

UFRRJ
INSTITUTO DE ZOOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL

DISSERTAÇÃO

**Metodologias de Avaliações Ósseas para a Determinação da
Biodisponibilidade Relativa de Fósforo para Aves e Suínos**

Leila Cristina Salles Moura

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ZOOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL**

**METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES ÓSSEAS PARA A
DETERMINAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE RELATIVA DE
FÓSFORO PARA AVES E SUÍNOS**

Leila Cristina Salles Moura

Sob a Orientação do Professor
Luan Sousa dos Santos

e Co-orientação do Professor
Felipe Dilelis

Dissertação submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de
Mestre(a), no Curso de Pós-Graduação
em Ciência Animal, Área de
Concentração Zootecnia

Seropédica, RJ
Agosto de 2025

M929m

Moura, Leila Cristina Salles, 1997-

Metodologias de avaliações ósseas para a determinação da biodisponibilidade relativa de fósforo para aves e suínos / Leila Cristina Salles Moura. - Seropédica, 2025.

66 f. : il.

Orientador: Luan Sousa dos Santos.

Coorientador: Felipe Dilelis.

Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Ciência Animal UENF/UFRRJ, 2025.

1. Densitometria óssea. 2. Fosfatos. 3. Ossos - Metabolismo. 4. Suínos - Alimentação e rações. I. Santos, Luan Sousa dos, 1990-, orient. II. Dilelis, Felipe, 1988-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Ciência Animal UENF/UFRRJ. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ZOOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL**

LEILA CRISTINA SALLES MOURA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência Animal**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, área de Concentração em Zootecnia.

DISSERTAÇÃO, APROVADA EM 04 / 08 / 2025

Documento assinado digitalmente
 **LUAN SOUSA DOS SANTOS**
Data: 30/10/2025 12:45:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

Luan Sousa dos Santos. Dr. UFMS
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **ALICIA ZEM FRAGA**
Data: 30/10/2025 21:56:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

Alicia Zem Fraga. Dra. UFRRJ

Digitally signed by Hector
Salgado
Date: 2025.11.03 16:19:42
-05'00'

Assinatura

Hector Salgado Romero. Dr. Université Laval

DEDICATÓRIA

*À minha mãe, ao meu pai, ao meu
irmão, à minha avó. É tudo por
você!*

*Aos amigos, família que escolhemos
ao longo da vida, pois eu não teria
chegado até aqui sem vocês.*

Àqueles que me regem. Axé!

Em memória, ao meu avô Ivan.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e àqueles que me regem e me sustentam.

À minha mãe e ao meu pai por sempre acreditarem e investirem seu amor em mim. Ao meu irmão por todas as vezes que estive lá quando precisei. Isso é tudo por vocês.

À minha avó e ao meu baby Rhavi. A diferença de gerações só me faz ver como a vida é bonita e que deve ser vivida já.

Às minhas amigas Thalita e Juliana por toda força e colo.

À minha companheira Diana que dividiu esse caminho comigo.

A toda equipe de Suinocultura da UFRRJ, em especial Rayna, Manu e Júlia. Vocês são todos incríveis! Obrigada por participarem dessa jornada e proporcionarem o acontecimento dessa pesquisa.

Ao meu orientador, Professor Luan, e ao meu coorientador, Professor Felipe, por todo conhecimento passado e por toda assistência, mesmo a distância.

Aos meus amigos alheios a esse mundo acadêmico, obrigada por estarem comigo mesmo na minha ausência.

Agradeço à Rural pelos 10 anos mais lindos da minha vida. Vou sentir saudades!

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

RESUMO GERAL

MOURA, Leila Cristina Salles. **Metodologias de Análises Ósseas para a Determinação da Biodisponibilidade Relativa de Fósforo para Aves e Suínos**. 2025. 68p Dissertação (Mestrado em Ciência Animal). Instituto de Zootecnia, Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

O fósforo (P) é um dos minerais essenciais para a vida e o desenvolvimento dos animais. Entretanto, devido à alta excreção de P pelos suínos, seu uso tem sido negativamente relacionado ao desenvolvimento sustentável da produção. Portanto, é essencial conhecer o real uso das fontes de P pelos animais para a formulação de rações cada vez mais precisas pelos nutricionistas. Os testes de biodisponibilidade relativa (BDR) permitem entender o real uso de diferentes fontes de nutrientes, utilizando uma fonte principal como referência. Por padrão, o osso é um dos principais tecidos que respondem aos níveis de P da dieta. No entanto, não há um consenso na literatura que indique a principal análise óssea realizada para a avaliação da BDR de P. A hipótese testada é a de que é possível padronizar um método ideal para a determinação da BDR de P, de modo que há uma avaliação óssea e um tipo de osso, entre costela e metacarpo, que melhor indica o parâmetro de ingestão de P. Neste sentido, o objetivo por meio do presente estudo foi: (1) revisar sistematicamente os estudos de BDR de P para aves e suínos e (2) investigar a correlação entre diferentes metodologias de avaliação óssea, bem como sua correlação com dados de ingestão de P e desempenho de suínos em crescimento suplementados com fosfatos bicálcico (FBC), tricálcico (FTC) e monossódico (FMS). Com a revisão sistemática foi possível identificar a falta de padronização nos ensaios de BDR de Ca e P, com o uso de diferentes fontes padrão utilizado nos ensaios, bem como a adoção de diferentes ossos e avaliações ósseas. Portanto, torna-se necessária a maior atenção de nutricionistas e pesquisadores ao considerarem os dados de BDR para a escolha de ingredientes mais biodisponíveis. Além disso, torna-se importante a padronização das metodologias aplicadas aos ensaios de BDR. Com os resultados da investigação metodológica foi possível estabelecer que as análises de cinzas em gramas (Cg), densidade mineral óssea em mmAl (DMOmmAl) e em cm² (DMOcm²) são bons indicadores da mineralização óssea, a partir de suas respostas de correlação aos dados de ingestão de P. Em acréscimo, propõe-se a utilização de ossos com mais proporção de osso trabecular, como a costela, uma vez que esta estrutura apresentou maior sensibilidade aos níveis de ingestão de P.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável, Fosfatos, Suínos.

GENERAL ABSTRACT

MOURA, Leila Cristina Salles. **Bone Assessment Methodologies to Determine Phosphorus Relative Bioavailability to Poultry and Swine**. 2025. 68p Dissertation (Master Science in Animal Science) Institute of Animal Science, Animal Science Graduate Program, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Phosphorus (P) is one of the essential minerals for animal life and development. However, due to the high excretion of P by pigs, its use has been negatively impacted by sustainable production. Therefore, understanding the actual use of P sources by animals is essential for nutritionists to formulate increasingly accurate rations. Relative bioavailability (RBA) tests allow us to understand the actual use of different nutrient sources, using a primary source as a reference. By default, bone is one of the primary tissues that respond to dietary P levels. However, there is no consensus in the literature regarding the main bone analysis performed to assess the RBV of P. The hypothesis tested is that it is possible to standardize an ideal method for determining the RBV of P, so that there is a bone evaluation and a bone type, between rib and metacarpal, which best indicates the P intake parameter. Therefore, the objective of this study was to: (1) systematically review the RBV of Ca and P studies for poultry and swine and (2) investigate the correlation between different bone assessment methodologies, as well as their correlation with P intake and performance data of growing pigs supplemented with dicalcium (DCP), tricalcium (TCP), and monosodium (MSF) phosphates. The systematic review identified the lack of standardization in the RBV of Ca and P assays, with the use of different standard sources used in the assays, as well as the adoption of different bones and bone evaluations. Therefore, nutritionists and researchers must pay greater attention when considering RBV data to select more bioavailable ingredients. Furthermore, standardizing the methodologies applied to RBV assays is crucial. Thus, the results of the experiment established that analyses of ash in grams (Ag), bone mineral density in mmAl (BMDmmAl), and in cm² (BMDcm²) are good indicators of bone mineralization, based on their correlation responses to P intake data. In addition, the use of bones with a higher proportion of trabecular bone, such as ribs, is proposed, since this structure showed greater sensitivity to P intake levels.

Keywords: Phosphates, Sustainable Development, Swine.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Biodisponibilidade Relativa	2
2.2 Metabolismo Ósseo de Fósforo.....	3
2.3 Fosfatos Inorgânicos e Fontes Padrão	6
3 REFERÊNCIAS	8
CAPÍTULO I: METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES ÓSSEAS PARA A DETERMINAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE RELATIVA DE FÓSFORO E CÁLCIO EM AVES E SUÍNOS: REVISÃO SISTEMÁTICA.....	12
RESUMO.....	13
ABSTRACT	14
4 INTRODUÇÃO	15
5 METODOLOGIA.....	16
6 RESULTADOS	18
7 DISCUSSÃO	25
7.1 Ensaios de Biodisponibilidade	25
7.2 Fontes Padrão e Ossos.....	25
7.3 Análises Ósseas e Biodisponibilidade.....	26
7.4 Utilização dos Dados de Biodisponibilidade.....	28
8 CONCLUSÃO.....	30
9 REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO II: METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES ÓSSEAS PARA A DETERMINAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE RELATIVA DE FÓSFORO PARA SUÍNOS EM CRESCIMENTO.....	37
RESUMO.....	38
ABSTRACT	39

10 INTRODUÇÃO	40
11 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
11.1 Animais, Ambiente e Ração.....	41
11.2 Preparo de Amostras e Análises Ósseas	43
11.3 Análises Estatísticas.....	43
12 RESULTADOS	45
13 DISCUSSÃO	50
14 CONCLUSÃO.....	54
15 REFERÊNCIAS	55
16 CONCLUSÕES GERAIS	58

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos minerais essenciais para a vida e o desenvolvimento dos animais, estando associado a diversos processos metabólicos, à formação de moléculas de DNA e RNA, além de compor estruturalmente as membranas celulares e o osso (Suttle, 2010). Este mineral, no entanto, está também negativamente envolvido com o desenvolvimento sustentável da produção de suínos. O excesso de fornecimento de nutriente acarreta a sua excreção e, uma vez que estes nutrientes entram em contato com os cursos d'água, contribui para o processo de eutrofização das águas (McDonald *et al.*, 2010).

Apesar de presente nos principais ingredientes da ração, como milho e farelo de soja, este mineral se encontra na forma de ácido fítico, sendo considerada uma fração indigestível de P para não-ruminantes. Por esse motivo torna-se necessária a suplementação de P de fontes inorgânicas ou a utilização de fitase exógena (Humer *et al.*, 2014), enzima que permite a quebra da estrutura e, consequentemente, a disponibilidade do mineral para os animais.

Deste modo, é notável a importância da avaliação das fontes de P quanto a sua digestão, absorção e utilização, a fim de mitigar o excesso de P excretado, bem como as deficiências nutricionais. Assim, testes de digestibilidade e de biodisponibilidade de P se apresentam como ferramentas importantes para entender o seu real aproveitamento do nutriente oriundo das diversas fontes utilizadas nas dietas dos animais (Dilelis *et al.*, 2020; Lautrou *et al.*, 2021; Zhai *et al.*, 2022).

A biodisponibilidade é descrita como a capacidade de utilização de um nutriente ingerido, sendo encontrada a termos de biodisponibilidade relativa (BDR). Para isso os testes realizados visam calcular a relação entre o nível de ingestão de uma fonte teste e uma fonte padrão necessário para produzir uma mesma resposta (Littell *et al.* 1995; Zhai *et al.*, 2022). No entanto, os estudos de BDR não são padronizados, o que dificulta a replicação dos estudos e a comparação dos dados. Petersen *et al.* (2011) destacam a impossibilidade de comparação entre experimentos em função do uso de diferentes fontes padrão nos ensaios. Em acréscimo, Woyengo *et al.* (2016) concluem que os resultados de biodisponibilidade de P podem variar de acordo com as diferentes análises empregadas. Portanto, torna-se necessária a padronização dos ensaios de BDR de Ca P, a fim de conhecer o real aproveitamento deste nutriente e mitigar as problemáticas resultantes do seu uso na produção de aves e suínos.

Desse modo, sob a hipótese de que (1) não há uma padronização dos ensaios de biodisponibilidade de Ca ou P para aves e suínos e (2) há ao menos uma avaliação óssea e um tipo ósseo que melhor se correlacione aos dados de ingestão de P para os ensaios de BDR de P, o objetivo por meio do presente estudo foi: (1) revisar sistematicamente os estudos de BDR de Ca e P para aves e suínos e (2) investigar a correlação entre diferentes metodologias de avaliação óssea, bem como sua correlação com dados de ingestão de P e desempenho de suínos em crescimento suplementados com fosfatos bicálcico (FBC), tricálcico (FTC) e monossódico (FMS).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Sendo um mineral essencial para o desenvolvimento dos animais, o P precisa comumente ser suplementado nas dietas de suínos. O fósforo está presente nos principais ingredientes da ração, como o milho e o farelo de soja, armazenado, em sua grande parte, na forma de ácido fítico. O nutriente é, no entanto, considerado por vezes indisponível para aves e suínos em função da baixa secreção da enzima fitase (Humer *et al.*, 2014), responsável pela hidrólise da molécula. A adição de fitases exógenas e a suplementação com fosfatos inorgânicos têm sido alternativas para solucionar este problema.

Para a suplementação com fosfatos inorgânicos são utilizados os fosfatos extraídos de rochas, fonte onerosa e oriunda de recursos não renováveis que poderão se esgotar ao longo das próximas décadas (Neset & Cordell, 2011). Além disso, nem todo o fósforo disponível será de fato utilizado pelo animal. O conteúdo de P das fezes poderá então depender da disponibilidade de P das fontes, da quantidade de P ofertada e, ainda, das perdas endógenas resultantes dos processos metabólicos (Zhai *et al.*, 2022).

O aumento da excreção de P está negativamente associado à sustentabilidade na produção animal, uma vez que contribui para processos de eutrofização dos cursos d'água (McDonald *et al.*, 2010). Desse modo, é importante conhecer os aspectos nutricionais dos ingredientes utilizados e assim ter conhecimento das alternativas possíveis para a suplementação de P nas dietas para o fornecimento de dieta balanceada, diminuindo custos e desperdícios.

2.1 Biodisponibilidade Relativa

Ammerman *et al.* (1995) definem biodisponibilidade como o grau em que um nutriente ingerido numa determinada fonte é absorvido numa forma que pode ser utilizada no metabolismo do animal. A biodisponibilidade de P refere-se à capacidade de digestão, absorção e utilização do nutriente, ou seja, o quanto é absorvido e utilizado pelo animal, não podendo ser medida em termos absolutos, mas sim sendo comparado a um padrão (Zhai *et al.*, 2022), podendo ser encontrada em termos de biodisponibilidade relativa (BDR). Para isso, testes de BDR calculam a razão entre os níveis necessários para que uma fonte teste e de uma fonte padrão produzam uma resposta equivalente de determinado parâmetro biológico adotado que seja influenciado pelo nutriente (Littell *et al.*, 1995; Ammerman *et al.*, 1995), de modo que a fonte padrão é considerada como 100% biodisponível.

