  | 3801 | 3631 | 3539 |
| Farelo de soja  | 1            | 2494            | 2536      | 2600                         | 2282                  | 2560 | 2629 | 2646 |
|                 | 2            | 2428            | 2369      | 2533                         | 2216                  | 2330 | 2717 | 2738 |
|                 | 3            | 2444            | 2380      | 2581                         | 2387                  | 2516 | 2871 | 2845 |
|                 | <b>Média</b> | 2455            | 2428      | 2571                         | 2295                  | 2469 | 2739 | 2743 |
| Farelo de trigo | 1            | 1750            | 1994      | 2002                         | 1886                  | 1955 | 2327 | 2184 |
|                 | 2            | 1762            | 2024      | 2527                         | 1957                  | 1995 | 2290 | 2162 |
|                 | 3            | 1902            | 2110      | 1818                         | 1694                  | 1878 | 2405 | 2200 |
|                 | <b>Média</b> | 1805            | 2043      | 2116                         | 1846                  | 1943 | 2341 | 2182 |

<sup>(a)</sup>Aplicativo *AMEn Predictor*, proposto e disponível em Mariano *et al.* (2013, 2020b).

RNA (MPL 10-5-3-1), proposto pela própria autora (2024) em que a Idade 2 = 3 a 4 semanas e a Idade 3 = 5 a 6 semanas de vida do frango de corte.

RLM 1: Equação geral, proposta pela própria autora (2024): EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,69418EE - 209,4305MM - 57,9841FB - 8,1633FDN (alimentos concentrados geral de origem vegetal).

RLM 2: Equações propostas pela própria autora (2024). EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN (alimento energético: milho e farelo de trigo) e EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA (alimento proteico: farelo de soja).

Fonte: Autor (2024).

Dos alimentos estudados, o milho foi que apresentou a menor variação entre os valores de EMAn observados, considerando os dois ensaios *in vivo* e os três lotes neste estudo, a qual foi de 61,33 kcal kg<sup>-1</sup>. Neste estudo, a maior variação de EMAn foi observada para o farelo de trigo de 119 kcal kg<sup>-1</sup>. Em estudo conduzido por Silva *et al.* (2020) com frangos de corte na fase de crescimento, o valor de EMAn encontrado para o farelo de trigo foi de 3534 kcal kg<sup>-1</sup>. Nota-se que no presente estudo os valores de EMAn encontrados são inferiores aos mencionados por esses autores na literatura. No entanto, sabe-se que o farelo de trigo é um

alimento fibroso e pode conter uma alta proporção de fibra alimentar composta de PNAs, lignina e outros carboidratos vegetais insolúveis, podendo atuar como um antinutriente, tal fato pode justificar os baixos valores de EMAn encontrados nos lotes de farelo de trigo neste estudo. Portanto, as proporções de PNA encontrados no farelo de trigo podem reduzir o valor de energia metabolizável dos alimentos e, conseqüentemente, aumentar a viscosidade da digesta, o que afeta negativamente a digestibilidade dos nutrientes e o desempenho dos animais (Singh; Kim, 2021).

O uso de métodos indiretos para prever os valores de EMAn dos alimentos usados nas dietas de frangos de corte é uma importante ferramenta que pode auxiliar a formulação de rações adequadas às exigências nutricionais dos animais e reduzir o custo da ração. Considerando os valores médios de EMAn preditos, em relação aos valores médios observados nos ensaios I e II, nota-se que o valor médio de EMAn do farelo de trigo determinado no ensaio I e no ensaio II apresentou  $-311 \text{ kcal kg}^{-1}$  e  $-73 \text{ kcal kg}^{-1}$ , respectivamente, em relação ao valor de EMAn determinado pelo aplicativo *AMEn Predictor*. Levando em consideração que o aplicativo possui em seu modelo a categoria de predição pintos, esperava-se que fosse observada uma menor variação entre os valores obtidos *in vivo* para frangos de corte e os preditos pelo aplicativo, por serem categorias correspondentes.

No entanto, observou-se numericamente que os valores médios de EMAn preditos para o milho e farelo de trigo pelo aplicativo foram mais próximos dos valores médios observados no ensaio II, sugerindo que o *AMEn Predictor* é um pouco mais eficiente em estimar a EMAn para animais mais velhos. Isso pode ser em decorrência do banco de dados utilizado para desenvolver o aplicativo, que pode conter mais informações de valores de EMAn obtidas para os animais em fases mais avançadas de criação do que nas demais.

O modelo de RNA (MLP 10-5-3-1) atualizado contempla as variáveis FDN, FDA e a idade dos animais, em que a Idade 2 refere-se à idade dos animais experimentais no período entre 3 a 4 semanas de vida e a Idade 3 no período entre 5 a 6 semanas de vida. Assim, foi possível observar que o modelo de RNA atualizado com Idade 2 e 3 superestimaram os valores médios de EMAn preditos para o milho quando se compara com a média de EMAn obtida nos ensaios *in vivo* I (RNA Idade 2 =  $260 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e ensaio II (RNA Idade 3 =  $364 \text{ kcal kg}^{-1}$ ). E, subestimou o valor médio de EMAn predito para o farelo de soja em relação ao ensaio I (RNA Idade 2 =  $-160 \text{ kcal kg}^{-1}$ ).

Ao avaliar a equação de RLM 1 ( $\text{EMAn} = 4014,4011 + 4,3311\text{PB} + 48,69418\text{EE} - 209,4305\text{MM} - 57,9841\text{FB} - 8,1633\text{FDN}$ ) para estimar a EMAn de alimentos concentrados em geral de origem vegetal, notou-se que todos os valores médios de EMAn preditos para todos os

alimentos estudados foram superestimados em relação aos valores médios observados em ambos os ensaios metabólicos. As maiores superestimções foram observadas para o farelo de soja e farelo de trigo. Assim, os valores de EMAn preditos para o farelo de soja foram superestimados em 284 kcal kg<sup>-1</sup> e 311 kcal kg<sup>-1</sup> em relação aos obtidos no ensaio I e II, respectivamente. E, também, foram superestimados os valores de EMAn preditos para o farelo de trigo em 536 kcal kg<sup>-1</sup> e 298 kcal kg<sup>-1</sup> quando comparado aos valores de EMAn obtidos nos ensaios I e II, respectivamente.

Na RLM 2 (Tabela 7) usou-se duas equações de RLM para estimar o valor de EMAn dos alimentos testados, uma para alimentos energéticos (milho e farelo de trigo):  $EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN$ , e outra para alimentos proteicos (farelo de soja):  $EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA$ . A equação de RLM usada para estimar o valor de EMAn somente de alimentos proteicos (farelo de soja) obteve superestimções semelhantes a equação de RLM 1 usada para estimar a EMAn de alimentos concentrados em geral, em ambos os ensaios. Em relação aos alimentos energéticos, a RLM 2 (Tabela 7) superestimou os valores de EMAn preditos para milho e farelo de trigo em relação aos valores de EMAn obtidos nos ensaios metabólicos. Observa-se, em termos numéricos, que a equação de RLM 2 ( $EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN$ ) se aproximou mais dos valores observados do milho e farelo de trigo em relação à equação de RLM 1 para alimentos concentrados em geral ( $EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,69418EE - 209,4305MM - 57,9841FB - 8,1633FDN$ ). Este resultado é esperado, uma vez que a equação de RLM 1 estima valores de EMAn para um amplo grupo de alimentos (energéticos + proteicos) pertencentes a diferentes categorias de alimentos e, portanto, possuem a composição química muito variável entre eles.

De acordo com Zhao *et al.* (2008), vários fatores podem contribuir para superestimção ou subestimção dos modelos de predição da EMAn, sendo que um desses fatores é o tamanho da amostra para a análise de regressão, outro é a representatividade de amostras para o ingrediente como um todo.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de EMAn observados obtidos *in vivo* com frango de corte em duas fases de criação: crescimento (21 a 23 dias de idade) e final (40 a 42 dias de idade), e os valores de EMAn preditos pelas equações de regressão linear múltipla (RLM) para os alimentos-teste (farinhas de carne e ossos) proteicos de origem animal.

Tabela 8 - Energia metabolizável aparente corrigida pelo balanço de nitrogênio (EMAn, kcal kg<sup>-1</sup>) de farinhas de carne e ossos, obtida por ensaio de metabolismo (Ensaio I: n= 400 e Ensaio II: n = 240) com frangos de corte (valores observados) e por equações de regressão linear múltipla (valores preditos). Valores expressos na matéria seca (MS).

| Alimento                                | Lote         | EMAn observados          |                     | EMAn preditos      |                   |                   |
|---|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|   |              | Ensaio I:<br>crescimento | Ensaio II:<br>final | E1 <sup>(a)*</sup> | E2 <sup>(b)</sup> | E3 <sup>(c)</sup> |
| <b>Farinha<br/>de carne e<br/>ossos</b> | 1            | 2361                     | 2642                | 1962               | 1970              | 1986              |
|   | 2            | 2185                     | 2319                | 1867               | 1871              | 1887              |
|   | 3            | 2799                     | 2608                | 2501               | 2484              | 2492              |
|   | 4            | 3066                     | 2407                | 2209               | 2199              | 2215              |
|   | 5            | 2902                     | 2555                | 2303               | 2290              | 2303              |
|   | 6            | 3858                     | 3788                | 2626               | 2604              | 2617              |
|   | <b>Média</b> | 2862                     | 2720                | 2245               | 2236              | 2250              |

\*Equações de RLM propostas pela própria autora (2024).

<sup>(a)</sup>E1: EMAn = 3137,5850 + 58,5863EE – 46,8114MM – 2,5727Ca.

<sup>(b)</sup>E2: EMAn = 3156,0445 + 58,1022EE – 44,7134MM – 19,1335P.

<sup>(c)</sup>E3: EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE – 45,5500MM + 8,0873Ca – 31,4115P.

Fonte: Autor (2024).

As farinhas de carne e ossos apresentaram uma variação de 410 kcal kg<sup>-1</sup> entre os valores de EMAn observados, considerando os dois bioensaios e os 6 lotes do alimento. Silva *et al.* (2020) avaliaram amostras de FCOs e observaram valores de EMAn de 1695 kcal kg<sup>-1</sup>. Já nas pesquisas conduzidas por Eyng *et al.* (2010), Oliveira *et al.* (2018) e Rostagno *et al.* (2017) foram observados valores de EMAn para FCOs de 2488, 2022 e 1803 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Sabe-se que as variações nos valores de EMAn são inevitáveis nos alimentos de origem animal devido à falta de padronização no processamento e as proporções da matéria-prima utilizada nesses alimentos (Oliveira *et al.*, 2018; Silva *et al.* 2020).

Diante disso, as variações nos valores de EMAn das FCOs encontradas neste estudo e na literatura, evidenciam o cuidado que se deve ter ao avaliar o conteúdo químico e energéticos dos alimentos de origem animal e utilizá-los na formulação de ração para frangos de corte. Com base nisso, é de suma importância o desenvolvimento de métodos indiretos, como equações de regressão, que estimem os valores de EMAn de forma rápida e acurada utilizando apenas a composição química das FCOs obtidas em laboratórios particulares ou em fábricas de rações.

Assim, dentre as três equações de RLM ajustadas para determinar os valores de EMAn de alimentos concentrados de origem animal (Tabela 8), a E3 (EMAn = 3172,5776 +

57,7278EE – 45,5500MM + 8,0873Ca – 31,4115P) foi a que menos subestimou os valores de EMAn em relação aos valores de EMAn observados *in vivo* com frangos de corte nas duas idades.

A estimativa do erro padrão ( $S_{est}$ ) e os valores de probabilidade para as hipóteses de nulidade entre os valores energéticos estimados pelas equações de regressão linear múltipla (RLM) e os determinados *in vivo* com frangos de corte em diferentes idades, para os valores de EMAn dos alimentos concentrados de origem vegetal, encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Estimativa do erro padrão e níveis descritivos de probabilidade para as hipóteses de nulidade para as regressões entre valores observados e previstos, dos valores de EMAn de alimentos de origem vegetal.

| Métodos de estimativa <sup>(b)</sup> | Erro padrão da estimativa | Intercepto            | Coefficiente de inclinação |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|
|                                      |                           | $\beta_0 = 0$         | $\beta_1 = 1$              |
|                                      | $S_{est}$                 | p-valor <sup>1*</sup> | p-valor <sup>2*</sup>      |
| RLM 1 concentrado                    | 362,4434                  | 0,0011*               | 0,0432*                    |
| RLM 2 energético                     | 250,4903                  | 0,0083*               | 0,0720                     |
| RLM 2 proteico                       | 400,4739                  | 0,0062*               | 0,0047*                    |

<sup>(a)</sup>Equações propostas pela própria autora (2024).

<sup>(b)</sup>RLM 1 concentrado: EMAn = 4014,4011 + 4,3311PB + 48,69418EE – 209,4305MM – 57,9841FB – 8,1633FDN.

RLM 2 energético: EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN.

