

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Uso da absorciometria de raios x de dupla energia (DXA) para predição da
composição da carcaça de vacas de descarte**

Wenderson Moura de Carvalho
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

WENDERSON MOURA DE CARVALHO

**Uso da absorciometria de raios x de dupla energia (DXA) para predição da
composição da carcaça de vacas de descarte**

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

Orientadora: Simone E. F. Guimaraes

Coorientador: Mario Luiz Chizzotti

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

C331u
2025

Carvalho, Wenderson Moura de, 1996-
Uso da absorciometria de raios X de dupla energia (DXA)
para predição da composição da carcaça de vacas de descarte /
Wenderson Moura de Carvalho. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (39 f.): il. (algumas color.).

Texto em português e inglês.

Orientador: Simone Eliza Facioni Guimarães.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Veterinária, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.647>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Vacas - Carcaças - Modelos matemáticos. 2. Vacas -
Carcaças - Registros de desempenho. 3. Raios X. 4. Análise de
regressão. I. Guimarães, Simone Eliza Facioni, 1966-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Veterinária. Programa de Pós-Graduação em Medicina
Veterinária. III. Título.

CDD 22. ed. 636.2

WENDERSON MOURA DE CARVALHO

Uso da absorciometria de raios x de dupla energia (DXA) para predição da composição da carcaça de vacas de descarte

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

APROVADA: 28 de julho de 2025.

Assentimento:

Wenderson Moura de Carvalho
Autor

Simone Eliza Facioni Guimaraes
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 07/10/2025 às 20:20:28 e pela orientadora em 08/10/2025 às 15:09:41. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **4H63.J6MB.L7SP** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido força, saúde e sabedoria para a realização desse trabalho, permitindo-me superar todas as dificuldades ao longo do caminho. À minha família, em especial aos meus pais, Rozicleide e José de Souza, pelo amor incondicional, pelo carinho e por serem meu porto seguro. Esta conquista é toda de vocês.

Ao meu namorado, Samuel Guerra, pelo apoio constante, pela paciência nos momentos difíceis e pelo incentivo incondicional ao longo desta intensa jornada. Obrigado por estar sempre ao meu lado e por ter sido o suporte fundamental na conclusão do mestrado.

Aos meus queridos amigos, que me apoiam, alegram meus dias, comemoram cada conquista e me lembram da importância de cultivar amizades verdadeiras.

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Simone Eliza Facioni Guimarães, por toda a orientação, paciência e confiança nessa etapa. Serei eternamente grato pelos ensinamentos, que me acompanharão nos novos desafios.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Mario Luiz Chizzotti, pela coorientação, pelas oportunidades proporcionadas e pelo grande aprendizado.

Aos meus amigos do Laboratório de Ciência da Carne (LCC) e do Frigorífico Escola da UFV, pelo companheirismo e apoio em todas as etapas desse ciclo, em especial, Cris Luana, Jorge Muniz e Vitoria Marques.

Aos estagiários, Guilherme Marques, Ana Clara Antunes, Melissa, Ana Clara Franklin, Thomás, Lucas, Vinícius, Lilian e Marcos, vocês tornaram a execução desse projeto possível e muito mais leve.

Ao Prof. Dr. José Domingos Guimarães e a seus orientandos, que uniram forças a este projeto, expressei meu sincero agradecimento.

Ao Departamento de Medicina Veterinária (DVT) e Departamento de Zootecnia (DZO) da Universidade Federal de Viçosa. Ao Programa de Pós-Graduação em Medicina Veterinária da UFV pela oportunidade de realização do mestrado.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

CARVALHO, Wenderson Moura de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Uso da absorciometria de raios x de dupla energia (DXA) para predição da composição da carcaça de vacas de descarte.** Orientadora: Simone Eliza Facioni Guimaraes. Coorientador: Mario Luiz Chizzotti.

A avaliação da composição de carcaças de vacas de descarte é essencial para a indústria da carne, mas métodos tradicionais de dissecação são inviáveis em ambientes industriais devido à sua natureza invasiva, demorada e custosa. O objetivo deste estudo foi desenvolver equações para prever a composição física (músculo, gordura, osso) de meias-carcaças de vacas Nelore de descarte utilizando absorciometria de raios X de dupla energia (DXA). Foram avaliadas 24 meias-carcaças, que, após 24 horas de resfriamento, foram pesadas, divididas em cinco seções padronizadas e escaneadas pelo DXA. Em seguida, cada seção foi dissecada em músculo, gordura subcutânea, gordura intramuscular e osso, com os dois tipos de gordura somados para representar a gordura total. As estimativas de tecido magro, gordura e conteúdo mineral ósseo (BMC) obtidas pelo DXA foram usadas como preditoras para desenvolver modelos de regressão linear simples, sendo a precisão avaliada por R^2 , RMSEP e AICc, com validação cruzada leave-one-out. Os resultados mostraram que o DXA apresentou excelente capacidade de predição para gordura ($R^2 = 0,96$; RMSEP = 1,53 kg), boa performance para músculo ($R^2 = 0,84$; RMSEP = 4,31 kg) e moderada para osso ($R^2 = 0,73$; RMSEP = 1,46 kg). A análise por seção evidenciou que regiões específicas da carcaça apresentam maior representatividade para certos tecidos: S2 foi mais precisa para gordura, S4 e S5 para músculo, e S1 para osso. Além disso, os modelos baseados em estimativas de gordura total ou seções isoladas também previram com alta acurácia a gordura subcutânea. Conclui-se que o DXA é uma ferramenta robusta e confiável para avaliar a composição física de carcaças de vacas de descarte, sendo que a utilização de seções representativas permite otimizar protocolos de avaliação, com potencial aplicação em cenários industriais para estimativa rápida e precisa de rendimento de carne.

Palavras-chave: análise de imagem; bovinos; composição física; modelos de predição

ABSTRACT

CARVALHO, Wenderson Moura de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Use of dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) for predicting the carcass composition of cull cows.** Adviser: Simone Eliza Facioni Guimaraes. Co-adviser: Mario Luiz Chizzotti.

The evaluation of the composition of cull cow carcasses is essential for the meat industry, but traditional dissection methods are unfeasible in industrial settings due to their invasive, time-consuming, and costly nature. The objective of this study was to develop equations to predict the physical composition (muscle, fat, bone) of half-carcasses of culled Nellore cows using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). Twenty-four half-carcasses were evaluated, which, after 24 hours of cooling, were weighed, divided into five standardized sections, and scanned by DXA. Each section was then dissected into muscle, subcutaneous fat, intramuscular fat, and bone, with the two types of fat added together to represent total fat. The estimates of lean tissue, fat, and bone mineral content (BMC) obtained by DXA were used as predictors to develop simple linear regression models, with accuracy assessed by R^2 , RMSEP, and AICc, with leave-one-out cross-validation. The results showed that DXA had excellent predictive ability for fat ($R^2 = 0.96$; RMSEP = 1.53 kg), good performance for muscle ($R^2 = 0.84$; RMSEP = 4.31 kg), and moderate performance for bone ($R^2 = 0.73$; RMSEP = 1.46 kg). The section analysis showed that specific regions of the carcass are more representative of certain tissues: S2 was more accurate for fat, S4 and S5 for muscle, and S1 for bone. In addition, models based on estimates of total fat or isolated sections also predicted subcutaneous fat with high accuracy. It is concluded that DXA is a robust and reliable tool for assessing the physical composition of cull cow carcasses, and the use of representative sections allows for the optimization of assessment protocols, with potential application in industrial settings for quick and accurate estimation of meat yield.