Estima-se a utilização de P pelo organismo por meio da comparação entre os dados de ingestão do mineral e, geralmente, um parâmetro ósseo, uma vez que o osso é o maior local de deposição do nutriente no organismo. Para tanto, utiliza-se a técnica denominada de *slope ratio* (Figura 1), descrita por Littell *et al.* (1997), que aponta a razão de inclinação entre as variáveis de ingestão e de resposta óssea.

A técnica *slope ratio* é comumente utilizada nos estudos de biodisponibilidade de P. Para o cálculo, supõe-se que existe uma relação linear entre a fonte padrão e a fonte teste, e que a resposta de ambas é igual em um valor de zero (Ammerman *et al.*, 1995). Com o resultado do cálculo de regressão linear de ambas as fontes, a BDR é calculada como a razão entre os coeficientes de regressão da fonte padrão e da fonte teste.

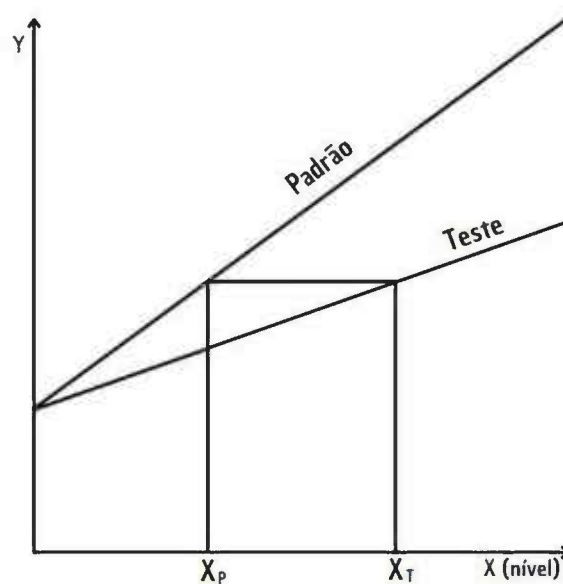


Figura 1. Exemplo de ensaio de razão de inclinação para biodisponibilidade de nutrientes. Adaptado: Littell *et al.* (1997).

Littell *et al.* (1997) ilustram na Figura 1 o gráfico resultante dos cálculos de biodisponibilidade de um nutriente. Neste caso, pode-se considerar que a BDR pode ser obtida através da divisão de X_p/X_T , que representa o nível X de ingestão de um nutriente padrão (P) pela quantidade X de ingestão de um nutriente teste (T). Para uma análise mais específica, pode-se considerar que as linhas f e g sejam obtidas através de uma função de regressão linear simples:

$$f(X_p) = a + b_p X_p$$

$$g(X_T) = a + b_T X_T$$

onde b são as constantes de regressão, que podem também ser contrastadas para a obtenção da BDR. Desse modo:

$$X_p/X_T = b_T/b_p$$

Essas equações podem ser combinadas para a obtenção de uma regressão linear múltipla, deste modo:

$$Y = a + b_p X_p + b_T X_T$$

onde Y é a resposta do parâmetro biológico; X_p e X_T são os níveis de ingestão de uma fonte padrão e uma fonte teste, respectivamente; a é o intercepto comum; e b_p e b_T serão as constantes obtidas por meio dos dados analisados.

2.2 Metabolismo Ósseo de Fósforo

O P é o segundo mineral de maior concentração no corpo dos animais, estando atrás apenas do Ca. Os ossos são o maior depósito de P no organismo, chegando a deter cerca de 80% do total presente (Zhai *et al.*, 2022), sendo depositados na forma de dihidroxipatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). Os ossos fornecem estrutura sólida para o corpo, protegendo órgãos e envolvendo cavidades internas que contêm a medula óssea, onde as células sanguíneas são formadas (Wawrzyniak e Balawender, 2022).

O osso é um tecido de constantes processos de formação, remodelação e reabsorção. Em momentos de restrições do fornecimento de minerais pela dieta, o osso será o local de retirada destes nutrientes para a manutenção da homeostase de Ca e P (Zhai *et al.*, 2022). Desta forma, uma suplementação adequada, que atenda as exigências metabólicas dos animais, é essencial para a obtenção de bons índices zootécnicos e de massa óssea bem estruturada.

A concentração de fósforo no sangue dependerá de processos como a deposição óssea e muscular, bem como por perdas endógenas nas fezes, na urina e na produção de leite (Goff, 2015). A absorção desses minerais será regulada pela produção renal do hormônio 1,25-dihidroxivitamina D (calcitrol) ou pela produção de paratormônio (PTH). No primeiro caso, há um estímulo provocado pela menor concentração do P no plasma sanguíneo, aumentando a absorção intestinal do mineral e inibindo a secreção de PTH, permitindo então a mineralização óssea. O PTH, por sua vez, atuará em momentos de deficiência de Ca, influenciando indiretamente a ação dos osteoclastos na degradação óssea para liberação de Ca e P para o fluido extracelular. Além disso, atua estimulando a secreção de P renal e salivar para evitar a hiperfosfatemia (Bergwitz & Jüppner, 2010; Goff, 2015 Lautrou *et al.*, 2021).

Por ser o local de maior deposição de P no organismo, os ossos são comumente utilizados nos estudos de BDR de P. Em um levantamento prévio realizado na plataforma Pub Med envolvendo o tema “biodisponibilidade de P em aves e suínos”, com publicações entre 2000 e 2023, observou-se que a utilização dos ossos tíbia, metacarpo, metatarso e fêmur. Estudos apontam que ossos com maior proporção de osso trabecular parecem responder mais rapidamente às alterações de fornecimento de Ca e P (Kim & Park, 2013; Gerlinger *et al.*, 2019; Floradin *et al.*, 2024) em função da maior superfície de contato para a atuação das células ósseas. Floradin *et al.* (2024) demonstraram que ossos da coluna lombar foram mais sensíveis à depleção de fósforo, seguidos de ossos da região do tronco (vértebras cervicais, torácicas e lombares e as costelas) e ossos da cabeça. Na fase de reposição, a recuperação foi particularmente mais acentuada nos ossos da região do tronco. Uma vez que os ossos podem responder de maneira diferente, torna-se interessante a avaliação de ossos de diferentes regiões corporais a fim de identificar a estrutura que melhor se relacione aos dados de ingestão de P que são necessários para a obtenção da BDR.

Este levantamento também evidencia uma problemática dos ensaios de BDR, já apontada por autores, como Woyengo *et al.* (2016) que conclui que a diferença nos resultados de BDR pode estar associada às diferentes análises ósseas executadas. A análise óssea para biodisponibilidade de P mais comumente utilizada é a de cinzas ósseas. Apesar do uso comum dos ossos e da maior frequência de utilização da análise de cinzas ósseas, uma das problemáticas na obtenção dos dados de biodisponibilidade encontra-se na ausência de padrão da metodologia aplicada aos ensaios, o que leva a dificuldade na comparação dos resultados (Lautrou *et al.*, 2021). Por exemplo, a BDR de P da farinha de carne e ossos para suínos em crescimento foi avaliada por meio das análises ósseas de força de quebra e cinzas, alcançando valores de 80% para a força de quebra do fêmur, 95% para a força de quebra média dos ossos do metacarpo e metatarso e 88% para as cinzas ósseas do metacarpo, tendo o FMS como fonte padrão (Traylor

et al., 2005a). Em ensaio semelhante, a BDR da farinha de carne e ossos se diferenciou em função da diferença entre as características físicas das farinhas utilizadas, das análises ósseas empregadas e dos ossos adotados, apresentando valores entre 69 e 102% (Traylor *et al.*, 2005b).

Quadro 1. Levantamento de estudos sobre biodisponibilidade de P para aves e suínos entre os anos 2000 e 2023.

Autores	Espécie	Osso	Análises ósseas			
			Cinzas	Força de quebra	[] P	Raio-X / DEXA
Douglas <i>et al.</i> (2000)	aves	tíbia	X	-	-	-
Rao & Eddy (2002)	aves	tíbia	X	-	-	-
Coon <i>et al.</i> (2007)	aves	tíbia	X	X	-	-
Kim <i>et al.</i> (2008)	aves	tíbia	X	-	-	-
Petersen <i>et al.</i> (2011)	suínos	metacarpo	-	X	-	-
Lumpkins & Batal (2005)	aves	tíbia	X	-	-	-
Traylor <i>et al.</i> (2005a)	suínos	fêmur, metacarpo e metatarso	X	X	-	-
Traylor <i>et al.</i> (2005b)	suínos	fêmur, metacarpo e metatarso	X	X	-	-
Baker <i>et al.</i> (2013)	suínos	metacarpo	X	-	X	-
Woyengo <i>et al.</i> (2016)	aves	tíbia	X	-	-	X
Hanna <i>et al.</i> (2018)	aves	tíbia	X	-	-	-
Kim <i>et al.</i> (2019)	aves	tíbia e fêmur	-	-	-	X
Munoz <i>et al.</i> (2020)	aves	tíbia	X	-	-	-
Matin <i>et al.</i> (2021)	aves	tíbia	X	-	-	-
Parsons <i>et al.</i> (2023)	aves	tíbia	X	-	-	-

Para suínos em crescimento, Baker *et al.* (2013) utilizaram as análises de cinzas ósseas e concentração de P no metacarpo para a determinação da BDR de P para o DDGS, apresentando valores de 86 e 88% em relação ao FBC. Na determinação da BDR de P de

fosfatos inorgânicos para suínos em crescimento, por sua vez, a força de quebra do metacarpo foi utilizada como resposta óssea, com o FMS como fonte padrão (Petersen *et al.*, 2011). É possível observar, portanto que os ensaios de BDR se diferenciam não apenas em relação a análise óssea empregada, como também aos ossos analisados e a fonte padrão adotada nos ensaios.

Na avaliação de P de duas cultivares de ervilha para frangos de corte, os resultados de BDR de P para a ervilha marrom variou de 18%, quando consideradas a análise de cinzas ósseas da tíbia, a 40,3%, quando utilizada a análise de densidade obtida pelo DEXA (Woyengo *et al.*, 2016). No mesmo ensaio, para a ervilha amarela, os resultados de cinzas e densidade indicaram BDR de 9,23 e 30,3%, respectivamente, quando considerado do FMS como fonte padrão. Kim *et al.* (2019) avaliaram a densidade mineral dos ossos tíbia e fêmur de frangos de corte, resultando em valores 44% e 41%, respectivamente, de BDR de P em farinha de girassol rica em proteína, comparadas com o FMS como padrão.

Os ensaios descritos reforçam a falta de uma metodologia padrão para a condução dos ensaios de BDR de P tanto para suínos, quanto para aves. Deste modo, torna-se importante a realização de estudos que padronizem as análises de BDR de P, determinando qual o melhor método de avaliação óssea e qual osso mais indicado. Assim, seria possível a comparação entre estudos, tornando os resultados mais confiáveis e utilizáveis de maneira prática.

2.3 Fosfatos Inorgânicos e Fontes Padrão

Com a necessidade de suplementação fosfórica nas dietas, as fontes de fosfato inorgânico mais comumente utilizadas nas dietas de aves e suínos são FBC e FMC, mas fosfato tricálcico (FTC), FMS e fosfato de magnésio (FMG) também podem ser usados (Lee *et al.*, 2022). Para os ensaios de BDR de P, normalmente utilizam-se o FBC, FMC e FMS (Zhai *et al.*, 2022), sendo também encontrados estudos com o uso de fosfato de potássio (KH₂PO₄; Hanna *et al.*, 2018; Munoz *et al.*, 2020; Parsons *et al.*, 2023), ambos sendo utilizados como a fonte padrão nos ensaios.

Inicialmente, para a formação dos fosfatos comerciais, o P é extraído das rochas fosfóricas por processo químico, com a adição de ácido sulfúrico, dando origem ao ácido fosfórico (AF; Loureiro *et al.*, 2005). A partir deste ácido, por meio de reações, obtêm-se então os demais fosfatos utilizados na nutrição animal. O AF reage com o carbonato de cálcio, gerando uma mistura de FBC e FMC. Em uma revisão realizada por Lautrou *et al.* (2021), destaca-se que FMC é mais digestível do que o fosfato mono-bicálcico, seguido pelo FBC. Fontes puras de FBC e FMC contêm concentrações de 22,8% e 26,5% de P, respectivamente, e de 29,5% e 17,1% de Ca. No entanto, os produtos comerciais designados como FBC ou FMC serão uma mistura de ambos compostos em diferentes proporções, podendo haver diferenças entre a utilização das fontes (Petersen *et al.*, 2011).

Para a formação do FTC, o AF reage com carbonato de cálcio para formar fosfito dihidrogenado de cálcio, seguido de calcinação acima de 900°C. Os FTC na sua forma pura não são utilizados na alimentação animal, mas sim o fosfato natural desfluorado, conhecido como FTC por conter principalmente esse composto (Lee *et al.*, 2022). Por meio da reação de AF e hidróxido ou carbonato de sódio, obtêm-se o fosfato trissódico que chega a FMS pelo tratamento em água. Seu uso nos estudos de biodisponibilidade se deve à alta digestibilidade de P.

Há diversas fontes alimentares a serem avaliadas quanto à sua BDR de P, a fim de melhor compreender o aproveitamento desse mineral pelo organismo dos animais. No entanto, é fundamental que seja adotada uma metodologia padronizada para a determinação da BDR para que assim os ensaios tornem-se passíveis de reprodução, com a obtenção de resultados mais confiáveis e comparáveis. Essa abordagem contribuirá para o uso mais preciso do P nas dietas, atendendo às reais exigências nutricionais dos animais e reduzindo a excreção do P não aproveitado, promovendo assim uma produção suína mais eficiente e ambientalmente sustentável.