RLM 2 proteico: e EMAn = 2962,9847 + 20,1241PB + 55,9157EE - 216,9283MM - 11,6740FB - 14,8843FDA.

<sup>1</sup>H<sub>0</sub>:  $\beta_0 = 0$ ; H<sub>a</sub>:  $\beta_0 \neq 0$ .

<sup>2</sup>H<sub>0</sub>:  $\beta_1 = 1$ ; H<sub>a</sub>:  $\beta_1 \neq 1$ .

\*p < 0,05.

Fonte: Autor (2024).

Verificou-se que a análise estatística dos interceptos e dos coeficientes de inclinação das retas apontou que ambas as hipóteses de nulidade, ou seja, H<sub>0</sub>:  $\beta_0 = 0$  e H<sub>0</sub>:  $\beta_1 = 1$ , respectivamente, foram rejeitadas (p < 0,05), exceto para  $\beta_1$  da RLM2. Contudo, os resultados indicam que os valores preditos pelas equações de RLM concentrado, RLM energético e RLM proteico não representaram bem os valores observados *in vivo* com frangos de corte. Todavia, o menor erro de estimação ( $S_{est} = 250,4903$ ) foi observado na equação RLM energético (EMAn = 4137,9930 - 15,7041PB + 54,8548EE - 123,6490MM - 71,2845FB - 12,117FDN) e como já observado na Tabela 7, foi a equação que menos superestimou os valores energéticos do milho

e farelo de trigo, quando comparada a equação de RLM 1 usada para alimentos concentrados em geral.

Pode-se atrelar a não correspondência dos valores observados aos preditos por diversas causas, como a diferença entre os valores de EMAn observados dos alimentos de origem vegetal encontrados neste estudo e na literatura (Alvarenga, 2012; Alvarenga *et al.*, 2011; Rostagno *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2020); as variáveis de composição química que compõe as equações por grau de importância (correlação negativa ou positiva) com a EMAn do alimento (Nascimento *et al.*, 2009; Rodrigues *et al.*, 2001); números de informações coletadas de cada alimento comumente utilizado em dietas de frangos de corte (Nascimento *et al.*, 2011a); a metodologia empregada para a formação de grupos homogêneos durante o processo de meta-análise (Mariano *et al.*, 2012; Nascimento *et al.*, 2011a, 2011b), entre outros.

É válido ressaltar que as regressões apenas demonstram a existência de similaridade entre os valores observados e os estimados, mas não indicam qual equação de predição se ajusta melhor aos dados estimados com os observados (Alvarenga *et al.*, 2015). De acordo com Alvarenga *et al.* (2015) o estudo de regressão verifica apenas se a relação entre dois conjuntos de valores é existente e sem a presença de vícios.

Em trabalhos futuros, ajustes estatísticos e/ou técnicas de inteligência artificial adicionais, como redes bayesianas (Alvarenga *et al.*, 2021) e regressão linear múltipla ponderada considerando os efeitos principais e de interações entre as variáveis explicativas (Mariano *et al.*, 2020a), deverão ser exploradas para otimizar a predição da EMAn de alimentos de origem vegetal por equações de RLM utilizando o banco de dados atualizado.

Na Tabela 10 são apresentadas a estimativa do erro padrão ( $S_{est}$ ) e os valores de probabilidade para as hipóteses de nulidade entre os valores energéticos estimados pelo aplicativo *AMEn Predictor* e rede neural artificial (MLP 10-5-3-1), e os determinados *in vivo* com frangos de corte em diferentes idades, referentes aos valores de EMAn dos alimentos concentrados de origem vegetal.

Tabela 10 - Estimativa do erro padrão e níveis descritivos de probabilidade para as hipóteses de nulidade para as redes neurais artificiais (RNAs) entre valores observados e previstos, dos valores de EMAn de alimentos de origem vegetal.

| <b>Modelos de redes neurais artificiais para alimentos concentrados de origem vegetal</b> |                       |                           |                       |                           |
|---|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Métodos de estimativa   | Ensaio de metabolismo | Erro padrão da estimativa | Intercepto            | Coeficiente de inclinação |
|   |                       |                           | $\beta_0 = 0$         | $\beta_1 = 1$             |
|   |                       | $S_{est}$                 | p-valor <sup>1*</sup> | p-valor <sup>2*</sup>     |
| <i>AMEn Predictor</i> <sup>(a)</sup>  | I (crescimento)       | 340,9101                  | 0,7148                | 0,9343                    |
|   | II (final)            | 261,3544                  | 0,6597                | 0,4617                    |
|   | Ambos                 | 284,1304                  | 0,9956                | 0,5626                    |
| RNA Idade 2 <sup>(b)</sup>  | I (crescimento)       | 243,1381                  | 0,0869                | 0,0542                    |
|   | II (final)            | 247,6772                  | 0,0019*               | 0,0021*                   |
|   | Ambos                 | 223,5677                  | 0,0005*               | 0,0003*                   |
| RNA Idade 3 <sup>(c)</sup>  | I (crescimento)       | 299,8333                  | 0,1041                | 0,0171*                   |
|   | II (final)            | 265,7746                  | 0,0009*               | 0,0003*                   |
|   | Ambos                 | 265,0180                  | 0,0005*               | <0,01*                    |

<sup>(a)</sup>RNA 1: Aplicativo *AMEn Predictor*, proposto por Mariano *et al.* (2013, 2020b). Variáveis: PB, EE, MM, FB, CAT, ING, ANIMAL.

<sup>(b)(c)</sup>RNA idade 2 e RNA idade 3: Modelo MLP 10-5-3-1, proposto pela própria autora (2024). Variáveis: PB, EE, MM, FB, FDN, FDA, CAT, ING, ANIMAL e IDADE. Idade 2 = 3 a 4 semanas e Idade 3 = 5 a 6 semanas de vida do frango de corte.

<sup>1</sup> $H_0: \beta_0 = 0; H_a: \beta_0 \neq 0.$

<sup>2</sup> $H_0: \beta_1 = 1; H_a: \beta_1 \neq 1.$

\* $p < 0,05$

Fonte: Autor (2024).

Para o *AMEn Predictor*, categoria pintos, foram aceitas as propostas de nulidade ( $H_0: \beta_0 = 0$  e  $H_0: \beta_1 = 1$ ,  $p > 0,05$ ), para prever o valor energético dos alimentos de origem vegetal testados em ambos os ensaios, ou seja, verificou-se que os valores estimados por estas equações foram similares àqueles obtidos pelos ensaios metabólicos com frangos de corte em duas idades diferentes e para um conjunto de dados testado, o qual uniu os dados provenientes das duas idades.

Por outro lado, a precisão com que as estimativas foram obtidas quando se utilizou o aplicativo pode ser medida pelo erro padrão da estimativa que foi de 340,9101 para o ensaio I, 261,3544 para o ensaio II e 284,1304 para ambos. Neste caso, o *AMEn Predictor* estimou com menor erro os valores de EMAn dos alimentos de origem vegetal para animais em fase final de criação (40 a 42 dias de idade). Salienta-se que nessa versão do aplicativo, a idade dos animais

não é uma variável que compõe o modelo MLP 7-5-3-1 proposto por Mariano *et al.* (2013, 2020b), apenas o tipo de animal utilizado no bioensaio (pintos ou galos) e, supostamente, a maioria dos trabalhos catalogados na literatura usam animais experimentais na fase de crescimento e final de criação, o que pode justificar a melhor precisão em prever a EMAn dos alimentos para animais com a mesma faixa etária do ensaio II. Khalil *et al.* (2021) mencionaram que mais estudos devem ser realizados considerando aves nas fases iniciais (1 a 14 dias de vida), uma vez que existem poucos dados de EMAn disponíveis na literatura para esta faixa etária e sabe-se que os animais nas fases iniciais de vida são menos eficientes em metabolizar os nutrientes devido à menor atividade enzimática.

No modelo de RNA (MLP 10-5-3-1), incluíram-se as variáveis de FDN, FDA e idade dos animais experimentais, a partir de um compilado de dados da literatura, aplicando-se a técnica de meta-análise. Para esse modelo, foram aceitas as propostas de nulidade ( $H_0: \beta_0 = 0$  e  $H_0: \beta_1 = 1$ ,  $p > 0,05$ ) para a Idade 2 (3ª e 4ª semana de vida) no ensaio I (fase de crescimento das aves), indicando que os valores observados para a EMAn são equivalentes aos preditos pela RNA. No entanto, o modelo MPL 10-5-3-1 não refletiu adequadamente os valores observados *in vivo* com frangos de corte ( $H_0: \beta_0 = 0$  e  $H_0: \beta_1 = 1$ ,  $p < 0,05$ ) ao aplicar a Idade 2 nos ensaios II (fase crescimento) e ambos, e Idade 3 em todos os ensaios. Isso pode ser observado na Tabela 7, que demonstra os valores de EMAn observados nos ensaios I e II e os preditos pelo modelo. O modelo de RNA atualizado para a Idade 2 subestimou os valores de EMAn do farelo de soja e do farelo de trigo, enquanto superestimou os de milho em relação ao ensaio I. Por outro lado, a Idade 3 superestimou os valores de EMAn do milho e do farelo de soja em comparação com os observados no ensaio II, mas subestimou os valores de EMAn do farelo de trigo no ensaio II.

Com base nesses resultados, é fundamental analisar os intervalos sugeridos para a variável Idade, uma vez que animais fora da faixa etária definida podem ter sido incluídos ou excluídos de forma inadequada. Além disso, existe a possibilidade de estabelecer mais intervalos de idade, visto que a idade dos animais influencia na EMAn dos alimentos como já comprovado por Khalil *et al.* (2021) e Thomas, Ravindran e Ravindran (2008).

Na Tabela 11 estão apresentados a estimativa do erro padrão ( $S_{est}$ ) e os valores de probabilidade para as hipóteses de nulidade entre os valores energéticos estimados pelas equações de regressão linear múltipla (RLM) e os obtidos *in vivo* com frangos de corte em duas idades, referentes aos valores de EMAn dos alimentos concentrados de origem animal.

Tabela 11 - Estimativa do erro padrão e níveis descritivos de probabilidade para as hipóteses de nulidade para as regressões entre valores observados e previstos, referente aos valores de EMAn de alimentos de origem animal.

| <b>Equações de regressão linear múltipla para alimentos concentrados proteicos de origem animal</b> |                       |                           |               |                           |
|---|-----------------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
| Métodos de estimativa <sup>(a)</sup>  | Ensaio de metabolismo | Erro padrão da estimativa | Intercepto    | Coeficiente de inclinação |
|   |                       |                           | $\beta_0 = 0$ | $\beta_1 = 1$             |
|   |                       |                           | $S_{est}$     | p-valor <sup>1*</sup>     |
| RLM 1 <sup>(b)</sup>  | I                     | 860,3435                  | 0,4246        | 0,2231                    |
|   | II                    | 729,9731                  | 0,9410        | 0,7070                    |
|   | Ambos                 | 713,597                   | 0,5317        | 0,2278                    |
| RLM 2 <sup>(c)</sup>  | I                     | 873,072                   | 0,3887        | 0,2069                    |
|   | II                    | 738,5856                  | 0,8848        | 0,6591                    |
|   | Ambos                 | 723,2602                  | 0,4610        | 0,1938                    |
| RLM 3 <sup>(d)</sup>  | I                     | 859,8264                  | 0,3628        | 0,1949                    |
|   | II                    | 726,3886                  | 0,8620        | 0,6459                    |
|   | Ambos                 | 711,8826                  | 0,4268        | 0,1811                    |

<sup>(a)</sup>Equações propostas pela própria autora (2024).

<sup>(b)</sup>E1: EMAn = 3137,5850 + 58,5863EE – 46,8114MM – 2,5727Ca.

<sup>(c)</sup>E2: EMAn = 3156,0445 + 58,1022EE – 44,7134MM – 19,1335P.

<sup>(d)</sup>E3: EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE – 45,5500MM + 8,0873Ca – 31,4115P.

<sup>1</sup>H<sub>0</sub>:  $\beta_0 = 0$ ; H<sub>a</sub>:  $\beta_0 \neq 0$ .

<sup>2</sup>H<sub>0</sub>:  $\beta_1 = 1$ ; H<sub>a</sub>:  $\beta_1 \neq 1$ .

\*p < 0,05

Fonte: Autor (2024).

Para todas as equações de RLM (Tabela 11), aceitou-se as propostas de nulidade (H<sub>0</sub>:  $\beta_0 = 0$  e H<sub>0</sub>:  $\beta_1 = 1$ , p > 0,05), para prever o valor energético dos alimentos de origem animal testados em ambos os ensaios. Sendo assim, verificou-se que os valores estimados por estas equações foram similares àqueles obtidos pelos ensaios I e II com frangos de corte em diferentes idades, e para um conjunto de dados testado, o qual uniu os dados provenientes das duas idades.