Keywords: cattle; image analysis; physical composition; prediction models

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figure 1: Figure 1. Schematic representation of the five standardized sections (S1 to S5) of the right half of the carcasses of cull cows used for analysis. The anatomical boundaries were: S1, cross-section immediately after the second rib; S2, cross-section after the eighth rib; S3, cross-section immediately after the thirteenth rib; S4, cross-section after the sacrum; and S5, the remaining part of the carcass, comprising the hindquarter34

Figure 2. Linear regression equations for predicting the total carcass weight of muscle, fat, and bone (kg) from DXA estimates in cull cows. Panels show the relationships between the weights of dissected muscle (A), fat (B), and bone (C) and their respective estimates obtained by dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). DXA lean tissue, DXA adipose tissue, and DXA BMC correspond to estimates of muscle, fat, and bone mineral content, respectively. R^2 = coefficient of determination; RMSEP = root mean square error of prediction36

LISTA DE TABELAS

Table 1. Descriptive statistics of carcass composition based on dissection (physical) and DXA (estimated) in cull cows.....35

Table 2. Linear regression equations for predicting the total physical carcass composition in different tissues (muscle, fat, and bone) based on DXA values in five sections of the half-carcass.....36

Table 3. Simple linear regression equations for predicting subcutaneous carcass fat from total fat and sections obtained by DXA.....37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIEC	Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes
AICc	Corrected Akaike information criterion (AICc)
BMC	Bone mineral content
DXA	Dual-energy X-ray absorptiometry
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
R ²	Coefficient of determination
RMSEP	Root mean square error of prediction
USDA	United States Department of Agriculture

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1. Avaliação da carcaça bovina.....	11
2.2. Absorciometria de raios X de dupla energia (DXA)	13
3. JUSTIFICATIVA.....	14
4. OBJETIVOS	15
4.1 Objetivo Geral	15
4.2 Objetivos Específicos.....	15
5. REFERÊNCIAS	15
6. CHAPTER 1.....	20
Use of dual-energy X-ray absorptiometry to estimate the physical composition of the carcass in cull Nellore cows	20
ABSTRACT.....	20
INTRODUCTION	21
MATERIALS AND METHODS.....	23
<i>Experimental animals.....</i>	<i>23</i>
<i>DXA scan and physical composition</i>	<i>23</i>
<i>Statistical analysis.....</i>	<i>24</i>
RESULTS AND DISCUSSION.....	25
CONCLUSIONS	30
CONFLICTING INTERESTS	30
ACKNOWLEDGMENTS.....	31
LITERATURE CITED.....	31
Figures and Tables	34
7. CONCLUSÕES.....	39

INTRODUÇÃO

A bovinocultura de corte é uma das principais atividades do agronegócio brasileiro, destacando-se pela sua expressiva contribuição econômica e pelo alto volume de carne produzida. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor e o maior exportador de carne bovina do mundo (USDA, 2023), apresentando um dos maiores rebanhos bovinos, com aproximadamente 238 milhões de cabeças (ABIEC, 2023). No acumulado de 2024, as fêmeas representaram 43,0% dos abates totais de bovinos no Brasil, englobando tanto novilhas (com menos de 2 anos) quanto vacas (com mais de 2 anos). Dentre as fêmeas abatidas, 68,7% eram vacas, predominantemente oriundas de descarte (IBGE, 2024). Apesar da importância econômica dessa categoria, a carne proveniente de vacas de descarte apresenta qualidade inferior à de animais mais jovens (Venkata et al., 2015).

Neste cenário, a avaliação da composição da carcaça de vacas de descarte é de grande importância para determinar o rendimento de carne comercializável; e, consequentemente o valor das carcaças dos animais (Calnan, et al., 2021). Essa avaliação da composição da carcaça pode ser realizada por meio do método de dissecação, que consiste na separação física dos tecidos muscular, adiposo e ósseo para, então, quantificar suas proporções (Maeno et al., 2014). Porém, não é viável realizar em ambiente industrial devido à sua natureza invasiva, demorada e de alto custo, além de impedir a comercialização da meia-carcaça.

Tendo em vista que no ambiente industrial não é viável realizar a análise da composição de carcaça por dissecação, métodos que avaliam de forma indireta tentam estimar estas características. Em muitos países, adota-se o sistema de classificação e tipificação de carcaças, baseado em avaliação visual e atribuição de pontuações para parâmetros como cobertura de gordura subcutânea, conformação muscular da carcaça e peso que os animais apresentam por ocasião do abate (Silva et al., 2018). Contudo, essa seleção pelo método visual é um estimador pouco preciso da composição da carcaça, tanto para os criadores como para a indústria frigorífica, na remuneração da carcaça comercializada (Gomes et al., 2021). Além de serem subjetivas, essas técnicas fornecem informações limitadas sobre atributos relevantes, como a distribuição de gordura intramuscular e a proporção de tecido magro, o que reforça a necessidade de alternativas mais objetivas, precisas e reprodutíveis.

O desenvolvimento de métodos não invasivos, rápidos e confiáveis para avaliação de carcaças tem despertado o interesse de pesquisadores e da indústria de carne. Com a necessidade de tornar o processo de avaliação das carcaças uma etapa mais eficiente e precisa, diversas tecnologias avançadas foram aplicadas para medir objetivamente as características da

carcaça que influenciam a qualidade de carne (Allen, 2021). Dentre elas, destaca-se a absorciometria de dupla energia por raios X (DXA), que quantifica massa magra, massa gorda e massa óssea e é amplamente empregada na avaliação da composição corporal humana (Fosbøl & Zerahn, 2015). Aplicada às carcaças, a tecnologia DXA avalia de forma não destrutiva a composição corporal, oferecendo maior rapidez e precisão em comparação aos métodos tradicionais de dissecação e análise química.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi prever a composição da carcaça bovina de vacas de descarte por meio da absorciometria de raios X de dupla energia (DXA) com base em diferentes seções da carcaça, suprimindo a escassez de estudos sobre sua aplicabilidade e precisão nessa categoria de animais.

1. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Avaliação da carcaça bovina

A carcaça bovina exerce importante papel na indústria frigorífica, determinando o valor do animal para todos os integrantes da cadeia produtiva, desde os criadores até consumidores. Em sua composição, é formada por partes comestíveis e não comestíveis, e as suas proporções determinam o rendimento de carcaça, que está diretamente ligado à quantidade de tecido muscular, ósseo e gorduroso na carcaça. Carcaças mais pesadas nem sempre garantem um melhor rendimento em cortes ou qualidade da carne superior em características como maciez e suculência. Do ponto de vista comercial, espera-se que uma carcaça apresente elevado percentual de músculos, teor de gordura adequado e quantidade mínima de ossos (Feijó et al., 2019).

Por meio das diferenças observadas na composição das carcaças bovinas e os preços diferentes que podem ser oferecidos ao consumidor, os pecuaristas podem direcionar suas estratégias de produção, visando animais com maior rendimento de carcaça. Desta forma, é possível obter produtos com melhor retorno financeiro, ao mesmo tempo em que se atendem as exigências de qualidade de toda a cadeia produtiva. Carcaças com elevado rendimento e características desejáveis, como maior proporção de músculo e adequado acabamento de gordura, são mais valorizadas pelo mercado e tendem a alcançar melhores ofertas comerciais (Rotta et al., 2010). Com o objetivo de alinhar a produção às exigências do mercado e às demandas dos consumidores de carne, diversos métodos têm sido propostos nas últimas décadas com o objetivo de estimar a composição da carcaça, cada um com suas vantagens e limitações. Dentre esses, destacam-se os sistemas de classificação e tipificação de carcaças, utilizados na indústria frigorífica.

Na tentativa de estimar a composição da carcaça, profissionais treinados para avaliação do animal vivo ou da carcaça conseguem apresentar resultados razoáveis na avaliação da carcaça, conforme o objetivo pretendido. A conformação da carcaça e grau de acabamento tem sido utilizados há muitos anos como indicadores subjetivos da qualidade da carcaça, porém, fornece informações limitadas sobre a quantidade real de músculos, estando mais associada ao grau de acabamento da carcaça e à quantidade de gordura. Além disso, por se tratar de um método subjetivo, a classificação visual pode estar sujeita a erros humanos e ser considerada imprecisa (Hueth et al., 2007).

Outros dois métodos tradicionalmente utilizados para estimar a composição da carcaça são a dissecação e a análise química. A dissecação consiste na separação física dos tecidos magro, gordo e ósseo, seguida da quantificação de cada fração. Já o método de análise química requer a trituração da carcaça, para então quantificar seus nutrientes (Font-i-Furnols et al., 2015; Kasper et al., 2021), seguida da realização análises laboratoriais específicas. Apesar de eficazes, ambos os métodos apresentam como desvantagens importantes, o elevado tempo de execução, necessidade de mão de obra, e completa destruição dos tecidos para determinação da sua composição, além de não permitirem repetibilidade de análise no mesmo animal (Nóbrega et al., 2013).

Desta forma, a busca por novas tecnologias que sejam rápidas, menos sujeitas a erros, não destrutivas e economicamente viáveis para o ambiente industrial têm despertado o interesse de pesquisadores e da indústria de carne. Diversas tecnologias têm sido aplicadas com o objetivo de mensurar, de forma objetiva, as características de carcaças, tais como tomografia computadorizada (Font-i-Furnols et al., 2021), sistemas de visão computacional (Batista et al., 2021; Segura et al., 2021), impedância bioelétrica (Leighton et al., 2022), ultrassonografia (Mundi et al., 2019; Kress et al., 2020) e absorciometria de raios X de dupla energia (Calnan et al., 2021; Gardner et al., 2021; Sousa dos Santos et al., 2021). Essas ferramentas têm o potencial de transformar o processo de avaliação de carcaças, tornando-o mais padronizado, objetivo e compatível com as exigências atuais do setor produtivo.