3 REFERÊNCIAS

AMMERMAN, C. B.; BAKER, D. H.; LEWIS, A. J. **Bioavailability of nutrients for animals**. Academic Press, p. 1-8, 83-94, 1995;

BAKER, S. R.; KIM, B. G.; STEIN, H. H. Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium phosphate and distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. **Journal of animal science**, v. 91, n. 1, p. 203-210, 2013. DOI: 10.2527/jas.2010-3776. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/91/1/203/4702905>. Acesso em: 25 nov. 2024. Acesso em: 25 nov. 2024;

BERGWITZ, C.; JÜPPNER, H. Regulation of phosphate homeostasis by PTH, vitamin D, and FGF23. **Annual review of medicine**, v. 61, n. 1, p. 91-104, 2010. DOI: 10.1146/annurev.med.051308.111339. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4777331/>. Acesso em: 28 nov. 2024;

COON, C. N.; SEO, S.; MANANGI, M. K.. The determination of retainable phosphorus, relative biological availability, and relative biological value of phosphorus sources for broilers. **Poultry science**, v. 86, n. 5, p. 857-868, 2007. DOI: 10.1093/ps/86.5.857. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119398657>. Acesso em: 25 nov. 2024;

DILELIS, F. *et al.* Fósforo digestível de ingredientes para aves: metodologias e atualidades. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e915974543-e915974543, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i7.4543. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342591661_Digestible_phosphorus_of_ingredients_for_poultry_methodologies_and_news. Acesso em: 28 nov. 2024;

DOUGLAS, M. W. *et al.* Nutritional evaluation of low phytate and high protein corns. **Poultry Science**, v. 79, n. 11, p. 1586-1591, 2000. DOI: 10.1093/ps/79.11.1586. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/12236184_Nutritional_evaluation_of_low_phytate_and_high_protein_corns. Acesso em: 25 nov. 2024;

FLORADIN, P.; POMAR, C.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; SCHLEGEL, P. *et al.* Development of the mineralisation of individual bones and bone regions in replacement gilts according to dietary calcium and phosphorus. **Animal**, v. 18, n. 8, p. 101241, 2024. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101241. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731124001721?via%3Dihub>. Acesso em: 4 dez. 2024;

GERLINGER, C. *et al.* Physiological and transcriptional responses in weaned piglets fed diets with varying phosphorus and calcium levels. **Nutrients**, v. 11, n. 2, p. 436, 2019. DOI: 10.3390/nu11020436. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/2/436>. Acesso em: 4 dez. 2024;

GOFF, J. P. Section VIII: Minerals, Bones, and Joints. In: **Dukes' Physiology of Domestic Animals**. 13th ed., p. 567–616, 2015;

HANNA, C. D. *et al.* Phosphorus bioavailability in increased-protein, reduced-fiber canola meal, conventional canola meal, and soybean meal fed to crossbred chicks. **Poultry science**,

97(1), 188–195, 2018. DOI: 10.3382/ps/pex287. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119306066?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

HUMER, E.; SCHWARZ, C.; SCHEDULE, K. Phytate in pig and poultry nutrition. **Journal of animal physiology and animal nutrition**, v. 99, n. 4, p. 605-625, 2015. DOI: 10.1111/jpn.12258. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jpn.12258>. Acesso em: 28 nov. 2024;

KIM, C.; PARK, D. The effect of restriction of dietary calcium on trabecular and cortical bone mineral density in the rats. **Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry**, v. 17, n. 4, p. 123, 2013. DOI: 10.5717/jenb.2013.17.4.123. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4241910/>. Acesso em: 28 nov. 2024;

KIM, E. J.; AMEZCUA, C. M.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS, C. M. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. **Poultry science**, v. 87, n. 4, p. 700-705, 2008. DOI: 10.3382/ps.2007-00302. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119388443?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

KIM, J. W.; SANJAYAN, N.; LETERME, P.; NYACHOTI, C. M. Relative bioavailability of phosphorus in high-protein sunflower meal for broiler chickens and effects of dietary phytase supplementation on bone traits, growth performance, and apparent ileal digestibility of nutrients. **Poultry science**, 98(1), 298–305, 2019. DOI: 10.3382/ps/pey346. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119303128?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

LAUTROU, M. *et al.* Dietary phosphorus and calcium utilization in growing pigs: requirements and improvements. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 8, p. 734365, 2021. DOI: 10.3389/fvets.2021.734365. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8654138/>. Acesso em: 4 dez. 2024;

LEE, S. A.; LOPEZ, D. A.; STEIN, H. H. Mineral composition and phosphorus digestibility in feed phosphates fed to pigs and poultry. **Animal bioscience**, v. 36, n. 2, p. 167, 2022. DOI: 10.5713/ab.22.0322. Disponível em: <https://www.animbiosci.org/journal/view.php?doi=10.5713/ab.22.0322>. Acesso em: 4 dez. 2024;

LITTELL, R. C.; LEWIS, A. J.; HENRY, P. R. Statistical evaluation of bioavailability assays. In: **Bioavailability of nutrients for animals**. Academic Press, p. 5-33, 1995;

LITTELL, R. C. *et al.* Estimation of relative bioavailability of nutrients using SAS procedures. **Journal of Animal Science**, v. 75, n. 10, p. 2672-2683, 1997. DOI: 10.2527/1997.75102672x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/75/10/2672/4624904>. Acesso em: 20 nov. 2024;

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais/fosfato. In: **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, Parte II, Cap.7. p.141-172, 2005;

LUMPKINS, B. S.; BATAL, A. B. The bioavailability of lysine and phosphorus in distillers dried grains with solubles. **Poultry science**, 84(4), 581–586, 2005. DOI: 10.1093/ps/84.4.581. Disponível em: [https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032-5791\(19\)44568-9](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032-5791(19)44568-9). Acesso em: 25 nov. 2024;

MATIN, N.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS, C. M. Phosphorus digestibility and relative phosphorus bioavailability in two dried black soldier fly larvae meals and a defatted black soldier fly larvae meal in broiler chickens. **Poultry science**, v. 100, n. 8, p. 101221, 2021. DOI: 10.1016/j.psj.2021.101221. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579121002558>. Acesso em: 25 nov. 2024;

MCDONALD, P. *et al.* **Animal Nutrition**. 7th ed., Prentice Hall, Harlow, England, p. 112-115, 2010. Disponível em: <https://eliasnutri.files.wordpress.com/2020/07/animal-nutrition-7th-edition.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024;

MUNOZ, J. A.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS, C. M. Phosphorus digestibility and bioavailability in soybean meal, spray-dried plasma protein, and meat and bone meal determined using different methods. **Poultry science**, 99(10), 4998–5006, 2020. DOI: 10.1016/j.psj.2020.06.044. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7598319/>. Acesso em: 25 nov. 2024;

NESET, T. S.; CORDELL, D. Global phosphorus scarcity: identifying synergies for a sustainable future. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 1, p. 2-6, 2012. DOI: 10.1002/jsfa.4650. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.4650>. Acesso em: 28 nov. 2024;

PARSONS, B. W. *et al.* Determination of TMEn, standardized amino acid digestibility, phosphorus digestibility, and phosphorus bioavailability in conventional and reduced phosphorus distillers dried grains with solubles. **Poultry science**, v. 102, n. 7, p. 102743, 2023. DOI: 10.1016/j.psj.2023.102743. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579123002626?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

PETERSEN, G. I.; PEDERSEN, C.; LINDEMANN, M. D.; STEIN, H. H. Relative bioavailability of phosphorus in inorganic phosphorus sources fed to growing pigs. **Journal of Animal Science**, v. 89, n. 2, p. 460-466, 2011. DOI: 10.2527/jas.2009-2161. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/89/2/460/4764228>. Acesso em: 25 nov. 2024;

RAO, S. V.; REDDY, V. R. Relative bio-availability and utilisation of phosphatic fertilisers as sources of phosphorus in broilers and layers. **British Poultry Science**, v. 44, n. 1, p. 96-103, 2003. DOI: 10.1080/0007166031000085274. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0007166031000085274>. Acesso em: 25 nov. 2024;

SHASTAK, Y. *et al.* Comparison and evaluation of bone measurements for the assessment of mineral phosphorus sources in broilers. **Poultry Science**, v. 91, n. 9, p. 2210-2220, 2012. DOI: 10.3382/ps.2012-02179. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119396798>. Acesso em: 4 dez. 2024;

SUTTLE, N. F. **Mineral nutrition of livestock**. 4th ed. CABI. p. 25-41 e 123-156, 2010;

TRAYLOR, S. L.; CROMWELL, G. L.; LINDEMANN, M. D. Bioavailability of phosphorus in meat and bone meal for swine. *Journal of animal science*, 83(5), 1054–1061, 2005a. DOI: 10.2527/2005.8351054x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/83/5/1054/4790809>. Acesso em: 25 nov. 2024;

TRAYLOR, S. L.; CROMWELL, G. L.; LINDEMANN, M. D. Effects of particle size, ash content, and processing pressure on the bioavailability of phosphorus in meat and bone meal for swine. *Journal of animal science*, v. 83, n. 11, p. 2554-2563, 2005b. DOI: 10.2527/2005.83112554x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/83/11/2554/4803117>. Acesso em: 25 nov. 2024;

WAWRZYNIAK, A.; BALAWENDER, K.. Structural and metabolic changes in bone. *Animals*, v. 12, n. 15, p. 1946, 2022. DOI: 10.3390/ani12151946. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2615/12/15/1946>. Acesso em: 4 dez. 2024;

WOYENGO, T. A.; EMIOLA, I. A.; KIM, I. H.; NYACHOTI, C. M. Bioavailability of phosphorus in two cultivars of pea for broiler chicks. **Asian-Australasian journal of animal sciences**, v. 29, n. 3, p. 396, 2016. DOI: 10.5713/ajas.15.0299. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4811792/>. Acesso em: 28 nov. 2024;

ZHAI, H.; ADEOLA, O.; LIU, J. Phosphorus nutrition of growing pigs. **Animal Nutrition**, v. 9, p. 127-137, 2022. DOI: 10.1016/j.aninu.2022.01.010. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9079227/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

**CAPÍTULO I: METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES ÓSSEAS PARA A
DETERMINAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE RELATIVA DE FÓSFORO E
CÁLCIO EM AVES E SUÍNOS: REVISÃO SISTEMÁTICA**

RESUMO

MOURA, Leila Cristina Salles. **Metodologias de Avaliações Ósseas para a Determinação da Biodisponibilidade Relativa de Fósforo e Cálcio em Aves e Suínos: Revisão Sistemática.** 2025. 68p Dissertação (Mestrado em Ciência Animal). Instituto de Zootecnia, Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

A biodisponibilidade relativa (BDR) de fósforo (P) permite compreender o real uso de diversas fontes do nutriente, utilizando uma fonte padrão como referência. Na aplicação dos ensaios de BDR, os ossos são comumente utilizados como tecido alvo de investigação, uma vez que a maior parte do P está contida no osso. No entanto, não há um consenso na literatura que indique a principal análise óssea realizada para a investigação das possíveis deficiências desse nutriente. Neste sentido, objetivou-se com o presente estudo revisar sistematicamente os mais recentes estudos (entre 2000 a janeiro/2025) de BDR de P e cálcio (Ca) em ingredientes fornecidos nas rações de aves e suínos, discorrendo sobre as principais metodologias de avaliação óssea empregadas. Uma chave de busca foi gerada para pesquisas avançadas nas plataformas Pub Med, Web of Science e Scopus. Ao todo, 960 artigos foram localizados, e 22 estudos foram selecionados para a revisão sistemática utilizando o método PRISMA. Os resultados indicam que, embora a avaliação de cinzas em g/osso seja a mais frequentemente utilizada, não há um padrão da metodologia empregada nos estudos. Além disso, há uma variação entre os resultados de BDR em diferentes estudos para uma mesma fonte, o que indica que a falta de padronização pode estar sub ou superestimando os dados. Portanto, torna-se necessário que nutricionistas e pesquisadores estejam atentos à ausência de padronização dos ensaios, fazendo o uso racional das informações para formulação de dietas. No entanto, a padronização metodológica pode assegurar a reprodutibilidade e maior praticidade no uso e na comparação dos dados.

Palavras-chave: Minerais, Não-ruminantes, Nutrição Animal.

ABSTRACT

MOURA, Leila Cristina Salles. **Bone Assessment Methodologies for Determining Relative Phosphorus and Calcium Bioavailability in Poultry and Swine: A Systematic Review.** 2025. 68p Dissertation (Master Science in Animal Science) Institute of Animal Science, Animal Science Graduate Program, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

The relative bioavailability (RBV) of phosphorus (P) can help understand the real use of different sources of the nutrient using a standard source as a reference. In the application of RBV tests, bones are commonly used as the target tissue for investigation, since most of the P is contained in the bone. However, there is no consensus in the literature that indicates the main bone analysis performed to investigate possible deficiencies of this nutrient. In this way, this present study aims to systematically review the most recent studies (between 2000 and January/2025) of RBV of P and calcium (Ca) in ingredients supplied in poultry and swine diets, discussing the main bone assessment methodologies employed. A search key was generated for advanced searches in the PubMed, Web of Science, and Scopus platforms. In total, 960 articles were identified, and 22 studies were selected through a systematic review using the PRISMA method. The results indicate that, although the evaluation of ash in g/bone is the most frequently used, there is no standard methodology employed in the studies. In addition, there is a variation between the RBV results in different studies for the same sources, which indicates that the lack of standardization may be under- or overestimating the data. Therefore, nutritionists and researchers must be aware of the lack of standardization in trials and make rational use of the information to formulate diets. However, methodological standardization can ensure reproducibility and greater practicality in the use and comparison of data.

Keywords: Animal Nutrition, Minerals, Non-ruminants.

4 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente essencial para o metabolismo dos animais (Suttle, 2010) e precisa comumente ser suplementado na dieta de aves e suínos. No entanto, a falta de informações nutricionais precisas pode afetar o desenvolvimento sustentável das produções. Quando fornecido além das exigências, o P é excretado para o ambiente e favorece processos de eutrofização dos cursos d'água (McDonald *et al.*, 2012).

A deposição óssea de P depende da deposição de cálcio (Ca), e vice-versa. As exigências de P estão relacionadas às exigências de Ca, uma vez que sua absorção e utilização estão também relacionadas (Lautrou *et al.*, 2021). O metabolismo desses minerais depende de suas concentrações na dieta e de mecanismos regulatórios intestinais, renais e ósseos (Li *et al.*, 2017). Assim, torna-se essencial o conhecimento do real aproveitamento do Ca e do P que compõem as mais diversas fontes de nutrientes utilizadas na formulação das dietas. Neste sentido, pode-se destacar a determinação de biodisponibilidade de P como uma ferramenta importante para entender o real aproveitamento do P de diversas fontes para os animais.

A biodisponibilidade pode ser encontrada a termos de biodisponibilidade relativa (BDR) uma vez que determina a biodisponibilidade de uma fonte teste comparando-a a uma fonte padrão (Littell *et al.*, 1995; Zhai *et al.*, 2022), a qual será então considerada como 100% biodisponível. Para tanto, são combinadas curvas de regressão linear múltipla às quais relacionam o nível de ingestão do ingrediente ao parâmetro influenciado pelo nutriente investigado. A técnica “*slope ratio*”, descrita por Littell *et al.* (1995), visa calcular a razão da inclinação das curvas de regressão das fontes padrão e teste.