Apesar de aceitas as propostas de nulidade, nota-se que os valores do S<sub>est</sub> foram elevados, o que pode estar relacionado com a subestimação dos valores de EMAn observados na Tabela 8. Os menores erros da estimativa foram observados na seguinte ordem de equações: RLM 3, RLM 2 e RLM 1, sendo a equação de RLM 3 (EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE – 45,5500MM + 8,0873Ca – 31,4115P) que melhor estimou os valores de EMAn para os alimentos de origem animal em relação aos observados *in vivo* com frangos de corte.

Ainda, é possível observar que a equação de RLM 3 possui em seu modelo as variáveis Ca e P, sendo que nos demais modelos uma ou outra está presente. De acordo com Oliveira *et al.* (2018), uma equação de predição de EMAn para alimentos de origem animal é eficaz quando nela estão incluídas as variáveis que se correlacionam com a EMAn, portanto, Ca (-0,469) e P (-0,733) são variáveis que possuem correlação negativa com a EMAn.

Por fim, os métodos que melhor estimaram a EMAn de alimentos de origem vegetal foram o aplicativo *AMEn Predictor* para todas as idades e o modelo de RNA (MLP 10-5-3-1) Idade 2 para os animais em fase de crescimento, pois a hipótese ( $H_0: \beta_0 = 0$  e  $H_0: \beta_1 = 1$ ,  $p > 0,05$ ) foi confirmada (Tabela 10). Para os alimentos de origem animal, todas as equações em todas idades tiveram a hipótese ( $H_0: \beta_0 = 0$  e  $H_0: \beta_1 = 1$ ,  $p > 0,05$ ) confirmada, no entanto, selecionou-se a equação de RLM 3 ( $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$ ) como sendo a melhor devido aos menores erros-padrão da estimativa obtidos em todos os ensaios, quando comparado às demais equações (Tabela 11).

Os resultados obtidos no estudo atual sugerem que o aplicativo *AMEn Predictor* já disponível e o modelo de RNA proposto para atualizá-lo, podem ser mais eficazes na estimativa dos valores de EMAn de alimentos de origem vegetal, conforme relatado em estudos anteriores por Abreu *et al.* (2020) e Mariano *et al.* (2013, 2020a, 2020b) quando comparado com outros métodos indiretos (Alvarenga *et al.*, 2021; Mariano *et al.*, 2012; Nascimento *et al.*, 2011a, 2011b). Ainda, em trabalhos futuros, deverão ser realizadas seleção de variáveis e análises de adequabilidade para incluir os alimentos de origem animal no aplicativo, devido a sua importância nutricional e econômica para a avicultura.

Para os modelos de RLM descritos na Tabela 9, deverão ser realizados novos estudos para melhorar a qualidade de ajustes das equações, verificar o número de variáveis por grau de importância e a adequabilidade das equações para estimar a EMAn de alimentos concentrados de origem vegetal e animal.

No presente estudo, ficou evidente a importância das equações de regressão linear múltipla, do aplicativo e da rede neural artificial para estimar os valores de EMAn de alimentos concentrado de origem vegetal e animal, podendo ser ferramentas importantes para aumentar a precisão da formulação da dieta para frangos de corte.

Além disso, o uso desses métodos indiretos pode permitir que os produtores corrijam os valores de energia com base nas variações na composição química dos alimentos obtidos apenas em laboratórios, de maneira mais rápida e menos onerosa quando comparado aos ensaios metabólicos com animais.

Diante do exposto, para utilizar adequadamente os métodos indiretos descritos neste estudo e indicá-los na prática, é necessário a realização de trabalhos futuros para testar a adequabilidade, conforme descrito nos trabalhos de Felipe *et al.* (2015), Mariano *et al.* (2014) e Perai *et al.* (2010) para, posteriormente, poder indicar qual o método é o mais acurado para determinar a EMAn para os alimentos de origem vegetal e animal. Além disso, seria importante também, testar a confiabilidade por meio de ensaios de desempenho com frangos de corte nas diferentes fases de criação e verificar o aproveitamento de energia e nutrientes de rações formuladas com os valores energéticos obtidos com os métodos supracitados, conforme pesquisa conduzida por Alvarenga *et al.* (2015).

## 4 CONCLUSÃO

Houve grande variação na composição química dos alimentos testados neste estudo, sendo responsável pela grande variabilidade dos valores de EMAn obtidos nos ensaios de metabolismo com frangos de corte em fase de crescimento e final de criação e, por métodos indiretos.

Os métodos indiretos que melhor estimaram a EMAn dos alimentos concentrados de origem vegetal foram o aplicativo *AMEn Predictor* já disponível e o modelo de RNA MLP 10-5-3-1 proposto para atualizá-lo. Para os alimentos de origem vegetal, o aplicativo estimou satisfatoriamente a EMAn para todas as idades dos frangos de corte, enquanto que a MLP 10-5-3-1 estimou a EMAn de modo eficiente apenas para os frangos de corte em fase de crescimento.

Para os alimentos de origem animal, a equação de regressão linear múltipla que melhor estimou os valores de EMAn para esses alimentos foi  $EMAn = 3172,5776 + 57,7278EE - 45,5500MM + 8,0873Ca - 31,4115P$ , com menor erro padrão da estimativa.

## REFERÊNCIAS

A.O.C.S. **Official methods and recommended practices of the American Oil Chemist's Society**, Ca 5a-40. Champaign: AOCS, 1998.

ABDOLLAHI, M. R. *et al.* Application of apparent metabolizable energy *versus* nitrogen-corrected apparent metabolizable energy in poultry feed formulations: A Continuing Conundrum. **Animals**, Switzerland, v. 11, p. 2174, 2021.

ABREU, L. H. P. *et al.* Artificial neural networks for prediction of physiological and productive variables of broilers. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 1, p. 1-9, 2020.

AGUIRRE, L. *et al.* Apparent metabolizable energy and ileal amino acid digestibility of commercial soybean meals of different origins in broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 103, n. 7, p. 103786, 2024.

AGUIRRE, L. *et al.* Chemical composition, protein quality indicators and *in vitro* protein digestibility of commercial soybean meals from different origins for use in poultry feeding. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 293, p. 115473, 2022.

ALBINO, L. F. T.; SILVA, M. A. Valores nutritivos de alimentos para aves e suínos determinados no Brasil. *In*: Simpósio Internacional sobre exigências nutricionais de aves e suínos, 1996, Viçosa. **Anais...** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, p. 303-318, 1996.

ALVARENGA, R. R. **Avaliação de equações de predição dos valores energéticos do milho e do farelo de soja na formulação de rações para frangos de corte**. 2012. 92 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ALVARENGA, R. R. *et al.* Energetic values of feedstuffs for broilers determined with *in vivo* assays and prediction equations. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 168, n. 3-4, p. 257-266, 2011.

ALVARENGA, R. R. *et al.* Formulation of diets for poultry: the importance of prediction equations to estimate the energy values. **Archivos de Zootecnia**, Spain, MG, v. 62, p. 1-11, 2013.

ALVARENGA, R. R. *et al.* Validation of prediction equations of energy values of a single ingredient or their combinations in male broilers. **Animal Bioscience**, Republic of Korea, v. 28, n. 9, p. 1335-1344, 2015.

ALVARENGA, T. C. *et al.* Application of Bayesian networks to the prediction of the AMEn: a new methodology in broiler nutrition. **Translational Animal Science**, Oxford, v. 5, n. 1, 2021.

ALVARENGA, T. C. **Redes bayesianas na predição de valores energéticos de alimentos para aves**. 2019. 101 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

- ARABA, M.; DALE, N. M. Evaluation of protein solubility as an indicator of overprocessing soybean meal. **Poultry Science**, Champaign, v. 69, n. 1, p. 76-83, 1990a.
- ARABA, M.; DALE, N. M. Evaluation of protein solubility as an indicator of underprocessing of soybean meal. **Poultry Science**, v. 69, n. 10, p. 1749-1752, 1990b.
- BABATUNDE, O. O.; PARK, C. S.; ADEOLA, O. Nutritional Potentials of Atypical Feed Ingredients for Broiler Chickens and Pigs. **Animals**, Switzerland, v. 11, n. 5, p. 1196, 2021.
- BELLAVER, C.; SNIZEK JUNIOR, P. N. Processamento da soja e suas implicações na alimentação de suínos e aves. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 1999, Londrina, PR. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja, 1999. p.183- 199 (Embrapa Soja. Documentos, 124).
- BELKHANCI, H. *et al.* Formulation, optimization of a poultry feed and analysis of spectrometry, biochemical composition and energy facts. **South African Journal of Chemical Engineering**, Netherlands, v. 44, p. 31-41, 2023.
- BERTECHINI, A. G. *et al.* Metabolizable energy values of soybean meals and soybean oil for broilers at different ages. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 41, p. e44540, 2019.
- BORGES, F. M. O. *et al.* Comparação de métodos de avaliação dos valores energéticos do grão de trigo e seus subprodutos para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v.55, n.6, p.710-721, 2003.
- BUTOLO, J. E. **Qualidade de ingredientes na alimentação animal**. 2ª Ed., Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, Campinas, SP, 2010.
- BUTOLO, J. E. **Qualidade de Ingredientes na Alimentação Animal**. 430 p. Colégio Brasileiro de Alimentação Animal, Campinas, 2002.
- CAO, M. H.; ADEOLA, O. Energy value of poultry byproduct meal and animal-vegetable oil blend for broiler chickens by the regression method. **Poultry Science**, Champaign, v. 95, n. 2, p. 268-275, 2016.
- CHOCT, M.; ANNISON, G.; TRIMBLE, R. Soluble wheat pentosans exhibit different anti-nutritive activities in intact and cecectomized broiler chickens. **Journal of Nutrition**, Philadelphia, v. 122, n. 12, p. 2457-2465, 1992.
- COBB. 2019 Broiler-Guide. **Broiler Management Manual Cobb-500**. COBB-VANTRESS, pp.112.
- COMPÊNDIO BRASILEIRO DE ALIMENTAÇÃO ANIMAL 2017. Guia de Métodos Analíticos. São Paulo: Siderações, 5º Edição, 2017.
- COWIESON, A.J.; BEDFORD, M.R.; RAVINDRAN, V. Interactions between xylanase and glucanase in maize-soy-based diets for broilers. **British Poultry Science**, Oxford, v. 51, n. 2, p. 246- 257, 2010.

CVB. CVB Feed Table 2018: **Chemical composition and nutritional values of feedstuffs**. Wageningen, The Netherlands, CVB; 2018.

DETMANN, E. *et al.* **Métodos para análise de alimentos**: INCT - ciência animal. 2. ed. Visconde Rio Branco: Suprema, 2021, 350p.

DETMANN, E. *et al.* Simulação e validação de parâmetros da cinética digestiva em novilhos mestiços suplementados a pasto, por intermédio do sistema *in vitro* de produção de gases. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 34, n. 6, p. 2112- 2122, 2005.

DIFISA - Divisão de Fiscalização de Alimentos para Animais. **Padrões oficiais de matérias primas destinadas à alimentação animal**. Brasília: DIFISA, 1989. 40p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de pesquisa de soja e arroz. **Tabela de composição química e valores energéticos para suínos e aves**. 3. Ed. Concórdia: CNPSA, 1991. 97 p. (Documentos, n. 19).

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Monitoramento da qualidade de soja integral desativada. **Comunicado técnico**, Concórdia, n. 600, 2022.

EYNG, C. *et al.* Composição química, valores energéticos e digestibilidade verdadeira dos aminoácidos de farinhas de carne e ossos e de peixe para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 3, p. 575-580, 2011.

FARREL, D. J. Rapid determination of metabolizable energy of foods using cockerels. **British Poultry Science**, Edinburgh, v. 19, n. 3, p. 303-308, 1978.

FELIPE, V. P. S. *et al.* Using multiple regression Bayesian networks and artificial neural networks for prediction of total egg production in European quails based on earlier expressed phenotypes. **Poultry Science**, Champaign, v. 94, n. 4, p. 772-780, 2015.

GALLIARD, T. Hydrolytic and oxidative degradation of lipids during storage of whole meal flour: effects of bran and germ components. **Journal of Cereal Science**, London, v. 4, n. 2, p. 179-192, 1986.

GARCIA JÚNIOR, A. A. P. **Equações de predição dos valores energéticos de farinhas de origem animal para aves, utilizando o princípio da meta-análise**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010. 57p.

GENEROSO, R. A. R. *et al.* Composição química e energética de alguns alimentos para frangos de corte em duas idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 7, p. 1251-1256, 2008.

HERWIG, E. *et al.* Assessing the effect of rate and extent of starch digestion on laying hen performance. **Poultry Science**, Champaign, v. 98, n. 7, p. 1-9, 2019.

KHALIL, M. M. *et al.* Apparent metabolizable energy of cereal grains for broiler chickens is influenced by age. **Poultry Science**, Champaign, v. 100, n. 9, 2021.

LIMA, M. R. *et al.* Atividade ureática. **Revista Eletrônica Nutritime**, Brasil, v. 8, n. 5, p. 1606-1611, 2011.