Nesse sentido, a absorciometria de raios X de dupla energia (DXA) configura-se como uma metodologia não invasiva amplamente utilizada na avaliação da composição corporal (Scholz et al., 2015), apresentando como principais vantagens maior precisão, praticidade de execução e eficiência em comparação tanto aos métodos tradicionais de dissecação e análises químicas, quanto às avaliações visuais subjetivas, que são mais suscetíveis a erros e variações entre avaliadores.

2.2. Absorciometria de raios X de dupla energia (DXA)

Tendo em vista que os métodos tradicionais de análise da composição da carcaça são laboriosos e destrutivos, diversas metodologias e equipamentos estão sendo adaptados para obter resultados mais rápidos, precisos e com menor perda de amostras. Dentre essas alternativas, a tecnologia DXA destaca-se por oferecer, em comparação à tomografia computadorizada, menor exposição à radiação, custos de instalação e operação mais baixos e maior simplicidade de uso (Leighton et al., 2022).

O DXA opera usando uma tecnologia de escâner *pencil-beam* e *fan-beam*, que consistem na emissão de feixes de raios X de duas energias distintas. No modo *pencil-beam*, o feixe varre a amostra lentamente, assegurando maior precisão, enquanto o *fan-beam* realiza varreduras mais rápidas, porém com menor resolução pontual, sendo possível aplicar diferentes abordagens para criar níveis de baixa ou alta energia de raios X. Após o escaneamento das peças dispostas no DXA, o equipamento quantifica os diferentes tecidos que compõem o corpo do animal, obtendo valores de tecido magro, tecido gordo e conteúdo mineral ósseo. Além disso, imagens de densidade dos componentes escaneados são geradas em 2D (Carabús; Gispert; Font-i-Furnols, 2016).

O DXA tornou-se uma técnica viável para quantificar componentes de tecido magro, gordura e osso em animais, pois permitem particionar os constituintes químicos do corpo em compartimentos bem definidos. Para garantir a acurácia dessas estimativas, emprega-se calibração e validação cruzada, utilizando como padrão de referência a dissecação física de carcaças ou análises químicas (Pomar et al., 2017; Aguiar et al., 2023). Com os dados obtidos e validados, ajustam-se equações de predição específicas para cada espécie, região anatômica e equipamento, assegurando alta precisão na quantificação dos tecidos. Devido a esse rigor metodológico, o DXA tem sido amplamente utilizado na determinação precisa da composição corporal de animais de produção.

Gardner et al. (2018) demonstraram que a instalação de um sistema *online* de DXA em linha de abatedouro pode estimar, com elevada precisão (baixa variabilidade entre medidas repetidas) e exatidão (valores próximos aos reais), a composição da carcaça de cordeiros em velocidade compatível com o ritmo comercial. Em estudo posterior, Gardner et al. (2021), também utilizando uma unidade DXA *online* instalada em um matadouro comercial, relataram estimativas precisas ($R^2 = 0,63$ a $0,95$) para vários pesos de corte de varejo em cordeiros. Em suínos, Soladoye et al. (2016) avaliaram a precisão das predições de valores gerados pelo DXA, de quantidade de gordura e massa magra em carcaças e cortes primários (barriga, lombo, pernil

e paleta), utilizando animais de diferentes raças, idades, classe sexual, alimentação e peso ao abate, obtendo alto coeficiente de determinação (R^2), evidenciando a robustez da técnica mesmo diante de variabilidade biológica.

Em estudos com bovinos, Nunes et al. (2023) demonstraram que o teor de marmoreio pode influenciar o desempenho das predições de gordura realizadas por meio do DXA, uma vez que os resultados foram mais precisos em amostras de bife Angus, com maior teor de gordura, do que em amostras de bifes Nelore, com menor conteúdo lipídico. López-Campos et al. (2018) escanearam cortes primários de carcaças bovinas com DXA e relataram alta precisão na predição de tecido magro total ($R^2 = 0,99$), gordura ($R^2 = 0,98$) e osso ($R^2 = 0,94$) em carcaças inteiras, além de estimativas precisas da composição tecidual em 12 dos 15 cortes comerciais avaliados. Em estudo mais recente, Calnan et al. (2021), utilizaram um novo protótipo de DXA desenvolvido para prever a gordura em carcaças e quartos bovinos na linha de abate, comparando os resultados com os obtidos por tomografia computadorizada. Os autores observaram elevados coeficientes de determinação, com R^2 de 0,94 para o dianteiro e lateral, e de 0,80 para o traseiro, confirmando o potencial da tecnologia para uso em escala industrial.

Além de seu uso na estimativa da composição de carcaças, diversos autores têm destacado o potencial do DXA para aplicações mais amplas na produção animal. Anderson et al. (2021) demonstraram a utilização bem-sucedida do DXA na previsão de aspectos relacionados à qualidade alimentar da carne de cordeiros, com base em dados obtidos das carcaças. Remus et al. (2020) empregaram a técnica como metodologia para estimar o desempenho de crescimento e a massa proteica corporal em suínos durante as fases de crescimento e terminação. Já González et al. (2018) sugeriram a aplicação do DXA como ferramenta para viabilizar estratégias de nutrição de precisão em ruminantes. Esses estudos evidenciam a versatilidade e a ampla aplicabilidade da tecnologia DXA no contexto da produção animal.

2. JUSTIFICATIVA

A indústria de carnes busca tecnologias não invasivas, rápidas e precisas para avaliar composição e os parâmetros de qualidade da carcaça e da carne (Delgado-Pando et al., 2021), uma vez que métodos tradicionais de dissecação física e análises químicas laboratoriais, embora considerados “padrão-ouro”, são demorados, destrutivos e demandam alta mão de obra (Font-i-Furnols et al., 2015; Nóbrega et al., 2013; Ruiz-Ascacibar et al., 2019). Diante dessas limitações, novas tecnologias vêm sendo exploradas para oferecer soluções mais rápidas, reprodutíveis e não destrutivas.

Nesse contexto, a tecnologia DXA surge como alternativa promissora, pois determina com precisão massa magra, gorda e óssea em diversos animais e permite monitorar deposição de gordura ao longo do crescimento sem destruir as amostras (Soladoye et al., 2016). No entanto, a maioria dos estudos relata excelentes resultados em bovinos jovens, concentrando-se nessa categoria, com informações escassas ou quase inexistentes para animais maduros, especialmente vacas de descarte. Essas fêmeas, que correspondem a mais de dois terços das fêmeas abatidas no Brasil (IBGE, 2024), apresentam menor proporção de tecido magro e maior variabilidade na distribuição de gordura intramuscular (Vaz et al., 2002), fatores que podem reduzir a acurácia de modelos calibrados em animais jovens.

Contudo, faltam estudos que validem modelos de predição DXA com base em diferentes seções de carcaça para vacas de descarte. Ao suprir essa lacuna, este trabalho fornecerá uma ferramenta objetiva para estimar rendimento e valor de mercado dessas carcaças de alto volume, além de embasar sistemas de pagamento por qualidade e protocolos industriais mais eficientes.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo desenvolver equações de predição baseadas em varredura DXA para estimar a composição física de meia-carcaça em vacas de descarte da raça Nelore, a partir de diferentes seções da carcaça.

3.2 Objetivos Específicos

- Escanear as seções das meias-carcaças utilizando a técnica de absorciometria de raios X de dupla energia (DXA).
- Realizar a dissecação física das seções para quantificar os tecidos adiposo, muscular e ósseo.
- Relacionar os dados obtidos por DXA com os dados da dissecação física, visando o desenvolvimento de equações de predição.

4. REFERÊNCIAS

ABIEC. Associação Brasileira Das Indústrias Exportadoras De Carne. **Relatório detalhado do balanço pecuário do mercado interno**. São Paulo: 2023.

ALLEN, P. Recent developments in the objective measurement of carcass and meat quality for industrial application. **Meat Science**, 181 (June), 108601, 2021.