Para Ca e P, o parâmetro comumente utilizado é o ósseo, uma vez que o osso é o local de maior disposição destes minerais no organismo, com aproximadamente 99% de Ca e 80% de P nos animais (Suttle, 2010). No entanto, apesar da importância em conhecer a BDR de nutrientes, uma problemática na obtenção dos dados de biodisponibilidade encontra-se na ausência de padrão da metodologia utilizada, o que leva a dificuldade na comparação dos resultados (Lautrou *et al.*, 2021).

Dessa forma, o real aproveitamento do Ca e P oriundo de diversas fontes alimentares pode estar sub ou superestimado, prejudicando o desempenho dos animais ou contribuindo de forma negativa com a sustentabilidade da produção. Assim, o objetivo por meio do presente estudo foi revisar sistematicamente os mais recentes estudos de BDR de Ca e P em ingredientes fornecidos nas rações de aves e suínos, discorrendo sobre as principais metodologias aplicadas aos ensaios.

5 METODOLOGIA

Para a seleção dos artigos da presente revisão sistemática foi utilizado o método PICOS. Este método é utilizado para elaborar a pergunta que será respondida pela revisão sistemática utilizando os parâmetros:

População (P): aves ou suínos;

Intervenção (I): suplementação de fósforo ou cálcio com fontes teste;

Comparação (C): suplementação de fósforo ou cálcio com fonte padrão;

Resultados (O): biodisponibilidade de fósforo ou cálcio por avaliações ósseas;

Estudo (S): estudos experimentais.

Para tanto, realizou-se uma busca criteriosa por meio de três plataformas de busca utilizando-se palavras chaves:

(1) Pub Med e (2) Web of Science : (“pig” OR “pigs” OR “barrow” OR “barrows” OR “swine” OR “swines” OR “boar” OR “boars” OR “pork” OR “hen” OR “hens” OR “broiler” OR “broilers” OR “chicken” OR “chickens”) AND (“bioavailability” OR “availability”) AND (“bone” OR “bones”) AND (“P” OR “Ca” OR “phosphorus” OR “calcium” OR “phosphate” OR “limestone” OR “dicalcium” OR “tricalcium”);

(3) Scopus : (TITLE-ABS-KEY (‘pig’ OR ‘pigs’ OR ‘piglet’ OR ‘piglets’ OR ‘sow’ OR ‘sows’ OR ‘gilt’ OR ‘gilts’ OR ‘barrow’ OR ‘barrows’ OR ‘swine’ OR ‘swines’ OR ‘pork’ OR ‘boar’ OR ‘boars’ OR ‘hen’ OR ‘hens’ OR ‘broiler’ OR ‘broilers’ OR ‘chicken’ OR ‘chickens’) AND TITLE-ABS-KEY ('bioavailability' OR 'availability') AND TITLE-ABS-KEY ('bone' OR 'bones') AND TITLE-ABS-KEY ('p' OR 'ca' OR 'phosphorus' OR 'calcium' OR 'phosphate' OR 'limestone' OR 'dicalcium' OR 'tricalcium')) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2026

Foram localizados então 960 artigos publicados entre 2000 e janeiro/2025 que seguiram para a seleção, onde se utilizou o método PRISMA 2020. A seleção ocorreu de acordo com os critérios expostos na Figura 1.

Identificação de Estudos Via Base de Dados e Registros

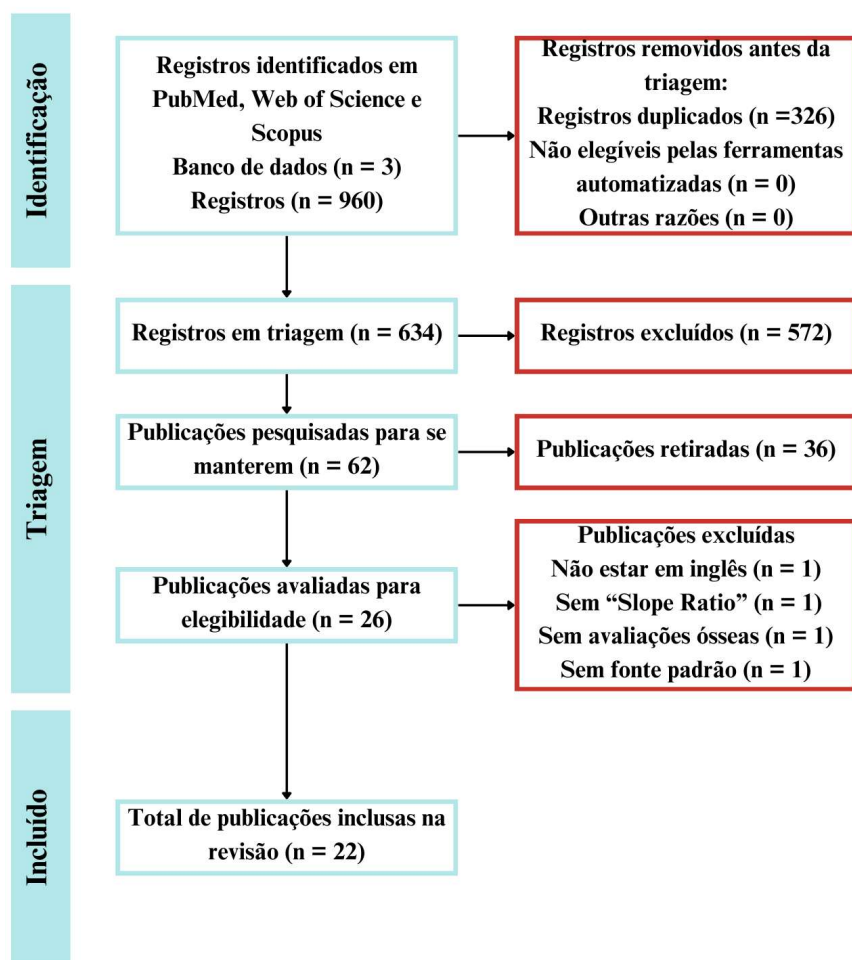


Figura 1. Fluxograma PRISMA 2020 para a seleção dos artigos localizados nas bases de dados.

Na etapa de identificação foram excluídos 326 artigos referentes a duplicatas. Na primeira etapa de triagem, foram excluídos 572 artigos pelos critérios: a) não tratassem sobre aves ou suínos; b) não incluíssem a avaliação de P ou Ca; c) que não fossem estudos experimentais. Já na segunda etapa de seleção, foram excluídos 36 artigos após uma análise mais detalhada, usando os critérios da primeira seleção, além de excluir ainda artigos que não tratassem da biodisponibilidade de P ou Ca e/ou não incluíssem análises ósseas.

Na terceira e última seleção, foram excluídos os artigos que: a) não estivessem em língua inglesa; b) não avaliassem a BDR de P ou Ca pela *slope ratio*; c) não realizassem avaliações ósseas; d) não tivessem uma fonte padrão de Ca ou P. Deste modo, restaram ao fim da seleção 22 artigos para a avaliação e discussão na presente revisão sistemática.

6 RESULTADOS

Com a base de dados resultante da pesquisa, foram selecionados 22 artigos, sendo 50% conduzidos na Inglaterra, seguido de 36% nos EUA, 9% no Brasil e 5% na Coréia do Sul, com um total de 78 fontes avaliadas para a obtenção da BDR de Ca ou P. Desse total, 10 fontes foram avaliadas para a obtenção da BDR de Ca para aves, 47 para BDR de P também para aves e 21 para a BDR de P para suínos (Figura 2). Não foram localizados ensaios para a BDR de Ca para suínos.

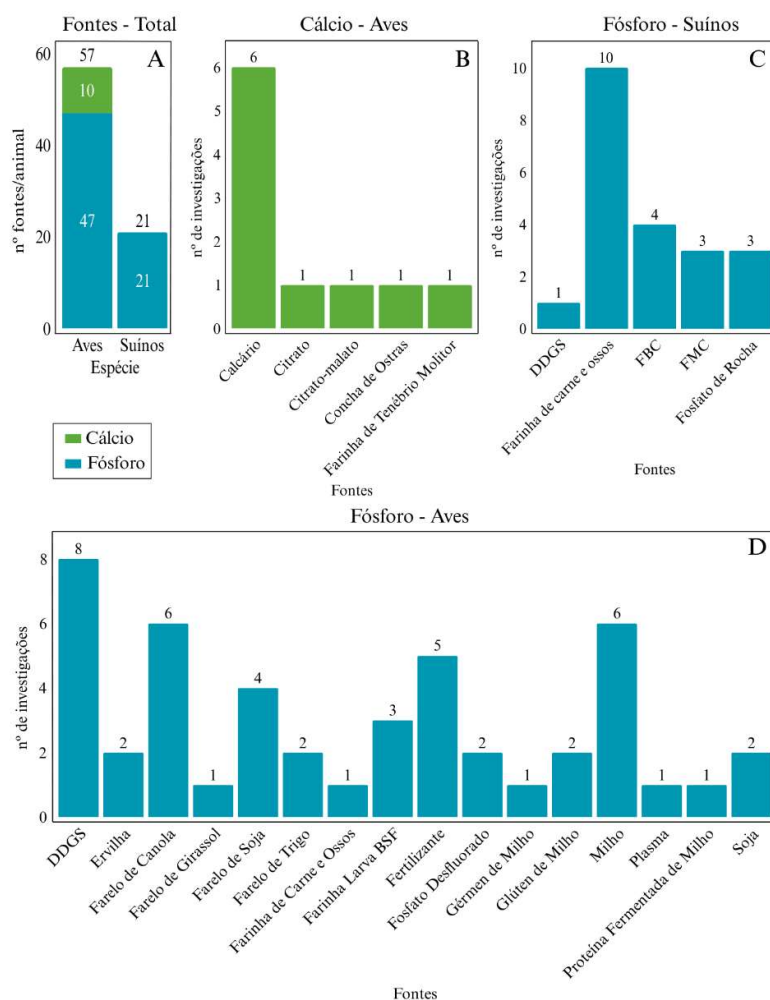


Figura 2. Distribuição dos ensaios e fontes utilizadas para a determinação da BDR de Ca e P para aves e suínos. A: distribuição geral das fontes utilizadas para aves e suínos considerando o número de fontes por animal; B: distribuição das fontes de Ca utilizadas para aves; C: distribuição das fontes de P utilizadas para suínos; D: distribuição das fontes de P utilizadas para aves.

As informações de autores, ano de publicação, espécie estudada, idade ou peso inicial dos animais, mineral avaliado, fonte padrão e fonte teste utilizadas, ossos avaliados e análises ósseas empregadas nos artigos localizados na busca estão sintetizadas na Tabela 1, para a BDR de Ca, e na Tabela 2, para a BDR de P. Os ensaios incluíram aves na fase inicial, com idade inicial mínima de 1 dia e máxima de 14 dias, e suínos na fase de crescimento, com peso médio inicial de 12,7kg à 34,93kg.

Tabela 1. Levantamento de ensaios de biodisponibilidade de Ca para aves e suínos entre os anos 2000 e 2025 nas plataformas PubMed, Scopus e Web of Science.

Autor	Espécie	Idade/Peso Inicial	Fonte Padrão	Fonte Teste	Ossos	Análise óssea	BDR, %
Klasing <i>et al.</i> (2000)	Aves	14 dias	CaCO3	Farinha de Tenebrio Molitor	Fêmur	Cinzas Ósseas, g	89
				Farinha de Tenebrio Molitor	Fêmur	Cinzas Ósseas, %	76,2
Augspurger & Baker (2004)	Aves	8 dias	CaCO3	Calcário	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	77
				Citrato	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	110
				Citrato-malato	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	98
				Concha de Ostras	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	95
Drysdale <i>et al.</i> (2024)	Aves	9 dias	CaCO3	Calcário	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	89,8 - 106,2
				Calcário	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	88,2 - 98,7

CaCO3: Carbonato de cálcio

Tabela 2. Levantamento de ensaios de biodisponibilidade de P para aves e suínos entre os anos 2000 e 2025 nas plataformas PubMed, Scopus e Web of Science (continua).

Autor	Espécie	Idade/Peso Inicial	Fonte Padrão	Fonte Teste	Ossos	Análise óssea	BDR, %
Douglas <i>et al.</i> (2000)	aves	8 dias	KH2PO4	Milho	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	21 - 95,8
Peter & Baker (2001)	aves	8 dias	KH2PO4	Glúten de Milho	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	46,4 - 89,8

Tabela 2. Continuação.

Rao & Reddy (2003)	aves	8 dias	FBC	Fertilizante	Tíbia	Cinzas Ósseas, g/kg	89,2 - 130,6
Lumpkins & Batal (2005)	aves	9 dias	KH2PO4	DDGS	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	54 - 68
Traylor <i>et al.</i> (2005a)	suínos	17,1 kg	FMS	Farinha de Carne e Ossos	Fêmur	Força de quebra, kg	83
					Metacarpo+ Metatarso	Força de quebra, kg	106
					Metacarpo	Cinzas Ósseas, g	95
Traylor <i>et al.</i> (2005b)	suínos	16,5 kg	FMS	Farinha de Carne e Ossos	Fêmur	Força de quebra, kg	84 - 102
					Metacarpo+ Metatarso	Força de quebra, kg	87 - 94
					Metacarpo	Cinzas Ósseas, g	86 - 91
					Fêmur	Força de quebra, kg	73 - 88
		12,7 kg	FMS	Farinha de Carne e Ossos	Metacarpo+ Metatarso	Força de quebra, kg	69 - 89
					Metacarpo	Cinzas Ósseas, g	75 - 92
					Fêmur	Força de quebra, kg	69 - 90
					15,6 kg	FMS	Farinha de Carne e Ossos
Metacarpo	Cinzas Ósseas, g	84 - 94					
Coon <i>et al.</i> (2007)	aves	10 dias	FBC	Fosfato Desfluorado	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	112 - 145
						Cinzas Ósseas, g	59 - 71
Kim <i>et al.</i> (2008)	aves	9 dias	KH2PO4	DDGS	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	58 - 66
				Gérmen de Milho	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	25
				Fosfato Desfluorado	Tíbia	Força de quebra, kg	80 - 91
Souza <i>et al.</i> (2009)	suínos	14,3 kg	FBCD	FBC	Metacarpo+ Metatarso	Força de quebra, kg	58,8 - 97,7

Tabela 2. Continuação.