LOPEZ, G.; LEESON, S. Relevance of nitrogen correction for assessment of metabolizable energy with broilers to forty-nine days of age. **Poultry Science**, Champaign, v. 86, p. 1696–1704, 2007.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Instrução Normativa n° 60**. Regulamento Técnico do Milho, de 22 de dezembro de 2011.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* **AMEn Predictor**. 2016. Disponível em: <https://apkpure.com/br/amen-predictor/com.amenpredictor>. Acesso em: 10 set. 2024.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* AMEn Predictor: a mobile app to predict energy values of broilers feedstuffs. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v. 175, 2020. 2020b.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Committee neural network and weighted multiple regression to predict the energetic values of poultry feedstuffs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 55, p. e01199, 2020. 2020a.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Equações de predição de valores energéticos de alimentos obtidas utilizando meta-análise e componentes principais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p. 1634-1640, 2012.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Neural network committee to predict the AMEn of poultry feedstuffs. **Neural Computing and Applications**, London, v. 25, n. 7/8, p. 1903-1911, 2014.

MARIANO, F. C. M. Q. *et al.* Prediction of the energy values of feedstuffs for broilers using meta-analysis and neural networks. **Animal**, Cambridge, v. 7, n. 9, p. 1440-1445, 2013.

MATEOS, G. G. *et al.* Critical review of the procedures used for estimation of the energy content of diets and ingredients in poultry. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 28, n. 3, p. 506-525, 2019.

MATTERSON, L. D.; POTTER, L. M.; STUTZ, M. W. The metabolizable energy of feed ingredients for chickens. **Agricultural Experimental Station Research Report**, New York, v. 7, p. 3-11, 1965.

NASCIMENTO, G. A. *et al.* Equações de predição para estimar valores da energia metabolizável de alimentos concentrados energéticos para aves utilizando meta-análise. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 63, n. 1, p. 222-230, 2011a.

NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar os valores da EMAn de alimentos proteicos para aves utilizando a meta-análise. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 10, p. 2172-2177, 2011. 2011b.

NASCIMENTO, G. A. J. *et al.* Equações de predição para estimar os valores energéticos de alimentos concentrados de origem vegetal para aves utilizando a meta-análise. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.38, n.7, p.1265-1271, 2009.

NETER, J. *et al.* **Applied linear statistical models Regression, Analysis of Variance, and Experimental Design**. 2nd ed. Irwin; Homewood, IL, USA: 1985.

NING, R. *et al.* Evaluating and predicting net energy value of wheat and wheat bran for broiler chickens. **Animal Bioscience**, Korea, v. 35, n. 11, p. 1760-1770, 2022.

NRC (National Research Council). **Nutrient Requirements of Poultry**, 9th ed.; National Academic Press: Washington, DC, USA, 1994.

NUNES, R. V. *et al.* Valores energéticos de subprodutos de origem animal para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1217-1224, 2005.

OLIVEIRA, C. R. C. de. **Avaliação nutricional de farinhas de origem animal para frangos de corte**. 2018. 122 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

OLIVEIRA, C. R. C. de. *et al.* Prediction equations for energy values of animal meals obtained using meta-analysis. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 47, e20180098, 2018.

OLIVEIRA, D. H. de. **Valores energéticos da farinha de carne e ossos e do óleo de soja para diferentes espécies e categorias de aves**. 2016. 44 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

OLIVEIRA, E. C. de. **Energia metabolizável de alimentos determinada in vivo e por métodos indiretos para diferentes categorias de aves**. 2019. 102 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

PERAI, A. H. *et al.* A comparison of artificial neural networks with other statistical approaches for the prediction of true metabolizable energy of meat and bone meal. **Poultry Science**, Champaign, v.89, p.1562-1568, 2010.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2024. *Software*.

RAVINDRAN, V. *et al.* Apparent ileal digestibility of Amino acids in dietary ingredients for broiler chickens. **Animal Science**, United Kingdom, v. 81, p. 85-97, 2005.

REZAEI, A. *et al.* A new precision–fed chick assay for determining true metabolizable energy values of some poultry feed ingredients for broiler chickens. **Iranian Journal of Applied Animal Science**, Iran, v. 20, n. 1, p. 103-111, 2020.

RODRIGUES, P. B. *et al.* Influência do tempo de coleta e metodologias sobre a digestibilidade e valor energético de rações para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 882-889, 2005.

- RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos da soja e subprodutos da soja, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 1771-1782, 2002.
- RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos do milho, do milho e subprodutos do milho, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1767-1778, 2001.
- ROST, P. R. *et al.* Valores energéticos de sojas integrais e de farelos de soja, determinados com galos adultos e por equações de predição. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 467-475, 2005.
- ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 4 ed. Viçosa: UFV, 2017. v.1. 482p.
- ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T. **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2024. v.1. 531p.
- SÁ JÚNIOR, A. *et al.* Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Lavras, v. 108, p. 1–7, 2019.
- SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. **Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos**. Jaboticabal: Funep, 2017. 262p.
- SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. **Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos**. Jaboticabal: Funep, 2007. 283p.
- SARTORELLI, S. A. *et al.* Nutritional and microbiological evaluation of meat and bone meal produced in the state of Minas Gerais. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 51-60, 2003.
- SIBBALD, I. R. A bioassay for true metabolizable energy in feedingstuffs. **Poultry Science**, Champaign, v. 55, n. 1, p. 303-308, 1976.
- SIBBALD, I.; SLINGER, S. A biological assay for metabolizable energy in poultry feed ingredients together with findings which demonstrate some of the problems associated with the evaluation of fats. **Poultry Science**, Champaign, v. 42, p.313-325, 1963.
- SILVA, D. A. T. *et al.* Energy values of traditional ingredients and sugarcane yeast for laying hens. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 273-278, 2014.
- SILVA, D. J.; QUEIROZ, C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Viçosa: UFV, 2002.
- SILVA, D. L. *et al.* Energia metabolizável e aminoácidos digestíveis de coprodutos de trigo e de farinhas de origem animal em dietas para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 72, n. 6, p. 2402–2407, 2020.
- SILVA, E. A. da *et al.* Chemical composition and metabolizable energy values of feedstuffs for broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 648-654, 2012.

SILVA, E. P. da. *et al.* Valores energéticos de ingredientes convencionais para aves de postura comercial. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 10, n. 1, p. 91-100, 2009.

SILVA, E. P. *et al.* Prediction of metabolizable energy values in poultry offal meal for broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, p. 2237 – 2245, 2010.

SILVA, E. P. *et al.* Aspectos nutricionais de farinhas de vísceras de aves e sua utilização em rações de frangos de corte. **Acta Veterinaria Brasilica**, Mossoró, v.5, p.108-118, 2011.

SINGH, A. K.; KIM, W. K. Effects of dietary fiber on nutrients utilization and gut health of poultry: A review of challenges and opportunities. **Animals**, Switzerland v. 11, n. 181, 2021.

STEFANELLO, C. *et al.* Research Note: Corn energy and nutrient utilization by broilers as affected by geographic areas and carbohydrases. **Poultry Science**, Champaign, v. 102, n. 2, p. 102366, 2023.

SVIHUS, B. Starch digestion capacity of poultry. **Poultry Science**, Champaign, v. 93, n. 9, p. 2394-2399, 2014.

THOMAS, D. V.; RAVINDRAN, V.; RAVINDRAN, G. Nutrient digestibility and energy utilisation of diets based on wheat, sorghum or maize by the newly hatched broiler chick. **British Poultry Science**, Oxford, v. 49, n. 4, p. 429-435, 2008.

TRONI, A. R. *et al.* Composição química e energética de alimentos para frangos de corte. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 4, p. 755–760, 2016.

VANIER, L. **Qualidade de arroz e mercados emergentes**. Labgrãos Magazine, Pelotas, v. 1, p. 2-4, 2017.

WOLYNETZ, M. N.; SIBBALD, I. R. Relationships between apparent a true metabolizable energy and the effects of a nitrogen correction. **Poultry Science**, Champaign, v. 63, n. 7, p. 1386-1399, 1984.

WU, S. *et al.* Historical flaws in bioassays used to generate metabolizable energy values for poultry feed formulation: a critical review. **Poultry Science**, Champaign, v. 99, p. 385– 406, 2020.

ZAEFARIAN, F. *et al.* Trends in feed evaluation for poultry with emphasis on in vitro techniques. **Animal Nutrition**, United States, v. 7, n. 2, p. 268-281, 2021.

ZHAO, F. *et al.* Predicting metabolizable energy of normal corn from its chemical composition in adult pekin ducks. **Poultry Science**, Champaign v. 87, p. 1603-1608, 2008.

ZONTA, M. C. de M. *et al.* Energia metabolizável de farinhas de soja ou produtos de soja, determinada pelo método de coleta total e por equações de predição. **Archivos de Zootecnia**, España, v. 55, n. 209, p. 21-30, 2006.

## CONSIDERAÇÕES GERAIS

O conhecimento do valor energético dos alimentos é essencial para o fornecimento adequado de nutrientes às aves, tendo em vista que a maioria dos trabalhos evidencia a participação da energia na regulação do consumo. No entanto, o procedimento biológico necessário para determinar a EMAn dos alimentos é demorado e oneroso.

Portanto, o desenvolvimento de novas metodologias, a criação de aplicativos à exemplo do *AMEn Predictor*, e de *softwares* capazes de estimar o conteúdo energético dos alimentos em tempo real com base apenas na composição química, sejam de baixo custo e que considerem os vários fatores que influenciam na EMAn, é de fundamental importância para o setor avícola, pois dispensa o uso de bomba calorimétrica e bioensaios.

A aplicabilidade dos métodos indiretos, como os citados neste trabalho, pode vir a substituir o uso de tabelas, sugerindo novas frentes de pesquisas, direcionadas para a elaboração de rações mais adequadas às necessidades das aves.

## ANEXO A – Parecer comitê de ética



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA  
 COMISSÕES PERMANENTES  
 COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS - CEUA  
 Cx.Postal.3037 - Lavras – MG – 37200-000  
 Tel: (35) 3829-5182 E-mail: [ceua.prp@ufla.br](mailto:ceua.prp@ufla.br)

**CERTIFICADO**

Certificamos que a proposta intitulada “Atualização do aplicativo *AMEn Predictor* e validação dos valores energéticos determinados *in vivo* com frangos de corte e pelo aplicativo” protocolo no 032/23, sob a responsabilidade de Renata Ribeiro Alvarenga, Paulo Borges Rodrigues e Maria Alice Junqueira Gouvêa Silva, que envolve a produção, manutenção e/ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto homem), para fins de ensino e/ou pesquisa científica, encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas edificadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e foi aprovada pela COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS (CEUA) da Pró-Reitoria de Pesquisa/UFLA, em reunião de 26/05/2023.

Vigência da autorização: de 29/05/2023 a 28/02/2025

Finalidade: ( ) Ensino ( x ) Pesquisa Científica ( ) Treinamento/Extensão

Espécie/linhagem/raça: Ave / Cobb 500®

Número de animais aprovados: 400

Peso/Idade: - / 1 a 42 dias

Sexo: macho

Origem dos animais: (documento apresentado pelo pesquisador responsável e arquivado pela CEUA): Davicol Avicultura Ltda, Rua São João, 217; Bairro Centro, Guareí/SP.

**CERTIFICATE**

We certify that the proposal entitled "Update of the *AMEn Predictor* App and validation of energy values determined *in vivo* with broilers and by the App" Protocol No. 032/23, under the responsibility Renata Ribeiro Alvarenga, Paulo Borges Rodrigues and Maria Alice Junqueira Gouvêa Silva, which involves the production, maintenance and / or use of animals belonging to the phylum Chordata, subphylum Vertebrata (except man), for purposes of teaching and / or scientific research, is in accordance with the provisions of Law No. 11.794, of October 8, 2008, Decree No. 6899 of July 15, 2009, and with the standards required by the National Council Animal Experimentation Control (CONCEA), the Ministry of Science, Technology and Innovation (MCTI), and was approved by ETHICS COMMITTEE ON ANIMAL USE (CEUA) of the Dean of Research / UFLA in meeting 03/22/2023.

Authorization validity: 05/29/2023 a 02/28/2025

Finality: ( ) Teaching ( x ) Scientific research ( ) Training/Extension

Species / strain / breed: Bird / Cobb 500®

Number of approved animals: 400

Weight / Age: - / 1 to 42 days

Sex: male

Origin of animals: (document presented by the responsible researcher and filed by CEUA): Davicol Avicultura Ltda, Rua São João, 217; Bairro Centro, Guareí/SP.