- ANDERSON, F., PAYNE, C., PANNIER, L., PETHICK, D. W., & GARDNER, G. E. The potential for dual energy X-ray absorptiometry to predict lamb eating quality. **Meat Science**, 181, 108434, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108434>
- BATISTA, A. C., V. SANTOS, J. AFONSO, C. GUEDES, J. AZEVEDO, A. TEIXEIRA, AND S. SILVA. Evaluation of an image analysis approach to predicting primal cuts and lean in light lamb carcasses. **Animals-Basel**. 11:1368, 2021. <https://doi.org/10.3390/ani11051368>.
- CALNAN, H., WILLIAMS, A., PETERSE, J., STARLING, S., COOK, J., CONNAUGHTON, S., & GARDNER, G. E. A prototype rapid dual energy X-ray absorptiometry (DXA) system can predict the CT composition of beef carcasses. **Meat Science**, 173, 108397–108312, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108397>.
- CARABÚS, A.; GISPERT, M.; FONT-I-FURNOLS, M. Imaging technologies to study the composition of live pigs: A review. **Spanish Journal of Agricultural Research**. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentacion, 2016.
- DE AGUIAR, G. A., DA FONSECA, L., DE FARIAS, M. R., BRAGA, G. R., BARCELLOS, J., SCHULTZ, É. B., & HANNAS, M. I. Dual-energy X-ray absorptiometry: an effective approach for predicting broiler chicken body composition. **Poultry Science**, 103 (2), 103363, 2024.
- DELGADO-PANDO, G., ALLEN, P., TROY, D. J., & MCDONNELL, C. K. Objective carcass measurement technologies: Latest developments and future trends. **Trends in Food Science and Technology**, 111(August 2020), 771–782, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.016>
- FEIJÓ, F. D. **Avaliação qualitativa e quantitativa da carcaça e da carne de raças bovinas**. 2019. ii, 104 p. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia.
- FONT-I-FURNOLS, M. et al. Prediction of tissue composition of live dairy calves and carcasses by computed tomography. **Livestock Science**, v. 243, p. 104371, 2021.
- FONT-I-FURNOLS, Maria et al. Estimation of carcass composition and cut composition from computed tomography images of live growing pigs of different genotypes. **Animal**, v. 9, n. 1, p. 166-178, 2015.
- FOSBØL, M. O., & ZERAHN, B. Contemporary methods of body composition measurement. **Clinical Physiology and Functional Imaging**, 35(2), 81–97, 2015. <https://doi.org/10.1111/cpf.12152>.
- GARDNER, G. E., S. STARLING, J. CHARNLEY, J. HOCKING-EDWARDS, J. PETERSE, AND A. WILLIAMS. Calibration of an on-line dual energy X-ray absorptiometer for estimating carcass composition in lamb at abattoir chain-speed. **Meat Science**. 144:91–99, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.020>.

GARDNER, G., ANDERSON, F., SMITH, C., & WILLIAMS, A. Using dual energy X-ray absorptiometry to estimate commercial cut weights at abattoir chain-speed. **Meat Science**, 173, 108400, 2021. doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108400

GOMES, M. D. N. B., FEIJÓ, G. L. D., DUARTE, M. T., SILVA, L. G. P. D., SURITA, L. M. A., PEREIRA, M. W. F. **Manual de avaliação de carcaças bovinas**, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/3865>. Acesso em: 01 de setembro de 2024.

GONZÁLEZ, L. A., I. KYRIAZAKIS, AND L. O. TEDESCHI. Review: precision nutrition of ruminants: Approaches, challenges and potential gains. **Animal**. 12: s246–s261, 2018. <https://doi.org/10.1017/S1751731118002288>.

HUETH, B., MARCOUL, P., & LAWRENCE, J. Grader bias in cattle markets? Evidence from Iowa. **American Journal of Agricultural Economics**, 89(4), 890–903, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8276.2007.01026.x>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Trimestral do Abate de Animais: resultados preliminares do 1º trimestre de 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=72380&view=detalhes>. Acesso em: 10 jun. 2025.

KRESS, K., J. HARTUNG, J. JASNY, V. STEFANSKI, AND U. WEILER. Carcass characteristics and primal pork cuts of gilts, boars, immunocastrates and barrows using AutoFOM III data of a commercial abattoir. **Animals-Basel**. 10:1912, 2020. <https://doi.org/10.3390/ani10101912>.

LEIGHTON, P. L. A., SEGURA, J., LAM, S., MARCOUX, M., WEI, X., LOPEZ-CAMPOS, O., SOLADOYE, P., DUGAN, M. E. R., JUAREZ, M., & PRIETO, N. Prediction of Carcass Composition and Meat and Fat Quality Using Sensing Technologies: A Review. **Meat and Muscle Biology**, 5(3), 2022. <https://doi.org/10.22175/mmb.12951>

LÓPEZ-CAMPOS, Ó., ROBERTS, J. C., LARSEN, I. L., PRIETO, N., JUÁREZ, M., DUGAN, M. E. R., & AALHUS, J. L. Rapid and non-destructive determination of lean fat and bone content in beef using dual energy X-ray absorptiometry. **Meat Science**, 146(July), 140–146, 2018. doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.009

MAENO, H.; OISHI, K.; MITSUHASHI, T.; KUMAGAI, H.; HIROOKA, H. Prediction of carcass composition and individual carcass cuts of Japanese Black steers. **Meat Science**, 96 (3): 1365-1370, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.11.017>

MUNDI, M. S., PATEL, J. J. AND MARTINDALE, R. Body Composition Technology: Implications for the ICU. **Nutrition in Clinical Practice**. 34 (1), 48-58, 2019. doi:10.1002/ncp.10230.

NÓBREGA, G.H.; CÉZAR, M.F.; PEREIRA FILHO, J.M.; SOUSA, W.H.; SOUSA, O.B.; CUNHA, M.G.G.E. SANTOS, J.R.S. Regime alimentar e compensatório de ovinos em confinamento: composição regional e tecidual da carcaça. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**. 65: 469-476, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352013000200024>

NUNES, C. L. C.; VILELA, R. S. R.; SCHULTZ, E. B.; HANNAS, M. I.; CHIZZOTTI, M. L. Assessing dual-energy X-ray absorptiometry prediction of intramuscular fat content in beef longissimus steaks. **Meat Science**, v.197, 2023.

POMAR, C., KIPPER, M., & MARCOUX, M. Use of dual-energy X-ray absorptiometry in non-ruminant nutrition research. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 46, 621–629, 2017.

REMUS, A., L. HAUSCHILD, S. METHOT, AND C. POMAR. Precision livestock farming: real-time estimation of daily protein deposition in growing-finishing pigs. **Animal**. 14:s360–s370, 2020. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001469>.

ROTTA, P. P., PRADO, I. N. & PRADO, R. M. Desempenho, qualidade da carcaça e da carne em bovinos. In: Prado, I. N. (ed.) **Produção de bovinos de corte e qualidade da carne**. Eduem, Maringá, Paraná, Brasil. 2010.

RUIZ-ASCACIBAR, I., STOLL, P., KREUZER, M., BOILLAT, V., SPRING, P., BEE, G. Impact of amino acid and CP restriction from 20 to 140 % BW on performance and dynamics in empty body protein and lipid deposition of entire male, castrated and female pigs. **Animal**, v 11, 394–404, 2017. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001634>.

SCHOLZ A.M., BÜNGER L., KONGSRO J., BAULAIN U., MITCHELL A.D. Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy Xray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. **Animal**.;9:1250e64, 2015. <https://doi.org/10.1017/S1751731115000336>.

SEGURA, J., AALHUS, J. L., PRIETO, N., LARSEN, I. L., JUÁREZ, M., & LÓPEZ-CAMPOS, Ó. Carcass and primal composition predictions using camera vision systems (CVS) and dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) technologies on mature cows. **Foods**, 10(5), 1118, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10051118>.

SILVA, M. J. F. B.; LINS, L. F.; LINS, N. B. O.; SIQUEIRA, G. F. M. Avaliação de carcaça bovina: uma revisão sobre o uso de ultrassom. **Medicina veterinária (UFRPE)**, ISSN 1809-4678, 2018.

SOLADOYE, O. P.; CAMPOS, Ó. L.; AALHUS, J. L.; GARIÉPY, C.; SHAND, P.; JUÁREZ, M. Accuracy of dual energy X-ray absorptiometry (DXA) in assessing carcass composition from different pig populations. **Meat Science**, v. 121, p. 310–316, 1 nov. 2016.

SOUSA DOS SANTOS, L., P. H. REIS FURTADO CAMPOS, W. CÂNDIDO DA SILVA, A. M. VEIRA, A. Z. FRAGA, R. P. CAETANO, AND L. HAUSCHILD. Corrigendum to: Performance and carcass composition of pigs from two sire lines are affected differently by ambient temperature. **Animal Production Science**. 61:620–620, 2021. https://doi.org/10.1071/AN20078_CO.

USDA. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. **Livestock and Poultry: World Markets and Trade**. 2023.