Souza <i>et al.</i> (2009)	suínos	14,3 kg	FBCD	FBC	Fêmur	Força de quebra, kg	95,8 - 100
					Metacarpo+ Metatarso	Cinzas Ósseas, %	74,6 - 146,3
				Fosfato de rocha	Metacarpo+ Metatarso	Força de quebra, kg	9,9 - 52
					Fêmur	Força de quebra, kg	47,4 - 58,9
Petersen <i>et al.</i> , (2011)	suínos	16,8 kg	FMS	FBC	Metacarpo	Força de quebra, kg	57
				FMC	Metacarpo	Força de quebra, kg	80 - 109
Baker <i>et al.</i> (2013)	suínos	34,93 kg	FBC	DDGS	Metacarpo	Cinzas, g	86
						P total, g	88
Martins <i>et al.</i> (2013)	aves	8 dias	FBC	Soja	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	56,5 - 56,9
				Farelo de Trigo	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	74,4
Woyengo <i>et al.</i> (2016)	aves	1 dia	FMS	Ervilha	Tíbia	Cinzas Ósseas, %	5,6 - 23
						Cinzas Ósseas, g	9,23 - 18
						Densidade Mineral, g/cm ²	30,3 - 40,3
Hanna <i>et al.</i> (2018)	aves	8 dias	KH2PO4	Farelo de Canola	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	9,8 - 17,8
						Cinzas Ósseas, %	13 - 25,2
				Farelo de soja	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	33,7 - 34,7
						Cinzas Ósseas, %	41,6 - 45,1
Kim <i>et al.</i> (2019)	aves	14 dias	FMS	Farelo de Girassol	Tíbia	Conteúdo mineral, g/cm	44
					Fêmur	Conteúdo mineral, g/cm	41
Munoz <i>et al.</i> (2020)	aves	8 dias	KH2PO4	Farelo de Soja	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	36,4
				Plasma	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	125
				Farinha de Carne e Ossos	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	75,5

Tabela 2. Continuação.

Matin <i>et al.</i> (2021)	aves	8 dias	KH ₂ PO ₄	Farinha BSF	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	57,7 - 67,1
						Cinzas Ósseas, %	51,3 - 56,9
Parsons <i>et al.</i> (2023)	aves	7 dias	KH ₂ PO ₄	DDGS	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	61
						Cinzas Ósseas, %	50
Parsons & Rochell (2023)	aves	7 dias	KH ₂ PO ₄	Farelo de Soja	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	33
				Farelo de Canola	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	48
				DDGS	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	81
				Proteína Fermentada de Milho	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	78
				Farelo de Trigo	Tíbia	Cinzas Ósseas, g	30

KH₂PO₄: Fosfato de Potássio; FBC: Fosfato Bicalcico; FMS: Fosfato de Sódio; FMC: Fosfato Monocalcico; FBCB: Fosfato Bicalcico Di-hidratado; DDGS: Grãos secos de Destilaria com Solúveis; BSF: Mosca do Soldado Negro.

O total de avaliações ósseas utilizadas para as diferentes fontes nos estudos incluídos na revisão sistemática estão apresentadas na Tabela 3, sendo consideradas as avaliações realizadas em um nível de uma fonte teste. A fonte padrão mais utilizada foi o KH₂PO₄, empregada em 9 dos 22 artigos, seguida por FBC, FMS, fosfato bicalcico di-hidratado (FBCB) — utilizados nos ensaios de BDR de P —, e CaCO₃ — utilizado como fonte padrão dos ensaios de BDR de Ca (Figura 3A). O osso mais frequentemente utilizado foi a tíbia, sendo testada em 80 das 137 análises realizadas nos ensaios de BDR de P e Ca, para aves (Figura 3B). O metacarpo foi o osso mais utilizado nos ensaios de BDR de P para suínos, quando considerado também o seu uso junto ao metatarso.

Tabela 3. Avaliações ósseas utilizadas nos estudos de biodisponibilidade de P e Ca

Análises	Totais*
Cinzas, g/osso	56
Força de quebra, kg	38
Cinzas, %	33
Cinzas, g/kg	5
Conteúdo Mineral, g/cm	2
Densidade Mineral, g/cm ²	2
P total, g/osso	1

*Análises aplicadas por fonte utilizada nos estudos

As fontes teste avaliadas nos ensaios incluídos na revisão sistemática são apresentados na Tabela 4. Considerou-se cada tipo de análise óssea para cada fonte testada como uma observação para a análise dos dados. Desta forma, caso um mesmo artigo tenha testado, por exemplo, três diferentes fontes, considerou-se que houve a realização de três observações. Ainda, se uma mesma fonte foi testada para duas ou mais análises ósseas, considerou-se como duas ou mais observações diferentes.

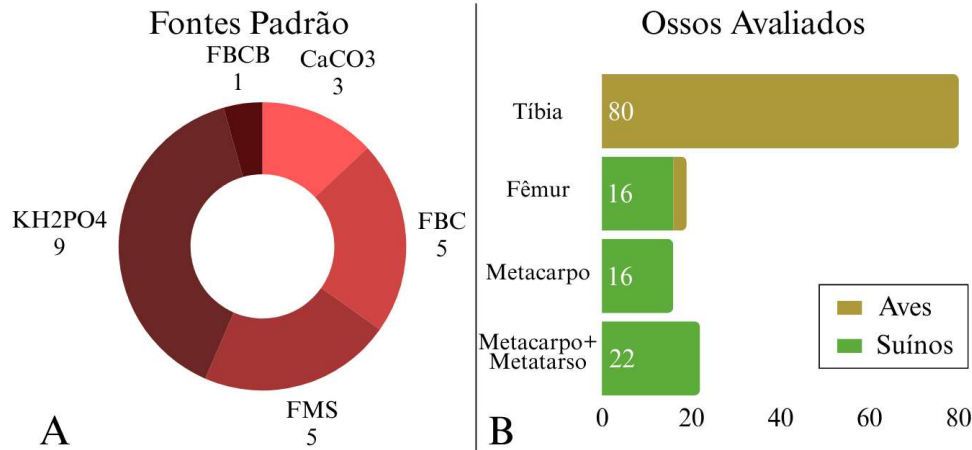


Figura 3. Fontes padrão e ossos utilizados nos ensaios de BDR de Ca e P. A: fonte padrão utilizada por estudo; B: ossos utilizados para análises ósseas.

Tabela 4. Espécies e fontes testadas para a avaliação de biodisponibilidade relativa de Ca e P nos estudos selecionados (continua).

Espécie	Mineral	Fonte	n Artigos	Observações ¹	Biodisponibilidade Relativa, %		
					Média	Mín	Máx
Aves	Ca	Calcário	2	6	93,36	77,00	106,20
Aves	Ca	Citrato	1	1	110,00	110,00	110,00
Aves	Ca	Citrato-malato	1	1	98,00	98,00	98,00
Aves	Ca	Concha de Ostras	1	1	95,00	95,00	95,00
Aves	Ca	Farinha de Tenebrio Molitor	1	2	82,60	76,20	89,00
Aves	P	DDGS	4	9	62,33	50,00	81,00
Aves	P	Ervilha	1	6	21,07	5,60	40,30
Aves	P	Farelo de Canola	2	11	19,40	9,80	48,00
Aves	P	Farelo de Girassol	1	2	42,50	41,00	44,00
Aves	P	Farelo de Soja	3	6	37,42	33,00	45,10
Aves	P	Farelo de Trigo	2	2	52,20	30,00	45,10
Aves	P	Farinha Larva BSF	1	6	57,08	51,30	67,10
Aves	P	Farinha de Carne e Ossos	1	1	75,50	75,50	75,50
Aves	P	Fertilizante	1	5	104,46	89,20	130,60
Aves	P	Fosfato Desfluorado	1	6	93,00	59,00	145,00
Aves	P	Gérmen de Milho	1	1	25,00	25,00	25,00
Aves	P	Glúten de Milho	1	2	68,10	46,40	89,80
Aves	P	Milho	1	6	52,93	21,00	95,80
Aves	P	Plasma	1	1	125,00	125,00	125,00
Aves	P	Proteína Fermentada de Milho	1	1	78,00	78,00	78,00
Aves	P	Soja	1	2	57,00	56,50	56,90
suínos	P	DDGS	1	2	87,00	86,00	88,00
suínos	P	Farinha de Carne e Ossos	2	30	87,47	69,00	106,00
suínos	P	Fosfato Bicálcico	2	10	93,10	57,00	146,30
suínos	P	Fosfato Monocálcico	1	3	90,67	80,00	109,00
suínos	P	Fosfato de Rocha	1	9	42,93	9,90	63,4

Ca: Cálcio; P: Fósforo.

Ervilha: Marrom e Amarela; DDGS: DDGS Convencional e DDGS Alta Proteína; Farelo de Canola: Comerciais e Convencionais; Farinha Larva BSF: Convencional e Desengordurada; Farinha de Carne e Ossos: Convencionais com diferentes granulometrias, diferentes processamentos e diferentes teores de cinzas; Fertilizante: Fosfato de Amônio, Polifosfato de Amônio, Superfosfato simples, NPK e NPK (NP); Milho: Convencional, baixo teor de fitato e alta proteína+baixo teor de fitato.

¹Observações = Fonte × Análise óssea

7 DISCUSSÃO

Frente ao avanço científico, as revisões sistemáticas apresentam-se como uma maneira de sintetizar os estudos existentes sobre determinado tema a fim de responder a uma pergunta específica, por meio de um plano detalhado e abrangente para as informações disponíveis. A revisão sistemática se difere das revisões narrativas comuns por impossibilitar o enviesamento das informações, uma vez que a revisão narrativa se baseia muitas vezes na disponibilidade de literatura e na seleção do autor. Por esse motivo, as revisões sistemáticas são consideradas como um resumo de alto nível, podendo identificar lacunas e propor novos estudos após um criterioso processo de identificação, avaliação e síntese de dados relevantes do tema em questão (Uman, 2011; Gupta et al., 2018; Uttley et al., 2023).

7.1 Ensaios de Biodisponibilidade

Apenas três estudos visaram analisar a BDR de Ca. Deve-se destacar que as exigências de Ca e P seguem uma relação balanceada e interdependente. O desbalanço desses nutrientes pode acarretar diversas alterações metabólicas para a manutenção da homeostase, como a hipofosfatemia que pode estar ligada à hipocalcemia (Goff, 2015). A restrição desses minerais na dieta pode acarretar o aumento da absorção no intestino, do processo de reabsorção renal e do metabolismo ósseo (Suttle, 2010; Goff, 2015).

Na maior parte dos estudos de BDR de P utilizaram-se aves como modelo (14 ensaios para aves e 5 para suínos). Esse maior número em aves pode estar associado a diversos fatores, como a facilidade de manejo, velocidade de produção e elevado *n* amostral. Entretanto, o número de informações ainda é baixo. De maneira geral há uma necessidade de mais avaliações de fontes de Ca e P, permitindo uma maior compreensão e confiabilidade dos reais valores e variação da BDR de Ca e P, para formulação e atendimento das exigências destes nutrientes tanto para aves como para suínos.

7.2 Fontes Padrão e Ossos

Fontes inorgânicas de P são comumente utilizadas na suplementação das dietas de aves e suínos, sendo também por vezes utilizadas como a fonte padrão nos estudos de BDR de P, como o fosfato bicálcico (FBC), monocalcico (FMC) e monossódico (FMS; Zhai *et al.*, 2022). No presente estudo também foi possível identificar a comum utilização do fosfato de potássio (KH₂PO₄), presente nos estudos de Munoz *et al.* (2020), Hanna *et al.* (2018), Parsons *et al.* (2023), entre outros. Estas fontes fosfóricas são consideradas como 100% biodisponível, quando aplicadas como fonte padrão, sendo relacionadas às fontes teste a fim de determinar a BDR das fontes investigadas.

Os diferentes fosfatos inorgânicos são obtidos por meio de diversos processamentos (Lee *et al.*, 2022), o que pode levar a diferenças na disponibilidade do mineral e, consequentemente, em sua utilização. Por exemplo, o FMC é mais digestível do que o fosfato mono-bicálcico que, por sua vez, é mais digestível do que o FBC (Lautrou *et al.*, 2021). A diferença pode estar ligada a interação com outros nutrientes, como o aumento da concentração de cálcio nas dietas de suínos que pode afetar a digestibilidade de P do FMS (Stein *et al.*, 2011).

No presente estudo, foi possível observar a ausência de padronização no uso de fontes de fósforo utilizadas, sendo elas: FBC, FBCB, FMS e KH_2PO_4 . É possível inferir, então, que diferentes fontes podem apresentar diferenças no conteúdo digerido, absorvido e utilizado pelos animais. Portanto, a utilização de diferentes fontes como padrão pode influenciar nos resultados de BDR de Ca e P, de modo a sub ou superestimar o resultado.

A tibia foi o osso mais frequentemente utilizado, sendo empregada em estudos para aves. Para suínos o osso mais utilizado foi o metacarpo, considerando também o uso junto ao metatarso. Mesmo com uso comum da tibia, metacarpo, metatarso e fêmur, as respostas ósseas frente à alteração do fornecimento de minerais na dieta podem ser diferentes para diferentes estruturas ósseas. Para leitões de reposição, ossos da região da coluna lombar pareceram ser mais sensíveis à depleção de P da dieta, seguidos de ossos da região do tronco e da cabeça, com recuperação mais acentuada para os ossos da região do tronco na fase de reposição do mineral (Floradin *et al.*, 2024). Também para suínos, Williams *et al.* (2023) avaliaram diferentes ossos e concluíram que a fíbula e a 2ª costela eram as estruturas com maior resposta aparente a suplementação de P e vitamina D, e que a 10ª costela era mais apropriada para a identificação histopatológica de lesões para suínos na fase de creche. Para aves, a quantidade de cinzas das patas (tarsometatarso e ossos dos dedos) pode ser utilizada no lugar de ossos como a tibia para a obtenção da mineralização óssea de frangos (Shastak *et al.*, 2012).

Estudos apontam que ossos com maior proporção de osso trabecular parecem responder mais rapidamente às alterações de fornecimento de Ca e P (Kim & Park, 2013; Gerlinger *et al.*, 2019; Floradin *et al.*, 2024). Uma vez que os ossos podem responder de maneira diferente, torna-se interessante a avaliação de ossos de diferentes regiões corporais a fim de identificar a estrutura que melhor se relacione aos dados de ingestão de P necessários para a obtenção da BDR.

7.3 Análises Ósseas e Biodisponibilidade

Nos estudos selecionados, foi possível localizar sete diferentes métodos de análises ósseas para a obtenção da BDR, sendo elas: Cinzas, g/osso; Força de quebra, kg; Cinzas, %; Cinzas, g/kg; Conteúdo Mineral, g/cm; Densidade Mineral, g/cm²; P total, g/osso.

É necessário ressaltar a variabilidade nos dados de BDR quando observados os valores médios, mínimos e máximos das fontes isoladas, o que pode ocorrer devido às diferentes metodologias de avaliação empregadas nos estudos, ou ainda pelas características específicas dos ingredientes utilizados, entre outros fatores. A farinha de carne e ossos, utilizada nos estudos de Traylor *et al.*, 2005a e Traylor *et al.*, 2005b, possuía diferentes características de origem e processamento, tendo ainda a BDR de P avaliada em função de diferentes análises ósseas, resultando em diferentes valores de biodisponibilidade do nutriente. A variação de metodologias também ocorre em diversas outras fontes, o que evidencia que as diferenças nos valores de BDR de P podem ser explicadas pela diferença na metodologia aplicada.