Documento assinado digitalmente  
 ERICK DARLISSON BATISTA  
 Data: 05/09/2024 16:38:18-0300  
 Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Erick Darlison Batista  
 Presidente da Comissão de Ética no Uso de Animais CEUA

**ANEXO B – Referências nacionais e internacionais utilizadas para a atualização do banco de dados proposto por Nascimento (2007) e o acréscimo de referências com dados de composição química de alimentos proteicos de origem animal.**

Tabela 1B - Alimentos concentrados energéticos de origem vegetal (< 18% FB e < 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

(Continua)

| <b>Alimentos energéticos</b>             | <b>Referências</b>   |
|--|--|
| Arroz                                    | Xie <i>et al.</i> (2021)   |
| Arroz polido                             | Ullah <i>et al.</i> (2016)   |
| Arroz quebrado                           | Andriquetto <i>et al.</i> (2000); Ullah <i>et al.</i> (2016); Xie <i>et al.</i> (2021)   |
| Aveia                                    | Andriquetto <i>et al.</i> (2000); Dunaway; Adedokun (2019)   |
| Casca de soja                            | Nery <i>et al.</i> (2007); Vieira <i>et al.</i> (2014)   |
| Centeio                                  | Andriquetto <i>et al.</i> (2000); Mathlouthi <i>et al.</i> (2002)  |
| Cevada                                   | Andriquetto <i>et al.</i> (2000); Khalil <i>et al.</i> (2022); Saki <i>et al.</i> (2009)   |
| Farelo de arroz desingordurado           | Albino <i>et al.</i> (1987, 1989); EMBRAPA (1983, 1985, 1991); Franqueira <i>et al.</i> (1982a); Rostagno <i>et al.</i> (1987; 2005)   |
| Farelo de arroz integral                 | Albino <i>et al.</i> (1989, 1992); Andriquetto <i>et al.</i> (2000); EMBRAPA (1985, 1991); Generoso <i>et al.</i> (2008); Junqueira <i>et al.</i> (2009); Mello <i>et al.</i> (2009); Rostagno <i>et al.</i> (1987, 2000, 2005); Vieira, R. A. (2011); Vieira <i>et al.</i> (2014); Xie <i>et al.</i> (2021) |
| Farelo de arroz parborizado              | Dalólio <i>et al.</i> (2019); Vieira, R. A. (2011); Vieira <i>et al.</i> (2014)  |
| Farelo de gérmen de milho                | Lelis <i>et al.</i> (2006); Nagata, A. K. (2004); Ost, P. R. (2004)  |
| Farelo de gérmen de milho                | Lelis <i>et al.</i> (2006); Nagata, A. K. (2004); Ost, P. R. (2004)  |
| Farelo de gérmen de milho desengordurado | Brunelli <i>et al.</i> (2004)  |
| Farelo de gérmen de milho desengordurado | Brunelli <i>et al.</i> (2004)  |
| Farelo de milho com solúveis             | Rochell; Kerr; Dozier III (2011)   |
| Farelo de milho residual                 | Brum <i>et al.</i> (2000); Santos <i>et al.</i> (2013); Valadares <i>et al.</i> (2016)   |
| Farelo de quirera de milho               | Brunelli <i>et al.</i> (2004)  |

Tabela 1B - Alimentos concentrados energéticos de origem vegetal (< 18% FB e < 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

(Continuação)

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Farelo de trigo                | Albino (1989, 1992); Andriquetto <i>et al.</i> (2000); Broch <i>et al.</i> (2015); EMBRAPA (1983, 1985, 1991); Franqueira <i>et al.</i> (1982a); Generoso <i>et al.</i> (2008); Gomes <i>et al.</i> (2008); Mello <i>et al.</i> (2009); Ning <i>et al.</i> (2022); Nunes <i>et al.</i> (2001, 2004a, 2008); Rostagno <i>et al.</i> (1987, 2000, 2005); Schneiders, J. L. (2012); Schneiders <i>et al.</i> (2017); Silva <i>et al.</i> (2020); Troni <i>et al.</i> (2016); Ullah <i>et al.</i> (2016) |
| Farelo proteico de sorgo       | Dalólio <i>et al.</i> (2019)   |
| Farinha de trigo               | Brum <i>et al.</i> (1999); Dunaway; Adedokun (2019); Mingqiang <i>et al.</i> (2023); Nunes <i>et al.</i> (2001)  |
| Gérmen de milho desidratado    | Rochell; Kerr; Dozier III (2011)   |
| Gérmen de milho desingordurado | Rodrigues <i>et al.</i> (2001)   |
| Gérmen de milho fino           | Rodrigues <i>et al.</i> (2001)   |
| Gérmen de milho integral       | Albino <i>et al.</i> (1994); Nagata <i>et al.</i> (2004); Nery <i>et al.</i> (2007); Rodrigues <i>et al.</i> (2001); Rostagno <i>et al.</i> (2005); Santos <i>et al.</i> (2015)  |
| Gérmen de milho inteiro        | Brum <i>et al.</i> (1999); Calderano <i>et al.</i> (2010); Lopes <i>et al.</i> (2019); Santos <i>et al.</i> (2015)   |
| Milheto                        | Albino <i>et al.</i> (1994); Da Silva <i>et al.</i> (2012); Gomes <i>et al.</i> (2008); Nagata, A. K. (2004); Ost, P. R. (2004); Rodrigues <i>et al.</i> (2001); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Silva <i>et al.</i> (2012); Troni <i>et al.</i> (2016); Vieira, R. A. (2011); Vieira <i>et al.</i> (2014)  |
| Milheto                        | Gomes <i>et al.</i> (2008); Murakami <i>et al.</i> (2009); Nagata <i>et al.</i> (2004); Silva <i>et al.</i> (2012); Vieira <i>et al.</i> (2014)  |
| Milheto integral               | Godoy <i>et al.</i> (2021)   |
| Milheto moído                  | Nagata <i>et al.</i> (2004); Ost, P. R. (2004); Vieira <i>et al.</i> (2011)  |

Tabela 1B - Alimentos concentrados energéticos de origem vegetal (< 18% FB e < 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

(Continuação)

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Milho                         | Albino <i>et al.</i> (1987, 1989, 1992, 1994); Alvarenga <i>et al.</i> (2015); Andrade <i>et al.</i> (2016); Andriguetto <i>et al.</i> (1996, 2000); Batista, L. F. (2016); Brum <i>et al.</i> (1999); Campos <i>et al.</i> (2019); Carvalho <i>et al.</i> (2004); Collins <i>et al.</i> (2001); D'Agostini <i>et al.</i> (2001, 2004); De Oliveira (2015); Dourado <i>et al.</i> (2009); Dunaway; Adedokun (2019, 2021); EMBRAPA (1983, 1985, 1991); Franqueira <i>et al.</i> (1982a); Generoso <i>et al.</i> (2008); Giacobbo <i>et al.</i> (2021); Gomes <i>et al.</i> (2008); Henz <i>et al.</i> (2013); Kato <i>et al.</i> (2011); Kato, R. K. (2005); Khalil <i>et al.</i> (2022); Kim <i>et al.</i> (2023); Komatsu (2018); Lasek <i>et al.</i> (2020); Lelis <i>et al.</i> (2006); Leug, Kiarie (2020); Liu <i>et al.</i> (2017); Mathlouthi <i>et al.</i> (2002); Mazzuco <i>et al.</i> (2002a); Mello <i>et al.</i> (2009); Mingqiang <i>et al.</i> (2023); Moritz <i>et al.</i> (2022); Nagata, A. K. (2003, 2004); Nery <i>et al.</i> (2005, 2007); Nunes <i>et al.</i> (2004a, 2008); Ost, P. R. (2004); Oliveira, E. C. de (2019); Panda <i>et al.</i> (2011); Queiroz <i>et al.</i> (2010); Rodrigues <i>et al.</i> (2001); Rostagno <i>et al.</i> (1983, 1987, 1992, 2000, 2005); Santos <i>et al.</i> (2015); Schneiders, J. L. (2012); Schneiders <i>et al.</i> (2017); Silva <i>et al.</i> (2008, 2011); Ullah <i>et al.</i> (2016); Vieira, R. A. (2011); Vieira <i>et al.</i> (2014); Vieira <i>et al.</i> (2007); Vieira, O. R. (2006) |
| Milho alta gordura            | Lelis <i>et al.</i> (2006); Nery <i>et al.</i> (2007)  |
| Milho descascados e degermado | Rochell, Kerr, Dozier III (2011)   |
| Milho gelatinizado            | Albino <i>et al.</i> (1994), Vieira, R. A. (2011); Vieira <i>et al.</i> (2014)   |
| Milho moído                   | Godoy <i>et al.</i> (2021); Vieira, R. A. (2011); Vieira <i>et al.</i> (2014)  |
| Milho pré cozido              | D'Agostini <i>et al.</i> (2001, 2004)  |
| Quirera de arroz              | Calderano <i>et al.</i> (2010); Generoso <i>et al.</i> (2008); Junqueira <i>et al.</i> (2009); Rostagno <i>et al.</i> (1987; 2000, 2005)   |
| Quirera de milho              | Broch <i>et al.</i> (2015); Generoso <i>et al.</i> (2008); Gomes <i>et al.</i> (2008); Mello <i>et al.</i> (2009); Nagata <i>et al.</i> (2004); Ost, P. R. (2004); Troni <i>et al.</i> (2016), Ullah <i>et al.</i> (2016)  |
| Sorgo                         | Albino <i>et al.</i> (1994); Alvarenga <i>et al.</i> (2015), Andriguetto <i>et al.</i> (2000); Antunes <i>et al.</i> (2006); Brum <i>et al.</i> (2000); Campos <i>et al.</i> (2017), Franqueira <i>et al.</i> (1982a); Generoso <i>et al.</i> (2008); Gomes <i>et al.</i> (2008); Khalil <i>et al.</i> (2022); Mello <i>et al.</i> (2009), Moritz <i>et al.</i> (2022); Nagata, A. K. (2004); Nunes <i>et al.</i> (2004a, 2008); Ost, P. R. (2004); Queiroz, A. P. L. B. (2010); Santos <i>et al.</i> (2013), Santos <i>et al.</i> (2015); Vieira <i>et al.</i> (2014)   |
| Sorgo baixo tanino            | Albino <i>et al.</i> (1989); Brum <i>et al.</i> (2000); EMBRAPA (1985, 1991); Rostagno <i>et al.</i> (1987, 2000, 2005);   |
| Sorgo integral                | Godoy <i>et al.</i> (2021)   |
| Sorgo moído                   | Nagata <i>et al.</i> (2004); Ost, P. R. (2004)   |
| Sorgo moído                   | Godoy <i>et al.</i> (2021)   |

Tabela 1B - Alimentos concentrados energéticos de origem vegetal (< 18% FB e < 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

(Conclusão)

|             |   |
|-------------|---|
| Trigale     | Andriguetto <i>et al.</i> (2000); Broch <i>et al.</i> (2015); Brum <i>et al.</i> (1999, 2000); EMBRAPA (1991); Rostagno <i>et al.</i> (2005);   |
| Trigo grão  | Andriguetto <i>et al.</i> (2000); Azhar <i>et al.</i> (2019); Ball <i>et al.</i> (2013); Broch <i>et al.</i> (2015); Brum <i>et al.</i> (1999; 2000); Del Álamo <i>et al.</i> (2008); Dunaway, Adedokun (2019, 2021); Gomes <i>et al.</i> (2008); Khalil <i>et al.</i> (2022); Kim <i>et al.</i> (2023); Komatsu <i>et al.</i> (2019); Lasek <i>et al.</i> (2011); Lasek <i>et al.</i> (2020); Lu <i>et al.</i> (2020); Mazzuco <i>et al.</i> (2000, 2002b); Ning <i>et al.</i> (2022); Nunes <i>et al.</i> (2001, 2004a, 2008); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Saki <i>et al.</i> (2009); Seyedi <i>et al.</i> (2013); Yegani <i>et al.</i> (2013) |
| Trigo moído | EMBRAPA (1985); Saki <i>et al.</i> (2009)   |
| Triguilho   | EMBRAPA (1991); Nunes <i>et al.</i> (2001); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005)   |

Tabela 2B - Alimentos concentrados proteicos de origem vegetal (< 18% FB e > 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

(Continua)

| <b>Alimentos proteicos</b>         | <b>Referências</b>   |
|------------------------------------|--|
| Amido de milho                     | D'Agostini <i>et al.</i> (2004)  |
| Concentrado proteico de soja       | Brumano <i>et al.</i> (2006); Calderano <i>et al.</i> (2010), Lima <i>et al.</i> (1989); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Scottá, B. A. (2011); Scottá <i>et al.</i> (2016)  |
| DDGS                               | Abdollahi <i>et al.</i> (2021); Caldas <i>et al.</i> (2020); Cortes-Cuevas <i>et al.</i> (2019); Cozannet <i>et al.</i> (2010); Dalólio <i>et al.</i> (2020); Meloche <i>et al.</i> (2013, 2014); Rochell, Kerr, Dozier III (2011); Santos <i>et al.</i> (2019); Schone <i>et al.</i> (2017) |
| Farelo de algodão                  | Albino <i>et al.</i> (1994); Brumano <i>et al.</i> (2006); Carvalho <i>et al.</i> (2010); EMBRAPA (1983, 1985, 1991); Franqueira <i>et al.</i> (1982b); Rostagno <i>et al.</i> (1987, 2000, 2005); Samay, A. M. A. T (2012); Tavares-Samay <i>et al.</i> (2019)                              |
| Farelo de algodão (28% PB)         | Generoso <i>et al.</i> (2008)  |
| Farelo de algodão (40% PB)         | Santos <i>et al.</i> (2013)  |
| Farelo de algodão com casca        | Santos <i>et al.</i> (2013)  |
| Farelo de algodão extrusado        | Santos <i>et al.</i> (2013)  |
| Farelo de canola                   | D'Agostini <i>et al.</i> (2004)  |
| Farelo de girassol                 | Da Silva <i>et al.</i> (2012)  |
| Farelo de glúten de milho (21% PB) | Calderano <i>et al.</i> (2010); Nunes <i>et al.</i> (2008)   |