VAZ, F. N., RESTLE, J., QUADROS, A. R. B. D., PASCOAL, L. L., SANCHEZ, L. M. B., ROSA, J. R. P., & MENEZES, L. F. G. D. Características da carcaça e da carne de novilhos e

de vacas de descarte Hereford, terminados em confinamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 31, 1501-1510, 2002.

VENKATA REDDY, B.; SIVAKUMAR, A.S.; JEONG, D.W.; WOO, Y.B.; PARK, S.J.; LEE, S.Y.; BYUN, J.Y.; KIM, C.H.; CHO, S.H.; HWANG, I. Beef quality traits of heifer in comparison with steer, bull and cow at various feeding environments. **Animal Science Journal**, v. 86, n. 1, p. 1-16, 2015.

5. CHAPTER 1**Use of dual-energy X-ray absorptiometry to estimate the physical tissue composition of Nellore cull cows carcasses**

Wenderson Moura de Carvalho^{1*}, Simone Eliza Facioni Guimarães^{1,2}, Guilherme Marques Rodrigues², Ana Clara Antunes Luiz², Melissa Aparecida Borges Gonçalves², Vitória Marques de Souza Ferreira², Cris Luana de Castro Nunes², Mario Luiz Chizzotti²

¹Department of Veterinary Medicine, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 36570-900, Brazil.

²Department of Animal Sciences, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 36570-900, Brazil.

* Corresponding author: E-mail: wenderson.carvalho@ufv.br

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the use of dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) to predict the physical composition of discarded Nellore cow half-carcasses, comparing DXA estimates with data obtained by physical dissection. Dissection indicated that carcasses consisted, on average, of 85.19 ± 10.43 kg of muscle, 22.93 ± 7.89 kg of fat, and 21.31 ± 2.75 kg of bone. DXA overestimated muscle and fat values by 19.35% and 14.42%, respectively, while bone mineral content was underestimated compared to the total dissected bones. Linear regression models demonstrated high predictive accuracy for fat ($R^2 = 0.96$; RMSEP = 1.53 kg), satisfactory

prediction for muscle ($R^2 = 0.84$; RMSEP = 4.31 kg), and moderate performance for bone ($R^2 = 0.73$; RMSEP = 1.46 kg). Section analysis revealed that S2 provided the best prediction for fat, S4 and S5 for muscle, and S1 for bone. In addition, DXA estimates for total carcass fat and section-based scans reliably predicted dissected subcutaneous fat, with sections S4 and S3 showing the highest accuracy. These results demonstrate that DXA accurately estimates the physical composition of muscle, fat, and bone in discarded Nellore cow carcasses and that scanning specific sections of the carcass can serve as a practical, non-destructive alternative for predicting total composition in industrial and research settings.

Keywords: beef cattle, body composition, carcass evaluation, prediction

INTRODUCTION

In recent decades, the meat industry has evolved from subjective methods, such as visual estimation of carcass fat, to objective technologies capable of accurately estimating the composition and quality characteristics of carcasses and meat. This transition has allowed for more efficient classification of cuts based on criteria defined by the market, which in turn favors differentiated remuneration for producers who meet the quality standards demanded by the industry and consumers (Allen, 2021; Calnan et al., 2021).

Carcass composition can be determined using reference methods such as physical dissection and chemical analysis of carcass tissues. Although highly accurate, these procedures require the separation or grinding of body components, demanding time, resources, and skilled labor. In addition, because these methods are destructive, it is impossible to sell the cuts and they are therefore restricted to the research environment (Lerch et al., 2023). The need to make this process more agile and applicable to industry has led to the development and adoption of advanced technologies for the objective assessment of carcass composition.

Among these technologies, dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) stands out as a non-invasive method for measuring body composition. DXA software estimates the amounts of bone mineral content (BMC) and total, lean, and fat tissues by analyzing the attenuation of dual X-ray beams as they pass through materials with different absorption properties (Schallier et al., 2019). This technique has been widely applied across different animal species. In pigs, Kipper et al. (2019) developed equation models to predict the dissected composition of pig carcasses and primary cuts, while Gardner et al. (2021) developed estimation equations to predict the dissected composition of lamb carcasses and the weights of commercial cuts from DXA readings taken on the slaughter line. In cattle, Xavier et al. (2023) developed models to predict the chemical composition of cold half-carcasses and 11th rib cuts from DXA scans of bulls and steers. However, prediction equations specifically developed for cull Nellore cow carcasses are still scarce in the literature.

Among the components that DXA can measure, subcutaneous fat is particularly important due to its direct impact on carcass yield and economic value. Accurate estimation of subcutaneous fat is therefore critical for industrial applications. Its depth influences cutting, yield, and product evaluation. In addition, the amount and distribution of subcutaneous fat affect post-slaughter handling and meat quality, including reduced water loss and effects on oxidative stability and meat color (Boito et al., 2018; Moreira et al., 2018). Because DXA can provide rapid, non-destructive estimates of fat deposits, accurate prediction of subcutaneous fat through section scanning is particularly valuable for industrial applications, enabling better yield prediction and more informed decisions about grading or pricing.

Considering the large size of bovine half-carcasses, full-body DXA scanning is impractical in industrial settings, which highlights the importance of identifying representative anatomical regions for predicting total composition. Based on the hypothesis that DXA data obtained from specific carcass sections can reflect the overall physical composition, this study

aimed to develop prediction equations for half-carasses of cull Nellore cows using DXA scans performed on different standardized carcass sections.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted at the Frigorífico Escola and the Body Composition and Densitometry Laboratory of the Department of Animal Science, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brazil

Experimental animals

The right half-carasses of 24 cull Nellore cows from the Beef Cattle Teaching, Research, and Extension Unit (UEPE Bovinos de Corte) of the Department of Animal Science, Universidade Federal de Viçosa were evaluated. The animals were grazed and supplemented with energy-protein concentrate, with an average age of 7.5 ± 3.3 years old (CV = 43.9%). After a solid fast of 20 hours, cows were slaughtered by brain concussion followed by jugular sectioning. Then, they were then bled, had the hide, head, and feet removed, eviscerated, and the carcasses were split lengthways into right and left halves, washed, identified, and cooled.

DXA scan and physical composition

After 24 hours of chilling at 4°C, carcass halves were weighed to determine the cold carcass weight. The right halves were then cut into five standardized sections (Figure 1), as described: S1 - section delimited by a cross-cut immediately after the second rib; S2 - cross-cut after the eighth rib; S3 - cross-cut after the thirteenth rib; S4 - cross-section immediately after the sacrum; and S5 - the residual portion of the carcass remaining after removal of the previous sections (S1 to S4).

The sections were individually packaged in plastic bags, identified, and sent for analysis by DXA using medical equipment (GE Healthcare, Lunar Prodigy Advance, USA). Specific software for small animal body composition was used in the corresponding mode to obtain estimates of lean tissue (kg), fat tissue (kg), and bone mineral content (BMC; kg).

Subsequently, each section (S1 to S5) was manually dissected into muscle, bone, subcutaneous fat, and intramuscular fat, the sum of the last two being considered total fat. The fractions were weighed separately to determine the physical tissue mass per section, and the sum of the dissected tissues was calculated to estimate the total physical composition of the half-carcass.

For analyses and comparisons between the weight of dissected tissue and the weight of DXA tissue, the weight of DXA lean tissue corresponded to dissected muscle, total fat measured by DXA was considered to correspond to the sum of dissected intramuscular and subcutaneous fat, and DXA BMC was considered to correspond to dissected bones.

Statistical analysis

Estimates of lean tissue, fat tissue, and BMC obtained by DXA scanning were used as predictor variables to estimate carcass tissue weight (kg meat, kg fat, and kg bone) using general linear regression models. The analyses were carried out using PROC REG procedure on SAS software (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), based on the model $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$, where Y represents the observed value of the variable of interest (meat, fat or bone), X corresponds to the value estimated by the DXA scan, β_0 is the intercept, β_1 is the angular coefficient (slope of the line) and ε is the residual error.

The precision of the models was assessed by the coefficient of determination (R^2), the root mean square error of prediction (RMSEP), and the corrected Akaike information criterion (AICc). Accuracy was analyzed based on the regression between the observed and predicted

values, considering ideal when intercepts did not differ significantly from zero and slopes did not differ from one, according to the criteria proposed by Tedeschi (2006).

Specific prediction equations were developed for cull cows. To ensure the robustness of the models, leave-one-out cross-validation (LOOCV) was applied based on the 24 observations from each section and the total carcass. This analysis was conducted using the PROC GLMSELECT procedure in SAS, with DXA data serving as the input variables.

RESULTS AND DISCUSSION

The cull cows used in the study had a SBW of 482.2 ± 65.4 kg, ranging from 327 to 595 kg. After chilling, the weight of the right half-carcass was 129.8 ± 18.5 kg, with a range from 86.2 to 155.0 kg.