Woyengo *et al.* (2016) determinaram a BDR de P de duas diferentes ervilhas, marrom e amarela, para pintos de 1 dia pelos métodos de cinzas ósseas e densidade mineral utilizando o DEXA. Considerando que as fontes analisadas são de origem vegetal, os valores de BDR relativa ao FMS foram baixos, variando de 23% para ervilha amarela e 5,6% para ervilha marrom, pela análise de cinzas ósseas em % por osso, até 18% e 9,23% para cinzas em g/osso e 40,3 e 30,3% para densidade mineral em g/cm². Os autores concluem que os resultados de

BDR podem variar dependendo do critério de resposta utilizado para mensurar a biodisponibilidade.

Também utilizando o FMS como fonte padrão e a tibia como tecido alvo de análises Kim *et al.* (2019) avaliaram a BDR de P para farelo de girassol com alta proteína fornecidos para aves com idade inicial de 15 dias. No entanto, os autores adotaram a análise de conteúdo mineral em g/cm, aplicando-a também ao fêmur. Foram obtidos valores de 41% de BDR de P quando utilizado o fêmur e de 44% para a tibia. Além disso, os autores desatacam que quando análises de densidade mineral óssea e área de osso foram utilizadas como critério não foi possível atender a suposição de interceptos iguais, necessária para o cálculo da *slope ratio*, gerando resultados menos confiáveis.

Para aves a partir dos 8 dias de vida, Hanna *et al.* (2018) avaliaram a BDR de P para cinco farelos de canola comerciais e do farelo de soja, tendo o KH₂PO₄ como fonte padrão, onde não foi possível encontrar diferença entre as BDRs diferentes farelos de canola. No entanto, tendo a tibia como tecido alvo, os resultados das análises de cinzas% foram numericamente maiores que os resultados encontrados para a cinzas em mg, evidenciando a possibilidade de diferentes resultados a depender da análise óssea empregada.

Os testes em fontes como o DDGS e a farinha de carne e ossos evidenciam ainda as diferenças encontradas em função de características da fonte utilizada como ingrediente teste. Quando considerada uma mesma metodologia de análise, a BDR de P do DDGS para aves na fase cria assume valores que variam de 60 a 81% em relação ao KH₂PO₄, quando considerada a análise de cinzas em g por osso (Kim *et al.*, 2008; Parsons *et al.*, 2023; Parsons & Rochell, 2023). Com a utilização das cinzas em % como resposta óssea, a BDR de P do DDGS varia entre 50 e 54% (Lumpkins & Batal, 2005; Parsons *et al.*, 2023). O uso da farinha de carne e ossos demonstrou valores distintos de BDR de P para suínos em crescimento a depender da granulometria, do teor de cinzas e da pressão de processamento, bem como em função da análise óssea executada e do tecido ósseo utilizado, assumindo valores que variam de 69 a 102% (Traylor *et al.*, 2005b).

Parsons *et al.* (2023) relatam que os resultados de digestibilidade ileal de P estava em bom acordo à BDR de P obtida pela avaliação de concentração de cinzas ósseas, quando houve uma relação Ca:P de 1,3. Não foi possível, no entanto, encontrar análises que contrastassem os diferentes resultados de biodisponibilidade entre as análises ósseas empregadas e de digestibilidade. A realização de análises comparativas aos dados de desempenho e digestibilidade poderia ser um bom mecanismo para a melhor validação dos dados obtidos nos experimentos.

Em ensaio de BDR de P dos fosfatos bicálcico e monocalcico na dieta de suínos em crescimento, Petersen *et al.* (2011) observaram valores que variam de 80 a 109% para diferentes fontes de FMC, que possuíam diferentes concentrações do conteúdo de FMC, e de 57% para o FBC, quando utilizada a força de quebra do metacarpo e o FMS como fonte padrão. É necessário pontuar que, em estudo anterior utilizando as mesmas fontes, autores indicam que não houve diferença na digestibilidade entre os tratamentos, com apenas a digestibilidade de FMS distinguindo-se da maior parte das demais fontes testadas (Petersen & Stein, 2006). Isso implica no fato de que ingredientes com digestibilidade de P semelhante podem apresentar níveis de utilização distintos do mineral, destacando a importância dos ensaios de BDR.

Os resultados expostos demonstram que os valores de BDR de P das diversas fontes analisadas podem ser influenciados pela escolha da análise óssea, osso e fonte padrão a serem

utilizadas nos ensaios, bem como por características inerentes às fontes testes, às espécies e as fases de produção dos animais alvos de estudo. Destaca-se a diferença metodológica, uma vez que a padronização pode assegurar a reprodutibilidade e maior praticidade na comparação dos dados. No entanto, é preciso que nutricionistas e pesquisadores estejam atentos a ausência de padronização dos ensaios, fazendo um uso racional dos resultados no momento de considerá-los para a formulação de dietas.

7.4 Utilização dos Dados de Biodisponibilidade

A biodisponibilidade indica o grau em que um nutriente ingerido em uma determinada fonte será absorvido pelo intestino e utilizado no metabolismo animal para manutenção das atividades fisiológicas ou na estocagem (Ammerman *et al.*, 1995; Schönfeldt *et al.*, 2016). Portanto, a informação da BDR indica a eficiência de utilização de uma fonte. No entanto, este dado não é mensurável em termos absolutos, sendo necessário relacionar os resultados de uma fonte teste a uma fonte padrão (Zhai *et al.*, 2022), considerada como 100% biodisponível. Portanto, os dados de BDR devem ser utilizados no momento de escolha de uma fonte, a fim de selecionar uma fonte mais biodisponível, ou seja, com uma maior proporção de Ca ou P ingerido que seja utilizada pelo organismo. Esta informação se torna espacialmente útil para a fase de crescimento, onde o suprimento mineral deve atender as exigências para maximizar o crescimento e deposição óssea, mantendo a excreção reduzida (Lautrou *et al.*, 2021). Do mesmo modo, a BDR das fontes de Ca e P devem ser consideradas para as fases lactação e postura, onde a desmineralização óssea pode ocorrer para a mobilização do estoque de Ca e P para a manutenção dos níveis homeostáticos a depender do fornecimento dietético dos minerais (Heurtault *et al.*, 2024; Sinclair-Black *et al.*, 2023; Upadhaya e Kim, 2020).

Apesar de não serem mensuráveis em termos absolutos, alguns ensaios utilizam os dados de BDR para o cálculo do conteúdo biodisponível de Ca ou P (Parsons & Rochell, 2023; Hanna *et al.*, 2018; Woyengo *et al.*, 2016) como:

$$\begin{aligned} & \text{P Total} \times \text{BDR} / 100 \\ & \text{Ca Total} \times \text{BDR} / 100 \quad (1) \end{aligned}$$

Contudo, este cálculo desconsidera fatores como a falta de padronização dos ensaios e o nível de nutriente disponível e/ou digestível presente nas fontes teste. Segundo a Tabela Brasileira de Aves e Suínos (TBAS; Rostagno *et al.*, 2024) o conteúdo de P total e digestível varia para as diferentes fontes utilizadas como padrão nos ensaios. Por exemplo, o FMS possui 24% de P total e 23,6% de P digestível para suínos, enquanto o FBC apresenta 18,5% de P total e 13,9% de P digestível para suínos. Portanto, o uso de diferentes fontes teste, bem como de diferentes estruturas e análises ósseas, se torna uma limitação para a consideração dos resultados de BDR e conteúdo biodisponível, uma vez que a BDR de uma fonte teste pode ser diferente em função da fonte padrão utilizada como referência.

Deve-se notar ainda que este cálculo considera o conteúdo de P total ingerido (Equação 1). No entanto, uma vez que a BDR se propõe a avaliar ao nível de utilização de uma fonte teste após ingestão e absorção, os resultados de BDR não deveriam ser relacionados ao conteúdo de P total, mas sim ao de P disponível ou digestível. Sendo assim, torna-se interessante considerar a execução de ensaios de BDR juntamente aos ensaios de digestibilidade para a obtenção do

conteúdo digestível do mineral na fonte analisada e do cálculo do conteúdo biodisponível com base na digestibilidade.

Em um exemplo prático, pode ser preferível utilizar o FMC ao invés do FBC, quando considerados os resultados de Petersen et al. (2011), onde se utilizou o FMS como fonte padrão e o metacarpo para a análise de força de quebra. No entanto, a BDR de P do FBC pode ser encontrada em valores que variam entre 58,8 e 146,3%, com o FBCB como fonte padrão e com a análise de força de quebra do metacarpo+metatarso e fêmur e de porcentagem de cinzas no metacarpo+metatarso (Souza et al., 2009). Estes resultados indicam que, embora no ensaio de Petersen et al. (2011) o FMC seja mais biodisponível do que o FBC, a escolha pelo FMC pode não ser a ideal quando considerados os resultados de Souza et al. (2009). No entanto, os ensaios não são praticamente comparáveis, uma vez que utilizam de diferentes metodologias.

As diferenças nos dados de BDR existirão em função de características inerentes às fontes, fonte padrão adotada e análise e estrutura óssea utilizadas nos ensaios. Portanto, para o uso prático dos dados de biodisponibilidade, é importante que o nutricionista ou pesquisador esteja ciente da ausência de padronização metodológica dos ensaios de BDR. Além disso, deve-se considerar que o conteúdo biodisponível não reflete dados de disponibilidade e digestibilidade da fonte considerada. Ainda, que os cálculos de conteúdo de Ca ou P biodisponível não refletem a proporção do mineral presente na fonte que será utilizada pelo animal.

8 CONCLUSÃO

Frente aos dados levantados na presente revisão, é possível identificar diversas lacunas nos estudos de BDR de Ca e P. De modo geral, poucos artigos foram encontrados, com menor número para estudos de BDR de Ca para aves e nenhum para suínos, bem como um baixo número de ensaios de BDR de P para suínos. A análise dos ensaios disponíveis destacou a falta de padronização quanto ao osso utilizado para avaliação, ao tipo de avaliação óssea e à fonte padrão utilizada. É preciso que nutricionistas e pesquisadores estejam atentos à ausência de padronização dos ensaios, fazendo o uso racional das informações para formulação de dietas. No entanto, a padronização metodológica pode assegurar a reprodutibilidade e maior praticidade na comparação dos dados.

9 REFERÊNCIAS

AUGSPURGER, N. R.; BAKER, D. H. Phytase improves dietary calcium utilization in chicks, and oyster shell, carbonate, citrate, and citrate-malate forms of calcium are equally bioavailable. **Nutrition research**, v. 24, n. 4, p. 293-301, 2004. DOI: j.nutres.2003.11.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0271531703002446>. Acesso em: 3 fev. 2025;

BAKER, S. R.; KIM, B. G.; STEIN, H. H. Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium phosphate and distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. **Journal of animal science**, v. 91, n. 1, p. 203-210, 2013. DOI: 10.2527/jas.2010-3776. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/91/1/203/4702905>. Acesso em: 25 nov. 2024;

COON, C. N.; SEO, S.; MANANGI, M. K.. The determination of retainable phosphorus, relative biological availability, and relative biological value of phosphorus sources for broilers. **Poultry science**, v. 86, n. 5, p. 857-868, 2007. DOI: 10.1093/ps/86.5.857. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119398657>. Acesso em: 25 nov. 2024;

DRYSDALE, R. L.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS B. W.; PARSONS, C. M.. Determination of calcium digestibility and bioavailability in 5 limestone sources using commercial broiler and crossbred chickens. **Poultry science**, v. 103, n. 11, p. 104226, 2024. DOI: 10.1016/j.psj.2024.104226. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579124008058>. Acesso em: 3 fev. 2025;

DOUGLAS, M. W. *et al.* Nutritional evaluation of low phytate and high protein corns. **Poultry Science**, v. 79, n. 11, p. 1586-1591, 2000. DOI: 10.1093/ps/79.11.1586. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119410845?via%3Dihub> Acesso em: 25 nov. 2024;

FLORADIN, P.; POMAR, C.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; SCHLEGEL, P. Development of the mineralisation of individual bones and bone regions in replacement gilts according to dietary calcium and phosphorus. **Animal**, v. 18, n. 8, p. 101241, 2024. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101241. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731124001721>. Acesso em: 4 dez. 2024;

GERLINGER, C. *et al.* Physiological and transcriptional responses in weaned piglets fed diets with varying phosphorus and calcium levels. **Nutrients**, v. 11, n. 2, p. 436, 2019. DOI: 10.3390/nul1020436. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/2/436>. Acesso em: 4 dez. 2024;

GOFF, J. P. Section VIII: Minerals, Bones, and Joints. In: **Dukes' Physiology of Domestic Animals**. 13th ed., p. 567–616, 2015;

GUPTA, S. *et al.* Systematic Review of the Literature: Best Practices. **Academic Radiology**. 2018. DOI: 10.1016/j.acra.2018.04.025. Disponível em:

[https://www.academicradiology.org/article/S1076-6332\(18\)30309-X/abstract](https://www.academicradiology.org/article/S1076-6332(18)30309-X/abstract). Acesso em: 7 fev. 2025;

HANNA, C. D. *et al.* Phosphorus bioavailability in increased-protein, reduced-fiber canola meal, conventional canola meal, and soybean meal fed to crossbred chicks. **Poultry science**, 97(1), 188–195, 2018. DOI: 10.3382/ps/pex287. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119306066?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

HEURTAULT, J.; HISCOCKS, S.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; SCHLEGEL, P. Dynamics of bone mineralization in primiparous sows as a function of dietary phosphorus and calcium during lactation. *animal*, v. 18, n. 4, p. 101130, 2024. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101130. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38579665/>. Acesso em: 7 fev. 2025;

HUMER, E.; SCHWARZ, C.; SCHEDULE, K. Phytate in pig and poultry nutrition. **Journal of animal physiology and animal nutrition**, v. 99, n. 4, p. 605-625, 2015. DOI: 10.1111/jpn.12258. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jpn.12258>. Acesso em: 28 nov. 2024;

KIM, E. J.; AMEZCUA, C. M.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS, C. M. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy, and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. **Poultry science**, v. 87, n. 4, p. 700-705, 2008. DOI: 10.3382/ps.2007-00302. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119388443?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

KIM, J. W.; SANJAYAN, N.; LETERME, P.; NYACHOTI, C. M. Relative bioavailability of phosphorus in high-protein sunflower meal for broiler chickens and effects of dietary phytase supplementation on bone traits, growth performance, and apparent ileal digestibility of nutrients. **Poultry science**, 98(1), 298–305, 2019. DOI: 10.3382/ps/pey346. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119303128?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