Tabela 2B - Alimentos concentrados proteicos de origem vegetal (< 18% FB e > 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

(Continuação)

|   |   |
|---|---|
| Farelo de soja                          | Abdollahi <i>et al.</i> (2021); Albino <i>et al.</i> (1987, 1989, 1992, 1994); Alvarenga <i>et al.</i> (2015); Andrade <i>et al.</i> (2016); Bertechini <i>et al.</i> (2019); Calderano <i>et al.</i> (2010); Chen <i>et al.</i> (2013); De Oliveira (2015); Dourado <i>et al.</i> (2009); Dunaway, Adedokun (2021); EMBRAPA (1983, 1985, 1991); Erdaw <i>et al.</i> (2017); Franqueira <i>et al.</i> (1982b); Generoso <i>et al.</i> (2008); Kato, R. K. (2005); Kim <i>et al.</i> (2023); Liu <i>et al.</i> (2017); Mello <i>et al.</i> (2009); Nunes <i>et al.</i> (2005); Oliveira, E. C. de (2019); Ost, P. R. (2004); Perryman, Dozier III (2012); Rodrigues <i>et al.</i> (2002a); Rostagno <i>et al.</i> (1983, 1987, 1992, 2000, 2005); Santos <i>et al.</i> (2015); Schneiders, J. L. (2012); Scottá, B. A. (2011); Scottá <i>et al.</i> (2016); Silva <i>et al.</i> (2022); Soares, K. R. (2004); Troni <i>et al.</i> (2016); Yaghobfar, A. (2013); Zonta <i>et al.</i> (2004, 2006); Zonta, M. C. M. (2004) |
| Farelo de soja alta proteína            | Lelis <i>et al.</i> (2006)  |
| Farelo de soja reintegrada              | Café <i>et al.</i> (2000); Freitas <i>et al.</i> (2005)   |
| Farelo de soja texturizada              | Rodrigues <i>et al.</i> (2002a)   |
| Farelo residual de milho                | Valadares <i>et al.</i> (2016)  |
| Farinha de gérmen de milho              | Rochell, Kerr, Dozier III (2011)  |
| Farinha de glúten de milho              | Albino <i>et al.</i> (1987, 1989); Andriguetto <i>et al.</i> (2000); EMBRAPA (1985); Rochell, Kerr, Dozier III (2011); Rodrigues <i>et al.</i> (2001); Rostagno <i>et al.</i> (1987, 2000, 2005)  |
| Farinha de Glúten de milho (60% PB)     | Alvarenga <i>et al.</i> (2015); Brumano <i>et al.</i> (2006); Da Silva <i>et al.</i> (2012); Latifi <i>et al.</i> (2023); Mingqiang <i>et al.</i> (2023); Rochell, Kerr, Dozier III (2011); Silva <i>et al.</i> (2012)  |
| Farinha de soja alta proteína           | Nery <i>et al.</i> (2007)   |
| Farinha de soja extrusada semi-integral | Scottá, B. A. (2011); Scotta <i>et al.</i> (2016)   |
| Gérmen de milho                         | Albino <i>et al.</i> (1994)   |
| Gérmen de trigo                         | Borges <i>et al.</i> (2003); Nunes <i>et al.</i> (2001); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005)  |
| Glúten de milho                         | Albino <i>et al.</i> (1994); EMBRAPA (1991)   |
| Glúten de trigo                         | Scotta <i>et al.</i> (2016)   |

Tabela 2B - Alimentos concentrados proteicos de origem vegetal (< 18% FB e > 20% PB) catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.  
(Conclusão)

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| Soja extrusada                     | Café <i>et al.</i> (2000); Freitas <i>et al.</i> (2005); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Zonta <i>et al.</i> (2004)   |
| Soja grão                          | Agunbiade (2000); Andriquetto <i>et al.</i> (2000); Dunaway, Adedokun (2019); Lelis <i>et al.</i> (2006); Leung, Kiarie (2020); Mingqiang <i>et al.</i> (2023); Schneiders <i>et al.</i> (2017)  |
| Soja integral                      | Abdollahi <i>et al.</i> (2021, 2022); Carvalho <i>et al.</i> (2008); Erdaw <i>et al.</i> (2017); Santos <i>et al.</i> (2015); Zonta <i>et al.</i> (2004)   |
| Soja integral desativada           | Freitas <i>et al.</i> (2005); Nunes <i>et al.</i> (2015); Schneiders, J. L. (2012)   |
| Soja integral desativada com casca | Calderano <i>et al.</i> (2010); Schneiders <i>et al.</i> (2017); Scottá, B. A. (2011); Scotta <i>et al.</i> (2016)   |
| Soja integral desativada sem casca | Scottá, B. A. (2011); Scottá <i>et al.</i> (2016)  |
| Soja integral extrusada            | Café <i>et al.</i> (2000); Calderano <i>et al.</i> (2010); Freitas <i>et al.</i> (2005); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Zonta <i>et al.</i> (2004, 2006)   |
| Soja micronizada integral          | Albino <i>et al.</i> (1994); Alvarenga <i>et al.</i> (2015); Calderano <i>et al.</i> (2010); Ost, P. R. (2004); Rodrigues <i>et al.</i> (2002a); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Soares, K. R. (2004); Zonta <i>et al.</i> (2004, 2006)   |
| Soja tostada inteira               | Albino <i>et al.</i> (1994); Alvarenga <i>et al.</i> (2015); Café <i>et al.</i> (2000); Dalólio <i>et al.</i> (2016); EMBRAPA (1991); Nery <i>et al.</i> (2007); Ost, P. R. (2004); Rodrigues <i>et al.</i> (2002a); Rostagno <i>et al.</i> (2000, 2005); Soares, K. R. (2004); Troni <i>et al.</i> (2016); Zonta <i>et al.</i> (2004) |
| Torta de soja extrusada            | De Lima <i>et al.</i> (2018)   |

Tabela 3B - Alimentos concentrados proteicos de origem animal catalogados no trabalho, com suas respectivas fontes de referência obtidas na literatura nacional e internacional no período de 1982 a 2023.

| <b>Alimentos proteicos de origem animal</b> | <b>Referências</b>  |
|---|---|
| Farinha de carne e ossos                    | Andrade <i>et al.</i> (2016); Brumano <i>et al.</i> (2006); Da Silva <i>et al.</i> (2012); Da Silva <i>et al.</i> (2021); Eyng <i>et al.</i> (2011); Nery, L. R. (2005); Nunes <i>et al.</i> (2005, 2006); Oliveira, D. H. de (2016); Oliveira <i>et al.</i> (2018); Olukosi, Adeola (2010); Satorelli <i>et al.</i> (2003); Schneiders, J. L. (2012); Silva <i>et al.</i> (2012); Silva <i>et al.</i> (2020); Troni <i>et al.</i> (2016); Tucci <i>et al.</i> (2003); Vieites <i>et al.</i> (2000)           |
| Farinha de <i>Hermetia illucens</i>         | Kierończyk <i>et al.</i> (2022); Marco <i>et al.</i> (2015)   |
| Farinha de penas                            | Andrade <i>et al.</i> (2016); Mello <i>et al.</i> (2009); Mingqiang <i>et al.</i> (2023); Nascimento <i>et al.</i> (2002); Nery, L. R. (2005); Nunes <i>et al.</i> (2005, 2006)   |
| Farinha de penas e sangue                   | Troni <i>et al.</i> (2016)  |
| Farinha de <i>Tenebrio molitor</i>          | Benzertiha <i>et al.</i> (2019); Dalmoro (2020); Kieronczyk <i>et al.</i> (2018); Marco <i>et al.</i> (2015); Mwaniki <i>et al.</i> (2019)  |
| Farinha de vísceras de aves                 | Andrade <i>et al.</i> (2016); D' Agostini <i>et al.</i> (2001); Da Silva <i>et al.</i> (2012); Da Silva <i>et al.</i> (2021); D'Agostini <i>et al.</i> (2004); Mahmood <i>et al.</i> (2017); Mello <i>et al.</i> (2009); Nascimento <i>et al.</i> (2002); Nery, L. R. (2005); Nunes <i>et al.</i> (2005, 2006); Oliveira <i>et al.</i> (2018); Schneiders, J. L. (2012); Silva <i>et al.</i> (2001); Silva <i>et al.</i> (2020); Silva, E. P. (2009); Troni <i>et al.</i> (2016); Zarei <i>et al.</i> (2014); |
| Farinha de vísceras de aves alta gordura    | Brumano <i>et al.</i> (2006)  |
| Farinha de vísceras suínas                  | Da Silva <i>et al.</i> (2021); Kim <i>et al.</i> (2023); Nascimento <i>et al.</i> (2002); Nunes <i>et al.</i> (2006)  |
| Farinha de <i>Zophobas morio</i>            | Benzertiha <i>et al.</i> (2019)   |

**ANEXO C - Referências bibliográficas utilizadas na meta-análise**

ABDOLLAHI, M. R. *et al.* Application of apparent metabolizable energy versus nitrogen-corrected apparent metabolizable energy in poultry feed formulations: A continuing conundrum. **Animals**, Switzerland, v. 11, p. 2174, 2021.

ABDOLLAHI, M. R. *et al.* Influence of conditioning and expansion characteristics on the apparent metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility of full-fat soybeans for broilers. **Animals**, Switzerland, v. 12, p. 1021, 2022.

AGUNBIADE, J. Utilização de duas variedades de soja integral e simulada em dietas de farinha e peletizadas por frangos de corte. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, United States, v. 80, p. 1529-1537, 2000.

ALBINO, L. F. T. *et al.* Análise individual versus “pool” de excreta na determinação da energia bruta em ensaio de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 467-473, 1994.

ALBINO, L. F. T. *et al.* Determinação dos valores de energia metabolizável aparente e verdadeira de alguns alimentos para aves, usando diferentes métodos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 21, n. 6, p. 1047-1058, 1992.

ALBINO, L. F. T. *et al.* Energia metabolizável aparente e verdadeira de alguns alimentos determinados com galos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 12, p. 1433-1437, 1989.

ALBINO, L. F. T. *et al.* Valores energéticos e de triptofano de alguns alimentos determinados em aves jovens e adultas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 11/12, p. 1301-1306, 1987.

ALVARENGA, R. *et al.* Validation of Prediction Equations of Energy Values of a Single Ingredient or Their Combinations in Male Broilers. **Animal Bioscience**, Korea, v. 28, n. 9, p. 1335-1344, 2015.

ANDRADE, R. C. *et al.* Avaliação da correção da energia pelo balanço de nitrogênio em alimentos para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 68, n. 2, p. 497-505, 2016.

ANDRIGUETTO, J. M. *et al.* **Normas e padrões de nutrição e alimentação animal**. Brasília: Ministério da agricultura, do abastecimento e da reforma agrária. MAARA, Cromográfica Editora Ltda, Revisão de 2000. p. 152.

ANDRIGUETTO, J. M. *et al.* **Normas e padrões de nutrição e alimentação animal**. Brasília: Ministério da agricultura, do abastecimento e da reforma agrária. MAARA, Cromográfica Editora Ltda, Revisão de 1996. p. 145.

ANTUNES, R. C. *et al.* Valor nutritivo de grãos de sorgo com diferentes texturas do endosperma para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 58, n. 5, p. 877-883, 2006.