Dissection of the cold carcass indicated that, on average, it consisted of 85.19 ± 10.43 kg of meat, 22.93 ± 7.89 kg of fat, and 21.31 ± 2.75 kg of bone (Table 1). The DXA estimates overestimated meat and fat values by 19.35% and 14.42%, respectively, while the carcass bone percentage obtained by DXA was on average 3.01 times lower than obtained by dissection. When evaluating the carcass sections (S1 to S5), we observed that values predicted for meat by DXA were higher than those obtained by dissection in all regions (from 22.0% in S4 to 35.6% in S3). For fat, DXA also overestimated the values, except in S3 (-6.8%), where the estimated values were lower than those obtained by dissection. Sections S2 and S4 showed the closest values between the fat estimates obtained by DXA and the physical dissection data.

Regarding bone, the BMC values estimated by DXA were consistently lower than those obtained by dissection. Concerning this underestimation of BMC values compared to dissected bone mass, Nielsen et al. (1973) reported that while physical dissection evaluates the total bone mass (including organic components and water), DXA quantifies only the bone mineral content (BMC), which is composed of calcium and phosphorus. Thus, it is expected that the BMC

values obtained by DXA are lower than those observed in physical dissection, which justifies the reductions observed in this study, ranging from 165% to 243% in relation to total bone mass.

Moreover, it is assumed that the BMC estimated by DXA more closely represents the mineral fraction of the bones, that is, the ash content obtained through chemical analysis. This equivalence is supported by the findings of Xavier et al. (2023), who reported a coefficient of determination of $R^2 = 0.98$ when comparing the BMC values estimated by DXA in the half-carcass with the mineral mass determined by chemical analysis in bovine carcasses.

Figure 2 shows the linear regression equations used to estimate the physical dissection values of muscle, fat, and bone in the carcass of cull cows based on the estimates obtained by DXA. The best performance was observed for fat, with the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.96$) and a low prediction error (RMSEP = 1.53 kg).

The model for predicting muscle mass showed an R^2 of 0.84, indicating that 84% of the observed variability was explained. However, it also presented the highest RMSEP (4.31 kg), evidencing greater prediction error. These results suggest that, although the model captures a substantial portion of the variability, its predictive performance is weaker when compared with the fat.

For the bone variable, the model exhibited a coefficient of determination of $R^2 = 0.73$, indicating a substantial proportion of the variability in bone mass was captured by the DXA-based prediction. The RMSEP of 1.46 kg reflects a reasonably low prediction error, especially considering the complexity of accurately estimating total bone mass. This performance is consistent with expectations, since DXA quantifies only bone mineral content (BMC), while physical dissection encompasses both the mineral and organic components as well as water content. Despite these inherent limitations, the model demonstrates satisfactory predictive capability for bone mass in cull cows.

The results obtained in this study were consistent with those of Calnan et al. (2021), who validated a high-speed DXA prototype using computed tomography as a reference method. These authors reported R^2 values of 0.95 for fat and 0.89 for muscle in whole beef cattle carcasses, results very similar to those observed here, which reinforces the reliability of DXA in predicting the physical composition of the carcass, even in different scenarios and with different categories of animals. Moreover, López-Campos et al. (2018) reported higher R^2 values for finished steers (0.99 for muscle, 0.98 for fat, and 0.94 for bone). These results were obtained from young steers finished in feedlots and raised under controlled nutritional conditions. Although the values in this study are slightly lower, the results obtained with cull cows remain solid ($R^2 = 0.96$ for fat, 0.84 for muscle, and 0.73 for bone).

The equations by section (Table 2) reveal variability in the prediction of muscle mass by DXA across the different carcass regions. The highest predictive capacity was observed in sections S4 ($R^2 = 0.78$) and S5 ($R^2 = 0.76$), indicating that these regions better reflect the total muscle mass of the carcass, in addition to presenting the lowest AICc values. In contrast, section S3 showed the lowest performance ($R^2 = 0.31$), while sections S1 ($R^2 = 0.68$) and S2 ($R^2 = 0.70$) presented intermediate predictive ability. These results highlight that the accuracy of DXA predictions can vary substantially depending on the specific carcass section analyzed. Clarke et al. (1999), working with sheep carcasses, reported a high R^2 (0.96) for the prediction of lean tissue in the leg region when DXA estimates were compared directly with physical dissection. However, their analysis was limited to a single anatomical region (the leg), which is structurally well-defined and relatively uniform in tissue composition. In contrast, the present study evaluated five distinct anatomical sections to predict the entire carcass. Here, the highest predictive capacity for muscle mass was observed in sections S4 ($R^2 = 0.78$) and S5 ($R^2 = 0.76$), suggesting that these central and posterior commercial regions may better represent total muscle

composition in cull Nellore cows, even in the presence of greater anatomical and physiological variability across the carcass.

DXA fat estimation performed well in all the sections analyzed, especially section S2 (between the third and seventh ribs), which had the best statistical fit ($R^2 = 0.88$, RMSEP = 2.75, and AICc = 77.73). The other sections also showed high accuracy (R^2 between 0.85 and 0.87), with prediction errors ranging from 2.94 to 3.10 kg. These results indicate that fat measurements obtained by DXA in each section consistently explain a substantial portion of the variation in total carcass fat. Overall, the study demonstrates the strong predictive capacity of DXA for fat in cull cow carcasses, with consistent performance across sections and a robust explanation of variability, even in the presence of marked individual differences.

The estimation of bone tissue based on BMC derived from DXA showed heterogeneous performance among the carcass sections. Section S1 recorded the best performance ($R^2 = 0.80$, RMSEP = 1.25 kg), indicating strong explanatory power and low prediction error. Sections S2 ($R^2 = 0.66$, RMSEP = 1.64 kg) and S4 ($R^2 = 0.55$, RMSEP = 1.88 kg) showed moderate predictive ability, while S5 had similar, slightly lower performance ($R^2 = 0.51$, RMSEP = 1.96 kg). Section S3 had the lowest coefficient of determination ($R^2 = 0.38$) and the highest RMSEP (2.22 kg), although the model remained statistically significant ($p = 0.0015$). These results reflect the intrinsic limitations of DXA, which quantifies only bone mineral content, while physical dissection assesses total bone mass, including organic matter and water. Consequently, predictive performance depends on the regional balance between the mineral and nonmineral components of bones.

Compared to the results of Mercier et al. (2006), who evaluated the predictive capacity of DXA by comparing BMC values with dissected bone mass in individual cuts of sheep (e.g., $R^2 = 0.47$ in the shoulder and $R^2 = 0.43$ in the leg), the present study achieved higher coefficients of determination, with $R^2 = 0.80$ in the shoulder region (S1) and $R^2 = 0.51$ in the leg region

(S5). This indicates that the DXA-based BMC provided superior prediction of bone mass in these regions of culled Nellore cows. Regarding total bone mass prediction, Segura et al. (2021) reported an R^2 of 0.82 in adult cow cuts, while the present study obtained an overall R^2 of 0.73, showing that our results are comparable and in close agreement with previously reported values. Moreover, in regions with lower bone quantity and variability, such as the flank, Segura et al. observed reduced predictive performance ($R^2 = 0.31$), which is in line with the intermediate value found in section S4 ($R^2 = 0.55$) in the present study. These comparisons demonstrate that DXA can reliably predict bone mass across different anatomical regions, with performance influenced by regional bone distribution and variability.

In addition to evaluating total dissected fat relative to total fat predicted by DXA, we also tested a simpler approach: using DXA estimates of carcass fat and individual sections to predict total dissected subcutaneous fat of the carcass (Table 3). The DXA estimate of total fat for the entire carcass showed excellent predictive ability for dissected subcutaneous fat ($R^2 = 0.97$, RMSEP = 0.94 kg, AICc = 25.94). Among the predictors by section, performance was robust, with R^2 ranging from 0.79 (S1) to 0.92 (S4), RMSEP between 1.44 and 2.26 kg, and AICc between 46.50 and 68.08. Sections S4 and S3 stood out as the best predictions by section (S4: $R^2 = 0.92$, RMSEP = 1.44 kg; S3: $R^2 = 0.90$, RMSEP = 1.57 kg), while S1 had the weakest fit ($R^2 = 0.79$, RMSEP = 2.26 kg). These findings indicate that although DXA estimates total fat (including intramuscular fat), both the total carcass fat estimate and the section estimates on DXA reliably predict the subcutaneous fat obtained by dissection. When whole carcass scanning is not available, section S4 (and, to a lesser extent, S3) is the best single-section alternative.