KIM, C.; PARK, D. The effect of restriction of dietary calcium on trabecular and cortical bone mineral density in the rats. **Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry**, v. 17, n. 4, p. 123, 2013. DOI: 10.5717/jenb.2013.17.4.123. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4241910/>. Acesso em: 28 nov. 2024;

KLASING, K. C.; THACKER, P.; LOPEZ, M. A.; CALVERT, C.C. Increasing the calcium content of mealworms (*Tenebrio molitor*) to improve their nutritional value for bone mineralization of growing chicks. **Journal of Zoo and Wildlife Medicine**, v. 31, n. 4, p. 512-517, 2000. DOI: 10.1638/1042-7260(2000)031[0512:ITCCOM]2.0.CO;2. Disponível em: <http://www.bioone.org/doi/full/10.1638/1042-7260%282000%29031%5B0512%3AITCCOM%5D2.0.CO%3B2>. Acesso em: 3 fev. 2025;

LAUTROU, M. *et al.* Dietary phosphorus and calcium utilization in growing pigs: requirements and improvements. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 8, p. 734365, 2021. DOI: 10.3389/fvets.2021.734365. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8654138/>. Acesso em: 4 dez. 2024;

LI, X.; ZHANG, D.; BRYDEN, W. L. Calcium and phosphorus metabolism and nutrition of poultry: are current diets formulated in excess?. **Animal Production Science**, v. 57, n. 11, p. 2304-2310, 2017. DOI: 10.1071/AN17389. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319910358_Calcium_and_phosphorus_metabolism_and_nutrition_of_poultry_are_current_diets_formulated_in_excess. Acesso em: 7 fev. 2025;

LEE, S. A.; LOPEZ, D. A.; STEIN, H. H. Mineral composition and phosphorus digestibility in feed phosphates fed to pigs and poultry. **Animal bioscience**, v. 36, n. 2, p. 167, 2022. DOI: 10.5713/ab.22.0322. Disponível em: <https://www.animbiosci.org/journal/view.php?doi=10.5713/ab.22.0322>. Acesso em: 4 dez. 2024;

LITTELL, R. C. *et al.* Estimation of relative bioavailability of nutrients using SAS procedures. **Journal of Animal Science**, v. 75, n. 10, p. 2672-2683, 1997. DOI: 10.2527/1997.75102672x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/75/10/2672/4624904>. Acesso em: 20 nov. 2024;

LUMPKINS, B. S.; BATAL, A. B. The bioavailability of lysine and phosphorus in distillers dried grains with solubles. **Poultry science**, 84(4), 581–586, 2005. DOI: 10.1093/ps/84.4.581. Disponível em: [https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032-5791\(19\)44568-9](https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032-5791(19)44568-9). Acesso em: 25 nov. 2024;

MARTINS, B. A. B. *et al.* Bioavailability and poultry fecal excretion of phosphorus from soybean-based diets supplemented with phytase. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 42, p. 174-182, 2013. DOI: 10.1590/S1516-35982013000300005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/x4vznHNSWf7gVjDzSVcDmnb/?lang=en>. Acesso em: 3 fev. 2025;

MATIN, N.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS, C. M. Phosphorus digestibility and relative phosphorus bioavailability in two dried black soldier fly larvae meals and a defatted black soldier fly larvae meal in broiler chickens. **Poultry science**, v. 100, n. 8, p. 101221, 2021. DOI: 10.1016/j.psj.2021.101221. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579121002558>. Acesso em: 25 nov. 2024;

MCDONALD, P. *et al.* **Animal Nutrition**. 7th ed., Prentice Hall, Harlow, England, p. 112-115, 2010. Disponível em: <https://eliasnutri.files.wordpress.com/2020/07/animal-nutrition-7th-edition.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024;

MUNOZ, J. A.; UTTERBACK, P. L.; PARSONS, C. M. Phosphorus digestibility and bioavailability in soybean meal, spray-dried plasma protein, and meat and bone meal determined using different methods. **Poultry science**, 99(10), 4998–5006, 2020. DOI: 10.1016/j.psj.2020.06.044. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7598319/>. Acesso em: 25 nov. 2024;

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Bmj**, v. 372, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71. Disponível em: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71.short>. Acesso em: 7 fev. 2025;

PARSONS, B. W. *et al.* Determination of TMEn, standardized amino acid digestibility, phosphorus digestibility, and phosphorus bioavailability in conventional and reduced

phosphorus distillers dried grains with solubles. **Poultry science**, v. 102, n. 7, p. 102743, 2023. DOI: 10.1016/j.psj.2023.102743. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579123002626?via%3Dihub>. Acesso em: 25 nov. 2024;

PARSONS, B. W.; ROCHELL, S. J. Determination of phytic acid disappearance, ileal P digestibility at different dietary Ca levels, and relative P bioavailability in soybean meal, canola meal, distillers dried grains with solubles, corn fermented protein, and wheat middlings. **Poultry Science**, v. 103, n. 10, p. 104037, 2024. DOI: 10.1016/j.psj.2024.104037. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579124006163?via%3Dihub>. Acesso em: 3 fev. 2025;

PETER, C. M.; BAKER, D. H. Bioavailability of phosphorus in corn gluten feed derived from conventional and low-phytate maize. **Animal feed science and technology**, v. 95, n. 1-2, p. 63-71, 2002. DOI: S0377-8401(01)00307-8. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377840101003078?via%3Dihub>. Acesso em: 3 fev. 2025;

PETERSEN, G. I.; PEDERSEN, C.; LINDEMANN, M. D.; STEIN, H. H. Relative bioavailability of phosphorus in inorganic phosphorus sources fed to growing pigs. **Journal of Animal Science**, v. 89, n. 2, p. 460-466, 2011. DOI: 10.2527/jas.2009-2161. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/89/2/460/4764228>. Acesso em: 25 nov. 2024;

PETERSEN, G. I.; STEIN, H. H. Novel procedure for estimating endogenous losses and measurement of apparent and true digestibility of phosphorus by growing pigs. **Journal of Animal Science**, v. 84, n. 8, p. 2126-2132, 2006. DOI: doi.org/10.2527/jas.2005-479. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/84/8/2126/4777313>. Acesso em: 7 fev. 2025;

RAO, S. V.; REDDY, V. R. Relative bio-availability and utilisation of phosphatic fertilisers as sources of phosphorus in broilers and layers. **British Poultry Science**, v. 44, n. 1, p. 96-103, 2003. DOI: 10.1080/0007166031000085274. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0007166031000085274>. Acesso em: 25 nov. 2024;

ROSTAGNO, H. S. *et al.* **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. Universidade Federal de Viçosa, 2000;

SCHÖNFELDT, H. C.; PRETORIUS, B.; HALL, N. Bioavailability of nutrients. **Encyclopedia of food and health**, v. 1, p. 401-406, 2016. DOI: 10.1016/B978-0-12-384947-2.00068-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123849472000684>. Acesso em: 3 fev. 2025;

SHASTAK, Y. *et al.* Comparison and evaluation of bone measurements for the assessment of mineral phosphorus sources in broilers. **Poultry Science**, v. 91, n. 9, p. 2210-2220, 2012. DOI: 10.3382/ps.2012-02179. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119396798>. Acesso em: 4 dez. 2024. Acesso em: 3 fev. 2025;

SHE, Y.; LI, D.; ZHANG, S. Methodological aspects of determining phosphorus digestibility in swine: a review. **Animal Nutrition**, v. 3, n. 2, p. 97-102, 2017. DOI: 10.1016/j.aninu.2017.02.003. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5941108/>. Acesso em: 7 fev. 2025;

SINCLAIR-BLACK, M.; GARCIA, R. A.; ELLESTAD, L. E. Physiological regulation of calcium and phosphorus utilization in laying hens. **Frontiers in Physiology**, v. 14, p. 1112499, 2023. DOI: 10.3389/fphys.2023.1112499. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9942826/>. Acesso em: 7 fev. 2025;

SOUZA, L. W. O. *et al.* Phosphorus availability of rock phosphates as compared with feed-grade phosphates for swine. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 90-98, 2009. DOI: 10.1590/S1516-35982009000100012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/BnBHRvz6fQFGCYw9RSFB9sk/?lang=en>. Acesso em: 3 fev. 2025;

STEIN, H. H. *et al.* Concentration of dietary calcium supplied by calcium carbonate does not affect the apparent total tract digestibility of calcium, but decreases digestibility of phosphorus by growing pigs. **Journal of animal science**, v. 89, n. 7, p. 2139-2144, 2011. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/89/7/2139/4764296>. Acesso em: 7 fev. 2025;

SUTTLE, N. F. **Mineral nutrition of livestock**. 4th ed. Oxfordshire, UK: CAB International p. 25-41 e 123-156, 2010.

TRAYLOR, S. L.; CROMWELL, G. L.; LINDEMANN, M. D. Bioavailability of phosphorus in meat and bone meal for swine. **Journal of animal science**, 83(5), 1054-1061, 2005a. DOI: 10.2527/2005.8351054x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/83/5/1054/4790809>. Acesso em: 25 nov. 2024;

TRAYLOR, S. L.; CROMWELL, G. L.; LINDEMANN, M. D. Effects of particle size, ash content, and processing pressure on the bioavailability of phosphorus in meat and bone meal for swine. **Journal of animal science**, v. 83, n. 11, p. 2554-2563, 2005b. DOI: 10.2527/2005.83112554x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/83/11/2554/4803117>. Acesso em: 25 nov. 2024;

UMAN, L. S. **Systematic reviews and meta-analyses**. *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, v. 20, n. 1, p. 57, 2011. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3024725/>. Acesso em: 7 fev. 2025;

UTTLEY, L. *et al.* The problems with systematic reviews: a living systematic review. **Journal of Clinical Epidemiology**, v. 156, p. 30-41, 2023. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2023.01.011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895435623000112>. Acesso em: 7 fev. 2025;

UPADHAYA, S. D.; KIM, I. H. Importance of micronutrients in bone health of monogastric animals and techniques to improve the bioavailability of micronutrient supplements A review. **Asian-Australasian journal of animal sciences**, v. 33, n. 12, p. 1885, 2020. DOI: 10.5713/ajas.19.0945. Disponível em: https://www.animbiosci.org/m/journal/view.php?number=24493&utm_source=chatgpt.com#b62-ajas-19-0945. Acesso em: 7 fev. 2025;

WILLIAMS, H. R. *et al.* The effect of bone and analytical methods on the assessment of bone mineralization response to dietary phosphorus, phytase, and vitamin D in nursery pigs. **Journal of Animal Science**, v. 101, p. skad353, 2023. DOI: 10.1093/jas/skad353. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10635674/>. Acesso em: 7 fev. 2025;

WOYENGO, T. A.; EMIOLA, I. A.; KIM, I. H.; NYACHOTI, C. M. Bioavailability of phosphorus in two cultivars of pea for broiler chicks. **Asian-Australasian journal of animal sciences**, v. 29, n. 3, p. 396, 2016. DOI: 10.5713/ajas.15.0299. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4811792/>. Acesso em: 28 nov. 2024;

ZHAI, H.; ADEOLA, O.; LIU, J. Phosphorus nutrition of growing pigs. **Animal Nutrition**, v. 9, p. 127-137, 2022. DOI: 10.1016/j.aninu.2022.01.010. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9079227/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

**CAPÍTULO II: METODOLOGIAS DE AVALIAÇÕES ÓSSEAS PARA A
DETERMINAÇÃO DA BIODISPONIBILIDADE RELATIVA DE FÓSFORO PARA
SUÍNOS EM CRESCIMENTO**

RESUMO

MOURA, Leila Cristina Salles. **Metodologias de Avaliações Ósseas para a Determinação da Biodisponibilidade Relativa de Fósforo para Suínos em Crescimento**. 2025. 68p Dissertação (Mestrado em Ciência Animal). Instituto de Zootecnia, Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

A maior parte do fósforo (P) presente no organismo está contida nos ossos, e por isso esse tecido é comumente utilizado nos estudos de biodisponibilidade relativa (BDR) desse mineral. No entanto, os ossos não respondem de forma igual às restrições e suplementações fosfóricas. Além disso, diferentes metodologias de análises ósseas podem ser aplicadas aos ensaios de biodisponibilidade, resultando na variabilidade dos resultados de BDR de P. Objetivou-se por meio do presente estudo avaliar diferentes metodologias de avaliações ósseas para ossos do metacarpo e da costela de suínos em crescimento frente à suplementação de fosfatos inorgânicos, a fim de determinar a avaliação e estrutura ósseas mais adequadas para os ensaios de BDR de P. Foram utilizadas três fontes de fosfato — fosfato bicálcico (FBC), fosfato tricálcico (FTC) e fosfato monossódico (FMS) — adicionadas a uma dieta basal à base de milho e farelo de soja em dois níveis de inclusão (0,14% e 0,28% de P total). Portanto, foram utilizados 7 tratamentos (dieta basal (DB); FBC 0,14%; FBC 0,28%; FTC 0,14%; FTC 0,28%; FMS 0,14%; FMS 0,28%), com 5 repetições cada, somando 35 unidades experimentais. As dietas foram fornecidas por 30 dias e, ao final do experimento, todos os animais foram eutanasiados para a coleta da 12ª costela e dos 3º e 4º metacarpos. Foram realizadas as análises de peso ósseo total (POT) em gramas, cinzas ósseas (CO) em g por osso e porcentagem, concentração de fósforo nas cinzas ósseas (PC) e por osso (PO), espessura da cortical (EC) em milímetros, e densidade mineral óssea (DMO) em água (cm³), em milímetros de alumínio (mmAl) e em área (cm²). Na análise de correlação, a avaliação óssea de CO mostra-se como um bom indicativo dos dados de ingestão de P (0,4221 para a costela e 0,5985 para o metacarpo). Do mesmo modo, análises de imagem (DMO em cm² e mmAl) mostram-se como alternativa para a determinação do uso do mineral, mitigando erros de processamento que podem ser acumulados nas análises laboratoriais. Em função da maior sensibilidade ao fornecimento de P, a costela mostrou-se mais adequada do que o metacarpo para a obtenção da BDR de P. Propõe-se considerar a utilização de ossos com maior proporção de osso trabecular, como a costela, para a determinação da BDR de P, uma vez que parecem ser mais sensíveis à variação de P da dieta.

Palavras-chave: Disponibilidade, Fosfato, Mineralização Óssea.