- AZHAR, M. R. *et al.* Wheat sample affects growth performance and the apparent metabolisable energy value for broiler chickens. **British Poultry Science**, Oxford, v. 60, n. 4, p. 457–466, 2019.
- BALL, M. E *et al.* Chemical and physical predictors of the nutritive value of wheat in broiler diets. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, Korea, v. 26, n. 1, p. 97-107, 2013.
- BARTECZKO, J. *et al.* Chemical composition and nutritional value of different wheat cultivars for broiler chickens. **Journal of Animal and Feed Sciences**, Poland, v. 18, n. 1, p. 124-131, 2009.
- BATISTA, L. F. **Avaliação nutricional da qualidade do milho para frangos de corte em Goiás**. 2016. 73 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2016.
- BERTECHINI, A. G. *et al.* Metabolizable energy values of soybean meals and soybean oil for broilers at different ages. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 41, p. e44540, 2019.
- BORGES, F. M. O. *et al.* Equações de regressão para estimar valores energéticos de grão de trigo e seus subprodutos para frangos de corte, a partir de análises químicas. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 55, n. 6, p. 734-746, 2003.
- BROCH, J. *et al.* Chemical composition and energetic values of wheat and its sub-products for broiler chicken. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 5, p. 3481–3488, 2015.
- BRUM, P. A. R. de *et al.* Composição química e energia metabolizável de ingredientes para aves. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2000.
- BRUM, P. A. R. de *et al.* Determination of chemical composition and metabolizable energy values of feed ingredients for poultry. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, Campinas, v. 1, n. 3, p. 187-192, 1999.
- BRUMANO, G. *et al.* Composição química e valores de energia metabolizável de alimentos proteicos determinados com frangos de corte em diferentes idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2297-2302, 2006.
- BRUNELLI, S. R. *et al.* Gérmen de milho desengordurado na alimentação de frangos de corte. *In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 41, 2004, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande, MS: SBZ, 2004.
- CAFÉ, M. B. *et al.* Determinação do Valor Nutricional das Sojas Integrais Processadas para Aves. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 67-74, 2000.
- CALDAS, J. V. *et al.* Corn distillers dried grains with solubles: nutrient analysis, metabolizable energy, and amino acid digestibility in broilers. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 29, n. 4, p. 1068-1083, 2020.

CALDERANO, A. A. *et al.* Composição química e energética de alimentos de origem vegetal determinada em aves de diferentes idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 320-326, 2010.

CAMPOS, C. F. A. *et al.* Avaliação nutricional do milho cultivado com diferentes adubos orgânicos para frangos de crescimento lento. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 2, p. 895-908, 2019.

CAMPOS, C. F. A. *et al.* Avaliação nutricional do sorgo cultivado com diferentes adubos orgânicos para frangos de crescimento lento. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 5, p. 3341-3352, 2017.

CARVALHO, A. d'Á. *et al.* Digestibilidade aparente de dietas e metabolismo de frangos de corte alimentados com dietas contendo soja integral processada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 477-483, 2008.

CARVALHO, C. B. de *et al.* Avaliação nutricional do farelo de algodão de alta energia no desempenho produtivo e características de carcaças de frangos de corte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 5, p. 1166-1172, 2010.

CARVALHO, D. C. O. *et al.* Composição química e energética de amostras de milho submetidas a diferentes temperaturas de secagem e períodos de armazenamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 358-364, 2004.

CHEN, Xi. *et al.* Nutritional evaluation of new reduced oligosaccharide soybean meal in poultry. **Poultry Science**, Champaign, v. 92, n. 7, p. 1830-1836, 2013.

COLLINS, N. E. *et al.* Influence of yellow dent corn hybrids having different kernel characteristics yet similar nutrient composition on broiler production. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 10, n. 3, p. 228-235, 2001.

CORTES-CUEVAS, A. *et al.* Phosphorus bioavailability, amino acid digestibility and metabolizable energy of broiler chick diets supplemented with low-oil distiller's dried grains with solubles. **Veterinaria México OA**, Ciudad de México, v. 6, n. 3, p. 00004, 2019.

COZANNET, P. *et al.* Energy value of wheat dried distillers' grains with solubles in roosters, broilers, layers, and turkeys. **Poultry Science**, Champaign, v. 89, n. 10, p. 2230-41, 2010.

D'AGOSTINI, P. *et al.* Valores de composição química e energética de alguns alimentos para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 128-134, 2004.

D'AGOSTINI, P. *et al.* Valores de composição química e energética de alguns alimentos para aves. *In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 38., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBZ, 2001. p. 796- 798.

DA SILVA, E. A. *et al.* Chemical composition and metabolizable energy values of feedstuffs for broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 648-654, 2012.

DA SILVA, J. M. S. *et al.* Effect of protease supplementation on the digestibility of amino acids in animal-origin meals for broiler diets. **Czech Journal Animal Science**, Czechia, v. 66, n. 1, p. 29-37, 2021.

DALÓLIO, F. S. *et al.* Metabolizable energy and amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles with or without enzymes supplementation in broiler diets. **Journal of Applied Poultry Research**, United, States, v. 29, n. 4, p. 863-874, 2020.

DALÓLIO, F. S. *et al.* Metabolizable energy and digestible amino acids of full-fat soybean without or with protease supplementation in diets for broilers. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 5, p. 565-576, 2016.

DALÓLIO, F. S. *et al.* Valores energéticos e digestibilidade ileal estandardizada de aminoácidos de alguns alimentos para frangos de corte. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 6, p. 2651–2662, 2019.

DE LIMA, M. F. *et al.* Metabolizable energy and amino acid digestibility of soybean cake subjected to different dry extrusion temperatures for broilers. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 47, p. e20180057, 2018.

DEL ALAMO, G. A. *et al.* Effect of wheat cultivar and enzyme addition to broiler chicken diets on nutrient digestibility, performance, and apparent metabolizable energy content. **Poultry Science**, Champaign, v. 87, n. 4, p. 759-767, 2008.

DOURADO, L. R. B. *et al.* Corn and soybean meal metabolizable energy with the addition of exogenous enzymes for poultry. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 11, n. 1, 2009.

DUNAWAY, A.; ADEDOKUN, S. A. Coccidia vaccine challenge and exogenous enzyme supplementation in broiler chicken. Effect on digesta viscosity, diet energy utilization, and apparent metabolizable energy value of wheat. **Animals**, Switzerland, v. 11, p. 641, 2021.

DUNAWAY, A.; ADEDOKUN, S. A. Metabolizable energy values of corn and wheat middlings in broiler chickens. **Canadian Journal of Animal Science**, Canadian, v. 99, n. 4, p. 905-913, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de pesquisa de soja e arroz. **Tabela de composição química e valores energéticos para suínos e aves**. Concórdia: CNPSA, 1983. (Documentos)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de pesquisa de soja e arroz. **Tabela de composição química e valores energéticos para suínos e aves**. 2. ed. Concórdia: CNPSA, 1985. 28 p. (Documentos).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de pesquisa de soja e arroz. **Tabela de composição química e valores energéticos para suínos e aves**. 3. ed. Concórdia: CNPSA, 1991. 97 p. (Documentos, n. 19).

ERDAW, M. M., *et al.* Apparent and standardized ileal nutrient digestibility of broiler diets containing varying levels of raw full-fat soybean and microbial protease. **Journal of Animal Science and Technology**, Korea, v. 59, n. 23, 2017.

EYNG, C. *et al.* Composição química, valores energéticos e digestibilidade verdadeira dos aminoácidos de farinhas de carne e ossos e de peixe para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 3, p. 575-580, 2011.

FRANQUEIRA, J. M. *et al.* Composição química e energia metabolizável determinada em duas idades de frangos de corte de seis alimentos proteicos. *In*: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1982, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBZ, 1982b. p. 5.

FRANQUEIRA, J. M. *et al.* Composição química e energia metabolizável determinada em duas idades de frangos de corte de cinco alimentos ricos em carboidratos. *In*: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1982, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBZ, 1982a. p. 3.

FREITAS, E. R. *et al.* Determinação da digestibilidade dos nutrientes e da energia metabolizável da semente e do farelo de girassol para frangos de corte. *In*: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 41., 2004, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande, MS: SBZ, 2004.

FREITAS, E. R. *et al.* Efeito do processamento da soja integral sobre a energia metabolizável e a digestibilidade dos aminoácidos para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1938-1949, 2005.

GENEROSO, R. A. R. *et al.* Composição química e energética de alguns alimentos para frangos de corte em duas idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 7, p. 1251-1256, 2008.

GIACOBBO, F. C. N. *et al.* Composition and availability of nutrients of three corn hybrids dried at different temperatures in the diets of broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 50, p. e20210035, 2021.

GODOY, H. B. R. de *et al.* Effect of grain particle size on energy values and chemical components of diets for Label Rouge broilers. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 51, n. 12, p. e20200410, 2021.

GOMES, P. C. *et al.* Determinação da composição química e energética do milho e sua utilização em rações para frangos de corte de 1 a 21 dias de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 9, p. 1617-1621, 2008.

HENZ, J. R. *et al.* Valores energéticos de diferentes cultivares de milho para aves. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2403-2414, 2013.

JUNQUEIRA, O. M. *et al.* Composição química, valores de energia metabolizável e aminoácidos digestíveis de subprodutos do arroz para frangos de corte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2497-2503, 2009.

KATO, R. K. *et al.* Metabolizable energy of corn hybrids for broiler chickens at different ages. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1218-1226, 2011.

KATO, R. K. **Valores de energia metabolizável de ingredientes para frangos de corte em diferentes idades.** 2005. 133 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2005.

KHALIL, M. M. *et al.* Influence of broiler age on the apparent metabolizable energy of cereal grains determined using the substitution method. **Animals**, Switzerland, v. 12, n. 183, 2022.

KIM, E. *et al.* Research Note: Impact of Eimeria on apparent retention of components and metabolizable energy in broiler chickens fed single or mixture of feed ingredients-based diets. **Poultry Science**, Champaign, v. 102, n. 4, p. 102526, 2023.

KOMATSU, G. S. N. **Características químicas e físicas de diferentes tipos de milho segregados em mesa densimétrica e sua influência sobre o valor nutricional para frangos de corte.** 2018. 66 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2018.

KOMATSU, G. S. N. *et al.* Metabolizable energy for chickens of high- and low-density corn fractions segregated in densimetric table. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 21, n. 02, p. eRBCA-2019-0828, 2019.

LASEK, O. *et al.* Nutrient Content of Different Wheat and Maize Varieties and Their Impact on Metabolizable Energy Content and Nitrogen Utilization by Broilers. **Animals**, Switzerland, v. 10, p. 907, 2020.

LASEK, O. *et al.* Nutritional and energy value of wheat cultivars for broiler chickens. **Journal of Animal and Feed Sciences**, Poland, v. 20, n. 2, p. 246-258, 2011.

LATIFI, M. *et al.* Determination of prediction equations for apparent metabolizable energy corrected for nitrogen of corn gluten meal and canola meal in broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 102, n. 5, p. 102587, 2023.

LELIS, G. R. *et al.* **Valores de energia metabolizável de alguns alimentos de origem vegetal para frangos de corte.** In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 43., 2006, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa, PB: SBZ, 2006.

LEUNG, H.; KIARIE, E. G. Standardized ileal digestibility of amino acids and apparent metabolizable energy in corn and soybean meal for organic broiler chicken production in Ontario. **Canadian Journal of Animal Science**, Canadian, v. 100, n. 3, p. 447-454, 2020.

LIMA, I. L. *et al.* Composição química e valores energéticos de alguns alimentos determinados com pintos e galos, utilizando duas metodologias. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 18, n. 6, p. 547-556, 1989.

LIU, W. *et al.* Apparent metabolizable and net energy values of corn and soybean meal for broiler breeding cocks. **Poultry Science**, Champaign, v. 96, n. 1, p. 135-143, 2017.

LOPES, E. C. *et al.* Performance and carcass characteristics of broilers fed whole corn germ. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 48, p. e20180247, 2019.

- LU, P. *et al.* Standardized ileal digestible amino acid and metabolizable energy content of wheat from different origins and the effect of exogenous xylanase on their determination in broilers. **Poultry Science**, Champaign, v. 99, n. 2, p. 992-1000, 2020.
- MAHMOOD, T. *et al.* Exogenous protease supplementation of poultry by-product meal-based diets for broilers: Effects on growth, carcass characteristics and nutrient digestibility. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, Germany, v. 02, p. e233–e241, 2018.
- MATHLOUTHI, N. *et al.* Xylanase and  $\beta$ -glucanase supplementation improve conjugated bile acid fraction in intestinal contents and increase villus size of small intestine wall in broiler chickens fed a rye-based diet. **Journal of Animal Science**, Urbana, v. 80, n. 11, p. 2773–2779, 2002.
- MAZZUCO, H. *et al.* Composição química e energética do milho com diversos níveis de umidade na colheita e diferentes temperaturas de secagem para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 2216-2220, 2002. 2002a.
- MAZZUCO, H. *et al.* Influência do estágio de maturação na colheita e temperatura de secagem de grãos de trigo sobre os valores de energia metabolizável aparente corrigida (EMAc) em frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 2221-2226, 2002. 2002b.
- MAZZUCO, H. *et al.* Valor energético para frangos de corte de trigo moído ou inteiro colhido com diferentes umidades e submetidos a diferentes temperaturas de secagem. *In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 37., 2000, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: SBZ, 2000.
- MELLO, H. H. de C. *et al.* Valores de energia metabolizável de alguns alimentos obtidos com aves de diferentes idades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 863-868, 2009.
- MELOCHE, K. J. *et al.* Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. **Poultry Science**, Champaign, v. 92, n. 12, p. 3176-3183, 2013.
- MELOCHE, K. J. *et al.* Validation of prediction equations for apparent metabolizable energy of corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks. **Poultry Science**, Champaign, v. 93, n. 6, p. 1428-1439, 2014.
- MORITZ, A. **Effects of Tannin-free Grain Sorghum Varieties on the Metabolizable Energy, Performance, and Intestinal Health of Poultry**. 2022. 193 p. Dissertations (PhD in Animal and Veterinary Sciences) - Graduate School of Clemson University, South Carolina, USA, 2022.
- MURAKAMI, A. E. *et al.* Avaliação econômica e desempenho de frangos de corte alimentados com diferentes níveis de milheto em substituição ao milho. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 31, n. 1, p. 31-37, 2009.