These results reinforce the classical use of subcutaneous fat as a low-cost method that can be quickly applied in both industry and nutritional management research (Tait, 2016). At the same time, they demonstrate that DXA not only replicates the reliability of this measurement

across many carcass regions but also outperforms it, offering additional advantages in speed, objectivity, and data richness. Altogether, the findings support the potential of DXA to surpass traditional destructive methods, especially when high precision is required for genetic selection or the validation of nutritional protocols.

CONCLUSIONS

The results of this study demonstrate that the DXA technique performs well in predicting the physical composition of carcasses from cull Nellore cows, showing high accuracy for fat, satisfactory performance for muscle, and moderate precision for bone. The developed equations exhibited good statistical fit, with particular emphasis on fat, highlighting the strong predictive capacity of these models across all evaluated scenarios.

The section analysis indicated that specific regions of the carcass can be used as a representative of the total composition, which makes the use of DXA more feasible in an industrial setting. Section S2 was slightly more accurate for fat, while S4 and S5 performed better for muscle, and S1 performed well for mineral content. In addition, comparative analysis with dissected subcutaneous fat reinforces the potential of DXA as an alternative to traditional methods, especially when greater accuracy, speed, and data richness are sought. These results reinforce the potential of DXA as a non-destructive and efficient tool for carcass evaluation, especially in situations where complete scanning is not feasible.

CONFLICTING INTERESTS

The authors declare no conflicts of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ciência Animal (INCT-CA), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PROCESSO PROEX 88887.844747/2023-00), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Instituto de Inteligência Artificial e Computacional (Idata UFV) FINEP 0284/22 Plataforma multiusuária de Inteligência Artificial aplicada à agropecuária digital IA-AD-UFV and 0283-19 Uso de imagens digitais no melhoramento genético visando ampliar qualitativamente e quantitativamente a produção animal and FAPEMIG RED-00172-22 Rede de pesquisa em Inteligência Artificial aplicada à pecuária digital - Rede IAPD.

LITERATURE CITED

- Allen, P. (2021). Recent developments in the objective measurement of carcass and meat quality for industrial application. *Meat Science*, 181, 108601. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108601>
- Boito, B.; kuss, F.; menezes, L.F.G. de; lisbinski, E.; Paris, M. de.; Cullmann, J.R. Influence of subcutaneous fat thickness on the carcass characteristics and meat quality of beef cattle. *Ciência Rural*, v.48, e20170333, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170333>.
- Calnan, H., Williams, A., Peterse, J., Starling, S., Cook, J., Connaughton, S., & Gardner, G. E. (2021). A prototype rapid dual energy X-ray absorptiometry (DXA) system can predict the CT composition of beef carcasses. *Meat Science*, 173, 108397–108312. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108397>

- Clarke, R. D., Kirton, A. H., Bartle, C. M., & Dobbie, P. M. (1999). Application of dual-energy X-ray absorptiometry for ovine carcass evaluation. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 59, 272–274.
- Gardner, G., Anderson, F., Smith, C., & Williams, A. (2021). Using dual energy X-ray absorptiometry to estimate commercial cut weights at abattoir chain-speed. *Meat Science*, 173, 108400. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108400>
- Kipper, M., Marcoux, M., Andretta, I., & Pomar, C. (2019). Assessing the accuracy of measurements obtained by dual-energy X-ray absorptiometry on pig carcasses and primal cuts. *Meat Science*, 148, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.10.005>
- Lerch, S., Morel, I., Dohme-Meier, F., Le Cozler, Y., & Xavier, C. (2023). Estimation of body and carcass composition of crossbred growing bulls from 11th rib dissection. *Animal - Open Space*, 2, 100030. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2022.100030>
- López-Campos, O., Roberts, J. C., Larsen, I. L., Prieto, N., Juárez, M., Dugan, M. E. R., & Aalhus, J. L. (2018). Rapid and non-destructive determination of lean fat and bone content in beef using dual energy X-ray absorptiometry. *Meat Science*, 146, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.009>
- Mercier, J., Pomar, C., Marcoux, M., Goulet, F., Theriault, M., & Castonguay, F. W. (2006). The use of dual-energy X-ray absorptiometry to estimate the dissected composition of lamb carcasses. *Meat Science*, 73(2), 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.11.024>
- Moreira, A. D., G. R. Siqueira, J. F. Lage, J. M. B. Benatti, M. H. Moretti, G. Z. Miguel, I. M. de Oliveira, and F. D. de Resende. 2018. Castration methods in crossbred cattle raised on tropical pasture. *Animal Production Science*. 58:1307. doi:10.1071/AN16580.
- Nielsen, A. J. (1973). Anatomical and chemical composition of Danish Landrace pigs slaughtered at 90 kilograms live weight in relation to litter, sex and feed composition. *Journal of Animal Science*, 36(3), 476–483. <https://doi.org/10.2527/jas1973.363476x>

- Schallier, S., Li, C., Lesuisse, J., Janssens, G. P. J., Everaert, N., & Buyse, J. (2019). Dual-energy X-ray absorptiometry is a reliable non-invasive technique for determining whole body composition of chickens. *Poultry Science*, 98, 2652–2661. <https://doi.org/10.3382/ps/pez013>
- Segura, J., Aalhus, J. L., Prieto, N., Zawadski, S., Scott, H., & López-Campos, Ó. (2023). Prediction of primal and retail cut weights, tissue composition and yields of youthful cattle carcasses using computer vision systems; whole carcass camera and/or ribeye camera. *Meat Science*, 199, 109120. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109120>
- Tait, R. G. (2016). Ultrasound use for body composition and carcass quality assessment in cattle and lambs. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 32(1), 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2015.09.007>
- Tedeschi, L. O. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*, 89(2–3), 225–247. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.004>
- Xavier, C., Morel, I., Dohme-Meier, F., Siegenthaler, R., Le Cozler, Y., & Lerch, S. (2023). Estimation of carcass chemical composition in beef-on-dairy cattle using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) scans of cold half-carcass or 11th rib cut. *Journal of Animal Science*, 101, 1–12. <https://doi.org/10.1093/jas/skad380>

Figures and Tables

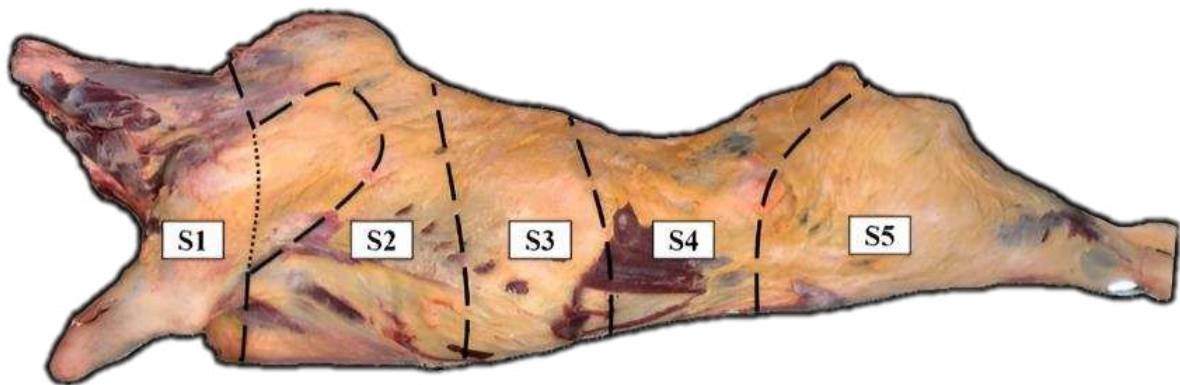


Figure 1. Schematic representation of the five standardized sections (S1 to S5) of the right half of the carcasses of cull cows used for analysis. The anatomical boundaries were: S1, cross-section immediately after the second rib; S2, cross-section after the eighth rib; S3, cross-section immediately after the thirteenth rib; S4, cross-section after the sacrum; and S5, the remaining part of the carcass, comprising the hindquarter.

Table 1. Descriptive statistics of carcass composition based on dissection (physical) and DXA (estimated) in cull cows.

Tissue	Section	Dissection (kg)					DXA (kg)				
		Mean	SD	Min.	Max.	CV (%)	Mean	SD	Min.	Max.	CV (%)
Meat	Carcass	85.19	10.43	55.76	99.31	12.25	101.66	13.95	63.66	123.58	13.72
	S1	25.18	2.96	17.80	29.10	11.75	32.13	4.26	22.93	39.53	13.25
	S2	11.33	2.18	6.80	15.10	19.21	14.27	2.71	8.52	19.27	18.97
	S3	6.29	1.33	3.90	10.05	21.08	8.53	1.64	5.42	13.39	19.17
	S4	12.52	1.81	7.85	15.35	14.41	15.28	2.71	8.25	19.48	17.77
	S5	24.86	3.15	14.00	29.85	12.66	31.46	4.45	17.47	38.96	14.15
Fat	Carcass	22.93	7.89	10.25	40.16	34.42	26.23	11.57	13.65	52.52	44.09
	S1	5.27	1.34	2.85	8.31	25.56	6.26	2.13	3.79	11.70	34.02
	S2	4.32	1.66	1.64	7.91	38.28	4.55	2.18	1.87	10.81	47.80
	S3	3.70	2.04	1.29	8.62	55.03	3.45	2.12	1.25	9.07	61.41
	S4	4.82	2.01	2.28	9.19	41.65	5.08	2.93	1.96	11.99	57.72
	S5	4.81	1.45	2.01	7.86	30.21	6.90	2.86	3.98	15.88	41.50
Bone	Carcass	21.31	2.75	15.49	26.47	12.90	7.07	1.26	4.46	9.64	17.82
	S1	6.92	0.93	5.70	8.70	13.46	2.25	0.39	1.61	3.05	17.43
	S2	3.57	0.73	2.20	5.15	20.40	1.04	0.21	0.58	1.40	20.29
	S3	2.25	0.50	1.30	3.35	22.06	0.78	22.38	0.40	1.07	22.38
	S4	3.09	0.58	1.95	3.97	18.85	0.94	0.27	0.53	1.57	28.92
	S5	5.49	0.68	3.75	7.10	12.49	2.07	0.35	1.17	2.72	16.74

Mean, minimum (Min.), maximum (Max.), and standard deviation (SD) of the mass (kg) of meat, fat, and bone of the total carcass and of five standardized sections (S1-S5), obtained by physical dissection and by dual-energy X-ray absorptiometry (DXA).

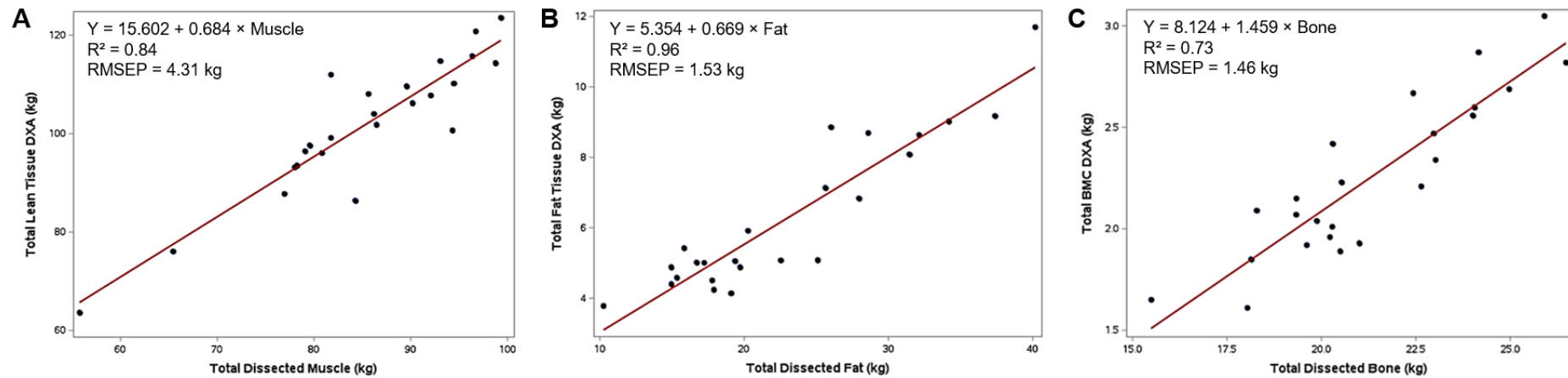


Figure 2. Linear regression equations for predicting the total carcass weight of muscle, fat, and bone (kg) from DXA estimates in cull cows. Panels show the relationships between the weights of dissected muscle (A), fat (B), and bone (C) and their respective estimates obtained by dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). DXA lean tissue, DXA adipose tissue, and DXA BMC correspond to estimates of muscle, fat, and bone mineral content, respectively. R^2 = coefficient of determination; RMSEP = root mean square error of prediction.

Table 2. Linear regression equations for predicting the total physical carcass composition in different tissues (muscle, fat, and bone) based on DXA values in five sections of the half-carcass.

Tissue	Section	Equation	R ²	RMSEP (kg)	AICc	<i>p-value</i>
Meat	1	Y = 20.179 + 2.023 Lean tissue DXA	0.68	6.02	115.24	<0.0001
	2	Y = 39.310 + 3.240 Lean tissue DXA	0.70	5.82	113.66	<0.0001
	3	Y = 55.033 + 3.575 Lean tissue DXA	0.31	8.86	133.82	0.0045
	4	Y = 33.732 + 3.391 Lean tissue DXA	0.78	5.07	106.99	<0.0001
	5	Y = 21.163 + 2.046 Lean tissue DXA	0.76	5.25	108.70	<0.0001
Fat	1	Y = 1.518 + 3.420 Fat tissue DXA	0.85	3.10	83.48	<0.0001
	2	Y = 7.408 + 3.409 Fat tissue DXA	0.88	2.75	77.73	<0.0001
	3	Y = 11.021 + 3.456 Fat tissue DXA	0.86	3.04	82.39	<0.0001
	4	Y = 10.194 + 2.509 Fat tissue DXA	0.87	2.94	80.83	<0.0001
	5	Y = 5.274 + 2.559 Fat tissue DXA	0.86	3.00	81.85	<0.0001
Bone	1	Y = 7.172 + 6.273 BMC DXA	0.80	1.25	39.68	<0.0001
	2	Y = 10.303 + 10.637 BMC DXA	0.66	1.64	52.81	<0.0001
	3	Y = 13.786 + 9.685 BMC DXA	0.38	2.22	67.42	0.0015
	4	Y = 14.234 + 7.573 BMC DXA	0.55	1.88	59.33	<0.0001
	5	Y = 9.545 + 5.678 BMC DXA	0.51	1.96	61.43	<0.0001

Lean tissue, fat tissue, and BMC refer, respectively, to estimates of meat, fat, and bone mineral content obtained by DXA in standardized sections of the half-carcass. R² = coefficient of determination; RMSEP = root mean square error of prediction; AICc = corrected Akaike information criterion; *P-value* = probability associated with the slope parameter in the regression model.

Table 3. Simple linear regression equations for predicting subcutaneous carcass fat from total fat and sections obtained by DXA.

Tissue (kg)	Section	Equation	R ²	RMSEP	AICc
Subcutaneous Fat	Carcass	$Y = -2.415 + 0.412 \text{ Fat tissue DXA}$	0.97	0.94	25.94
	1	$Y = -4.307 + 2.031 \text{ Fat tissue DXA}$	0.79	2.26	68.08
	2	$Y = -0.845 + 2.031 \text{ Fat tissue DXA}$	0.83	2.06	63.77
	3	$Y = 0.901 + 2.178 \text{ Fat tissue DXA}$	0.90	1.57	50.79
	4	$Y = 0.348 + 1.587 \text{ Fat tissue DXA}$	0.92	1.44	46.50
	5	$Y = -2.523 + 1.584 \text{ Fat tissue DXA}$	0.87	1.78	56.82

Dissected fat: total carcass fat obtained by physical dissection; DXA fat: total carcass fat estimated by DXA. R² = coefficient of determination; RMSEP = root mean square error of prediction; AICc = corrected Akaike information criterion.

7. CONCLUSÕES

Com o presente estudo, evidenciou-se o potencial da absorciometria de raios X de dupla energia (DXA) como ferramenta alternativa para estimar a composição física de carcaças de vacas Nelore de descarte. Na comparação com os dados de dissecação física, a técnica apresentou maior precisão na estimativa da gordura, seguida do músculo, com desempenho ligeiramente menor para o osso. Além disso, a DXA mostrou alta capacidade de prever a gordura subcutânea total, tanto quando estimada a partir da gordura total da carcaça quanto quando avaliada por seções específicas, destacando as seções S4 e S3 como particularmente representativas.

O estudo também indicou que determinadas seções anatômicas da carcaça podem representar com boa fidelidade a composição total dos tecidos, o que reforça a aplicabilidade do DXA mesmo quando utilizado em regiões representativas da carcaça. Esses achados evidenciam o potencial da técnica como método não destrutivo, rápido e eficiente, com aplicação prática em ambientes industriais e em pesquisas que visam à avaliação objetiva da composição corporal em bovinos.