NAGATA, A. K. *et al.* Energia metabolizável de alguns alimentos energéticos para frangos de corte, determinada por ensaios metabólicos e por equações de predição. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 669-677, 2004.

NAGATA, A. K. *et al.* Energia metabolizável de alguns alimentos energéticos para frangos de corte, determinada por ensaios metabólicos e por equações de predição. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 668-677, 2004.

NAGATA, A. K. **Valores energéticos de alguns alimentos, determinados com frangos de corte e por equações de predição.** 2003. 35 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2003.

NASCIMENTO, A. H. do *et al.* Composição química e valores de energia metabolizável das farinhas de penas e vísceras determinados por diferentes metodologias para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 3 suppl, p. 1409-1417, 2002.

NERY, L. R. *et al.* Composição química e valores energéticos de alguns alimentos usados na alimentação de frangos de corte. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, Campinas, v. 7, p. 73, 2005. (Suplemento).

NERY, L. R. *et al.* Valores de energia metabolizável de alimentos determinados com frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1354-1358, 2007.

NERY, L. R. **Valores de energia metabolizável e de aminoácidos digestíveis de alguns alimentos para aves.** 2005. 87 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

NING, R. *et al.* Evaluating and predicting net energy value of wheat and wheat bran for broiler chickens. **Animal Bioscience**, Korea, v. 35, n. 11, p. 1760-1770, 2022.

NUNES, R. V. *et al.* Avaliação nutricional e energética da soja integral desativada para aves. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 2, p. 143 –151, 2015.

NUNES, R. V. *et al.* Coeficientes de metabolizabilidade da energia bruta de diferentes ingredientes para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 89-94, 2008.

NUNES, R. V. *et al.* Coeficientes de metabolizabilidade da energia bruta de diferentes ingredientes para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 89-94, 2008.

NUNES, R. V. *et al.* Composição bromatológica, energia metabolizável e equações de predição da energia do grão e de subprodutos do trigo para pintos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 785-793, 2001.

NUNES, R. V. *et al.* Composição química e valores energéticos de alguns alimentos para aves. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, Campinas, n. 6, p. 123, 2004. Suplemento.

NUNES, R. V. *et al.* Composição química e valores energéticos de alimentos proteicos para aves. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, Campinas, n. 7, p. 129, 2005. Suplemento.

- NUNES, R. V. *et al.* Valores energéticos de diferentes alimentos de origem animal para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, n. 4 suppl, p. 1752-1757, 2006.
- NUNES, R. V. *et al.* Valores energéticos de subprodutos de origem animal para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1217-1224, 2005.
- OLIVEIRA, C. R. C. de *et al.* Prediction equations for energy values of animal meals obtained using meta-analysis. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 47, p. e20180098, 2018.
- OLIVEIRA, D. H. de. **Valores energéticos da farinha de carne e ossos e do óleo de soja para diferentes espécies e categorias de aves.** 2016. 44 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- OLIVEIRA, E. C. de. **Energia metabolizável de alimentos determinada in vivo e por métodos indiretos para diferentes categorias de aves.** 2019. 102 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- OLUKOSI, O. A.; ADEOLA, O. Metabolizable energy content of meat and bone meal in corn-soybean meal or corn, wheat and soybean meal diets for broilers. **Journal of Poultry Science**, Japan, v. 47, p. 244-249, 2010.
- OST, P. R. **Energia metabolizável verdadeira e aminoácidos digestíveis de alguns alimentos, determinados com galos adultos e por equações de predição.** 2004. 181 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2004.
- PANDA, A. K. *et al.* Nutritional evaluation and utilization of quality protein maize, Nityashree hybrid maize, and normal maize in broiler chickens. **British Poultry Science**, Oxford, v. 52, n. 5, p. 632–638, 2011.
- PERRYMAN, K. R.; DOZIER III, W. A. Apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acid digestibility of low and ultra-low oligosaccharide soybean meals fed to broiler chickens. **Poultry Science**, Champaign, v. 91, n. 10, p. 2556-2563, 2012.
- QUEIROZ, A. P. L. B. de. **Energia metabolizável de amostras de milho e sorgos para frangos de corte em diferentes idades.** 2010. 46 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- ROCHELL, S. J.; KERR, B.J.; Dozier III, W. A. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. **Poultry Science**, Champaign, v. 90, n. 9, p. 1999-2007, 2011.
- RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos da soja e subprodutos da soja, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 1771-1782, 2002.

RODRIGUES, P. B. *et al.* Valores energéticos do milho, do milho e subprodutos do milho, determinados com frangos de corte e galos adultos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1767-1778, 2001.

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Composição de alimentos e exigências nutricionais de aves e suínos (Tabelas Brasileiras)**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1987. 59 p.

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Composição de alimentos e exigências nutricionais de aves e suínos (Tabelas Brasileiras)**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1983. 59 p.

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Composição de alimentos e exigências nutricionais de aves e suínos (Tabelas Brasileiras)**. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1992. 61 p.

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. Viçosa: UFV. Departamento de Zootecnia, 2005. 186 p.

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. Viçosa: UFV. Departamento de Zootecnia, 2000. 141 p.

SAKI, A. A. *et al.* Composition of metabolic energy value and amino acid digestibility of wheat, wheat screening and barley between ileum and faces of broiler chicken. **Journal of Poultry Science**, Japan, v. 46, n. 3, p. 188-192, 2009.

SAMAY, A. M. A. T. **Avaliação nutricional e energética do farelo de algodão com ou sem suplementação enzimática para frangos de corte**. 2012. 119 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Zootecnia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

SANTOS, F. R. *et al.* Composição nutricional e valores energéticos determinados com frangos de corte de coprodutos do processamento do etanol de milho. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 71, n. 5, p. 1759-1763, 2019.

SANTOS, F. R. *et al.* Composição nutricional e valores energéticos determinados com frangos de corte de coprodutos do processamento do etanol de milho. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 71, n. 5, p. 1759-1763, 2019.

SANTOS, F. R. *et al.* Values of metabolizable energy and metabolism of nutrients for slow- and fast-growing birds at different ages. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 17, n. 4, p. 517-522, 2015.

SANTOS, M. J. B. dos *et al.* Chemical composition and metabolizable energy values of alternative ingredients for broilers. **Brazilian Animal Science**, Goiânia, v. 14, n. 1, p. 32-40, 2013.

SANTOS, M. J. B. dos. *et al.* Composição química e valores de energia metabolizável de ingredientes alternativos para frangos de corte. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 14, n. 1, p. 32-40, 2013.

SARTORELLI, S. A. *et al.* Nutritional and microbiological evaluation of meat and bone meal produced in the state of Minas Gerais. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 51-60, 2003.

SCHNEIDERS, J. L. *et al.* Coeficientes energéticos de alimentos de origem vegetal determinados com frangos de corte em diferentes idades. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 4, p. 2119–2128, 2017.

SCHNEIDERS, J. L. **Valores energéticos de alimentos determinados com aves em diferentes idades**. 2012. 72 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2012.

SCHONE, R. A. *et al.* Resíduo seco de destilaria com solúveis (DDGS) na alimentação de frangos de corte (22-42 dias). **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 48, n. 3, p. 548-557, 2017.

SCOTTÁ, B. A. **Energetic and digestible amino acids values in some broiler chicken feeds**. 2011. 71 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Animais Domésticos; Nutrição e Alimentação Animal; Pastagens e Forragicultura) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SCOTTÁ, B. A. *et al.* Determinação da composição química e dos valores de energia metabolizável de alguns alimentos proteicos para frangos de corte. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 17, n. 4, p. 501-508, 2016.

SEYEDI, A. H. *et al.* Using complete diet and Sibbald methods to determine the metabolizable energy of 5 Iranian wheat varieties. **Journal of Applied Poultry Research**, United States, v. 22, n. 3, p. 388-395, 2013.

SILVA, C. S. *et al.* Avaliação de milhos de diferentes densidades para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, n. 7, p. 1554-1561, 2011.

SILVA, C. S. *et al.* Valores nutricionais de milhos de diferentes qualidades para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 883-889, 2008.

SILVA, D. L. *et al.* Energia metabolizável e aminoácidos digestíveis de coprodutos de trigo e de farinhas de origem animal em dietas para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 72, n. 6, p. 2402–2407, 2020.

SILVA, D. L. *et al.* Impact of the supplementation of exogenous protease and carbohydrase on the metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility of soybean meals in two Brazilian regions. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 24, n. 04, p. eRBCA-2021-1452, 2022.

SILVA, E. A. da *et al.* Chemical composition and metabolizable energy values of feedstuffs for broiler chickens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 648-654, 2012.

SILVA, E. P. da *et al.* Predição dos valores de energia metabolizável da farinha de vísceras de aves para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, n. 10, p. 2237-2245, 2010.

SILVA, E. P. da. **Avaliação nutricional de farinhas de vísceras de aves e a utilização em rações de frangos de corte.** 2009. 134 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Zootecnia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

SILVA, E. P. da. *et al.* Determination of the chemical composition, amino acid levels and energy values of different poultry offal meals for broilers. **Brazilian Journal of Poultry Science**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 97-107, 2012.

SILVA, R. B. *et al.* Composição química e valores de energia metabolizável de alimentos alternativos determinados com pintos e galos. *In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 43., 2006, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa, PB: SBZ, 2006.

SOARES, K. R. **Valores energéticos de ingredientes proteicos para frangos de corte na fase pré-inicial.** 2004. 52 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2004.

SONG, M. *et al.* The age-related metabolizable energy of cereal grains, oilseed meals, corn gluten meals, and feather meals for broilers. **Journal Animal Science**, Amsterdam, v. 101, p. skad051, 2023.

TAVARES-SAMAY, A. M. A. *et al.* Determination of nutrient and energy values of cottonseed meal supplemented or not with phytase and protease for broiler chicks. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 48, p. e20180142, 2019.

TRONI, A. R. *et al.* Composição química e energética de alimentos para frangos de corte. **Revista Ciência Agrônômica**, Jaboticabal, v. 47, n. 4, p. 755–760, 2016.

TUCCI, F. M. *et al.* Determinação da composição química e dos valores energéticos de alguns alimentos para aves. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 85-89, 2003.

ULLAH, Z. *et al.* Standardized Ileal Amino Acid Digestibility of Commonly Used Feed Ingredients in Growing Broilers. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, Korea, v. 29, n. 9, p. 1322-30, 2016.

VALADARES, C. G. *et al.* Determinação da energia metabolizável do farelo residual do milho com e sem enzima em dietas para frangos de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 68, n. 03, p. 748-754, 2016.

VIEIRA, R. A. *et al.* Composição química e valores de energia metabolizável aparente corrigida de alguns alimentos energéticos determinados com frango de corte. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v. 4, n. 2, 2014.

VIEIRA, R. A. **Values of metabolizable energy and of digestible amino acids of some feedstuffs for poultry.** 2011. 100 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Animais Domésticos; Nutrição e Alimentação Animal; Pastagens e Forragicultura) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

VIEIRA, R. de O. *et al.* Composição química e energia metabolizável de híbridos de milho para frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 832-838, 2007.

VIEIRA, R. O. **Composição química e valores energéticos de híbridos de milho para frangos de corte**. 2006. 40 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

VIEITES, F. M. *et al.* Valores de energia metabolizável aparente da farinha de carne e ossos para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 2292-2299, 2000.

XIE, K. *et al.* Evaluation of nitrogen-corrected apparent metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility of different sources of rice and rice milling byproducts in broilers. **Animals**, Switzerland, v. 11, p. 1894, 2021.

YAGHOBFAR, A. Effects of bioassay and age on amino acid digestibility and metabolizable energy of soybean, sunflower and canola meals. **Iranian Journal of Applied Animal Science**, Iran, v. 3, n.2, p. 249-261, 2013.

YEGANI, M. *et al.* Prediction of energetic value of wheat and triticale in broiler chicks: A chick bioassay and an in vitro digestibility technique. **Animal Feed Science and Technology**, Netherlands, v. 183, n. 1-2, p. 40-50, 2013.

ZAREI, A. *et al.* Determination of apparent and true digestibility of poultry by product meal in broiler chickens. **Iranian Journal of Applied Animal Science**. Iran, v. 4, n. 3, p. 587-590, 2014.

ZONTA, M. C. de M. *et al.* Energia metabolizável de farinhas de soja ou produtos de soja, determinada pelo método de coleta total e por equações de predição. **Archivos de Zootecnia**, España, v. 55, n. 209, p. 21-30, 2006.

ZONTA, M. C. de M. *et al.* Energia metabolizável de ingredientes proteicos determinada pelo método de coleta total e por equações de predição. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 6, p. 1400-1407, 2004.