ABSTRACT

MOURA, Leila Cristina Salles. **Bone Assessment Methodologies for Determining Relative Phosphorus Bioavailability for Growing Pigs**. 2025. 68p Dissertation (Master Science in Animal Science) Institute of Animal Science, Animal Science Graduate Program, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Most of the phosphorus (P) present in the body is contained in bones, which is why this tissue is commonly used in relative bioavailability (RBV) studies of this mineral. However, bones do not respond equally to phosphorus restrictions and supplements. Furthermore, different bone analysis methodologies can be applied to bioavailability essays, resulting in variability in RBA results. This study aimed to evaluate different bone assessment methodologies for metacarpal and rib bones of growing pigs when supplemented with inorganic phosphates, to determine the most appropriate assessment and bone structure for RBV assays. Three phosphate sources—dicalcium phosphate (DCP), tricalcium phosphate (TCP), and monosodium phosphate (MSP)—were added to a basal diet based on corn and soybean meal at two inclusion levels (0.14% and 0.28% of total P). Therefore, seven treatments were used (basal diet (BD), DCP 0.14%, DCP 0.28%, TCP 0.14%, TCP 0.28%, MSP 0.14%, MSP 0.28%), with five replicates each, totaling 35 experimental units. The diets were supplied for 30 days, and at the end of the experiment, all animals were euthanized for the collection of the 12th rib and the 3rd and 4th metacarpals. Analyses were performed on total bone weight (TBW) in grams, bone ash (BA) in grams per bone and percentage, phosphorus concentration in bone ash (PA) and per bone (PB), cortical thickness (CT) in millimeters, and bone mineral density (BMD) in water (cm^3), in millimeters of aluminum (mmAl), and in area (cm^2). In the correlation analysis, the bone BW assessment proved to be a good indicator of P intake data (0.4221 for the rib and 0.5985 for the metacarpal). Similarly, image analyses (BMD, cm^2 and mmAl) proved to be an alternative for determining mineral use, mitigating processing errors that can accumulate in laboratory analyses. Due to the greater sensitivity to P supply, the rib was shown to be more suitable than the metacarpus for obtaining the RBV of P. It is proposed to consider the use of bones with a greater proportion of trabecular bone, such as the rib, for determining the RBV of P, since they appear to be more sensitive to dietary P variation.

Keywords: Availability, Phosphate, Bone Mineralization.

10 INTRODUÇÃO

Os estudos de biodisponibilidade visam conhecer o real aproveitamento de um nutriente frente ao nível de ingestão. A biodisponibilidade de fósforo (P) é comumente avaliada por parâmetros ósseos, uma vez que o esqueleto contém cerca de 80% de todo o fósforo no organismo. Sua concentração no osso só é inferior ao cálcio (Ca; Zhai *et al.*, 2022). Para o cálculo de biodisponibilidade de P é preciso relacionar as respostas geradas por uma fonte teste com uma fonte padrão (Littell *et al.*, 1995; Zhai *et al.*, 2022), a qual será então considerada como 100% biodisponível. Assim, a biodisponibilidade é encontrada a termos de biodisponibilidade relativa (BDR).

No entanto, não há uma padronização das metodologias utilizadas nos ensaios, com a utilização de diferentes estruturas ósseas, aplicação de diferentes avaliações ósseas e fontes padrão. Ao avaliarem a BDR de P para suínos em crescimento, Souza *et al.* (2009) utilizaram avaliações ósseas de força de quebra e porcentagem de cinzas para metacarpos, metatarsos e fêmur, tendo o fosfato bicálcico (FBC) como fonte padrão. Contudo, Petersen *et al.* (2011) utilizaram apenas o metacarpo para a realização de análises de força de quebra, mas com o fosfato monossódico (FMS) como fonte padrão. Baker *et al.* (2013) utilizaram como fonte padrão o FBC e o metacarpo como osso alvo de estudo, mas, por sua vez, aplicaram análises de concentração de cinzas e de P por osso. Estas diferenças podem então sub ou superestimar os dados de BDR de P e tornam a reprodutibilidade dos ensaios limitada.

Estudos de diferentes metodologias para avaliações ósseas, assim como propriamente dos ossos, têm sido comumente realizados (Onyango *et al.*, 2003; Shastak *et al.*, 2012; Sørensen *et al.*, 2019; Wensley *et al.*, 2020; Willians *et al.*, 2023; Floradin *et al.*, 2024), uma vez que os ossos do esqueleto não respondem de forma igual às deficiências e suplementações de P. Para leitões de reposição ossos da coluna lombar foram mais sensíveis à depleção de fósforo, seguidos de ossos da região do tronco (vértebras cervicais, torácicas e lombares e as costelas) e ossos da cabeça. Na fase de reposição mineral, a recuperação foi particularmente mais acentuada nos ossos da região do tronco (Floradin *et al.* 2024). Essa resposta pode estar relacionada ao fato de que o osso trabecular apresenta maior influência dos níveis de ingestão do mineral do que o osso cortical (Kim e Park, 2013; Gerlinger *et al.*, 2019; Floradin *et al.*, 2024). Para a determinação da BDR de P, é necessária a realização do cálculo da “*slope-ratio*” (Littell *et al.*, 1997), que se trata da razão da inclinação da curva de regressão múltipla gerada entre a ingestão e a resposta óssea para a suplementação com a fonte teste e padrão. Para tanto é preciso que os nutrientes estejam em concentrações crescentes e menores do que as exigências dos animais. Portanto, torna-se indispensável a aplicação de estruturas ósseas que possuem maior sensibilidade às restrições de P nos estudos de BDR.

Objetivou-se por meio do presente estudo avaliar diferentes metodologias de avaliações ósseas para ossos do metacarpo e da costela de suínos em crescimento frente à suplementação de fosfatos inorgânicos, a fim de determinar a avaliação e estrutura óssea mais adequada para os ensaios de BDR de P.

11 MATERIAL E MÉTODOS

11.1 Animais, Ambiente e Ração

O experimento ocorreu no Setor de Suinocultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (-22.77884°, 43.66534°) com animais provenientes do plantel local. O projeto foi aprovado pelo Comitê de Ética em Estudos com Animais do Instituto de Zootecnia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (protocolo 0114-01-2021) e da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (protocolo 1.372/2025).

Para o ensaio, 35 suínos de linhagem comercial (Landrace × Large White) e peso inicial de aproximadamente 19,93 ($\pm 1,38$) kg foram distribuídos em blocos ao acaso em função de peso e sexo. Cada animal foi alocado em baia individual de concreto, com acesso a bebedouro tipo nipple e comedouro individual, tendo ração e água fornecidas *ad libitum*. As dietas foram formuladas para atender as exigências nutricionais dos animais, exceto fósforo, segundo a Tabela Brasileira de Aves e Suínos (Rostagno *et al.*, 2017). As fontes fosfato bicálcico (FBC), fosfato tricálcico (FTC) e o fosfato monossódico (FMS) foram adicionadas em dois níveis de inclusão para conter 0,14% e 0,28% de P total (Tabela 1), a uma dieta basal a base de milho e farelo de soja, totalizando sete tratamentos, cada um com cinco repetições, sendo eles: dieta basal (DB; 0% de P); DB + fosfato monossódico (FMS 0,14% e FM 0,28%); DB + fosfato bicálcico (FBC 0,14% e FBC 0,28%); DB + fosfato tricálcico (FTC 0,14% e FTC 0,28%). O período de adaptação ocorreu do dia 1 ao 5, seguido pelo período de coleta de fezes para o ensaio de digestibilidade do dia 6 ao 10. Os dados de desempenho (consumo e ganho de peso) foram coletados do dia 1 ao 20. A dieta foi fornecida por mais 10 dias, somando 30 dias de período experimental. Em seguida, os animais foram eutanasiados para a coleta da 12ª costela e do 3º e 4º metacarpo da meia carcaça direita.

Tabela 1. Ingredientes na composição das dietas formuladas e composição nutricional calculada

	DB	FMS 0,14%	FMS 0,28%	FBC 0,14%	FBC 0,28%	FTC 0,14%	FTC 0,28%
Ingredientes, %							
Milho grão	65,34	65,34	65,34	65,34	65,34	65,34	65,34
Farelo de soja 45%	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
Óleo de soja	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Calcário calcítico	0,13	0,69	1,26	0,28	0,44	0,06	0,00
FMS	-	0,50	1,00	-	-	-	-
FBC	-	-	-	0,65	1,30	-	-
FTC	-	-	-	-	-	0,83	1,65
Amido	3,39	2,57	1,72	2,59	1,78	2,63	1,87
NaCl	0,48	0,24	0,02	0,48	0,48	0,48	0,48
L-Lisina HCL	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
DL-Metionina	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
L-Treonina	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
L-Triptofano	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
L-Isoleucina	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
L-Valina	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Cloreto de Colina	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Mistura Mineral	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Mistura Mineral 0,4px	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
TiO2	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Nutrientes							
EM kcal/kg	3353	3324	3293	3324	3295	3326	3299
PB %	18,46	18,46	18,46	18,46	18,46	18,46	18,46
Ca %	0,15	0,36	0,57	0,36	0,57	0,41	0,68
Ptotal %	0,29	0,41	0,53	0,42	0,54	0,42	0,54
Pdisp %	0,09	0,21	0,33	0,21	0,34	0,21	0,34
K %	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Na %	0,20	0,20	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20
Cl %	0,47	0,33	0,20	0,47	0,47	0,47	0,47
Lis %	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
Met %	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Met+Cis %	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Treo %	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Trip %	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Arg %	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Val %	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Isoleu %	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Leu %	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33

DB = Dieta Basal; FMS = Fosfato Monossódico; FBC = Fosfato Bicalcico; FTC = Fosfato Tricalcico

11.2 Preparo de Amostras e Análises Ósseas

A pata esquerda foi retirada integralmente, enquanto para a costela retirou-se o fragmento completo da 12ª sequência cranial-caudal. As amostras foram congeladas até que seguissem para a primeira análise. Para a análise de densidade mineral óssea (DMO) em cm^2 (DMO, cm^2), realizada no Laboratório de Estudos em Suinocultura da Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, utilizou-se o equipamento de absorciometria por duplo feixe de raio-X (DEXA; GE Healthcare Lunar Prodigy). Após a análise, as amostras foram submersas em uma solução de água e peróxido de hidrogênio, a fim de retirar tecidos moles e sujidades, facilitando seu manuseio, e então armazenados à -20°C . Para as análises subsequentes, realizadas no Laboratório de Nutrição Animal do Instituto de Zootecnia da UFRJ, os ossos foram secos em estufa ventilada a 55°C para padronização, e pesados em balança analítica para a obtenção do peso ósseo total (POT) em gramas. Imagens radiográficas foram obtidas por meio de Raio-X digital portátil e avaliadas em protocolo semelhante ao adotado por Souza *et al.* (2017) para a determinação da DMO em mmAl. Neste método, os ossos foram radiografados junto a uma régua de densidade (penetrômetro) de alumínio de 20 degraus com altura de 0,25 mm cada. As radiografias foram salvas como arquivo JPEG e avaliadas no software ImageJ. Para a avaliação da DMO em mmAl, a região central de cada osso e de cada degrau do penetrômetro foram selecionadas para a contagem de pixels. Então, os tons de cinza dos ossos foram convertidos em valores relativos à espessura de cada degrau do penetrômetro (mmAL).

Para a DMO em cm^3 seguiu-se princípio de Arquimedes com base na razão entre massa e o volume da amostra óssea. Para as costelas, utilizou-se provetas de 25ml e para os metacarpos provetas de 50ml, devido ao tamanho do material. As provetas foram preenchidas até a metade com água destilada e a medição a altura da coluna d'água com um paquímetro digital (capacidade de 0 a 150 mm e precisão de 0,03mm) foi realizada. Os ossos foram então submersos na água e realizou-se nova medição da altura da coluna d'água. O cálculo da densidade se deu pelo deslocamento de água, deste modo: $\text{Volume} = \pi \cdot r^2 \cdot h$, onde $\pi = 3,14$, r = raio interno do béquer (mm) e h = altura da coluna d'água deslocada (mm). Na determinação da espessura da cortical (EC) em milímetros, os ossos foram serrados ao meio e medição da espessura da cortical dos ossos foi realizada com um paquímetro digital. O conteúdo de cinzas ósseas (CO) em g foi determinado gravimetricamente, por meio do procedimento padrão da AOAC (método 942.05; AOAC, 2005), onde as amostras foram queimadas em cadinhos de porcelana em forno mufla por 4 horas após atingir a temperatura de 580°C . As CO foram calculadas como porcentagem do POT, resultando na porcentagem de cinzas ósseas por osso (CO, %). A obtenção da concentração de P seguiu-se pelo método de Detmann *et al.* (2012), onde amostras de aproximadamente 250 mg de cinzas foram utilizadas para o preparo da solução mineral, que foi então utilizada para o preparo da solução de leitura. A determinação de fósforo se deu por método colorimétrico com leitura em espectrofotômetro regulado a 725 nm. A concentração de P em cinzas (PC) foi calculada pela relação entre concentração de P na alíquota utilizada para o preparo da solução de leitura e o peso da amostra. A concentração de P no osso (PO), por sua vez, foi obtida pela relação entre a PC e a CO em porcentagem.

11.3 Análises Estatísticas

Dados de desempenho foram submetidos à ANOVA, seguida por teste de Tukey ($P < 0,05$), pelo PROC MIXED. As análises estatísticas para as avaliações ósseas foram

submetidas à ANOVA fatorial considerando os tratamentos, ossos e suas interações pelo PROC MIXED. Os dados de P total ingerido, P digestível ingerido, desempenho e análises ósseas seguiram para a correlação de Pearson pelo PROC CORR. O cálculo da *slope ratio* para a obtenção da BDR e o cálculo dos intervalos de confiança foram executados conforme descrito por Littel *et al.* (1997) pelo PROC GLM. Todas as análises foram realizadas no software SAS (SAS 9.4, Institute Cary, NC) ao nível de 0,05 de significância, e significância marginal foi considerada quando $p\text{-valor} > 0,05$ e $< 0,10$.

12 RESULTADOS

Os dados de desempenho estão apresentados na Tabela 2. Não houve diferença entre tratamentos para ganho de peso diário (GPD) e eficiência alimentar (EA). Tratamentos com maiores níveis de inclusão de P (0,28%) resultaram em maior P total e digestível independentemente da fonte padrão utilizada (p -valor $<0,05$).

Tabela 2. Influência dos tratamentos no desempenho de suínos em crescimento

Tratamento	P Total Ingerido, g/dia	P Digestível Ingerido, g/dia	GDP, kg	EA	Digestibilidade de P, %
DB	4,65 c	2,09 c	15,36	0,49	
FMS 0,14%	6,25 bc	3,39 b	14,66	0,48	77,13
FMS 0,28%	7,55 ab	4,49 a	12,48	0,44	
FBC 0,14%	6,35 b	3,26 b	15,32	0,52	66,68
FBC 0,28%	8,02 a	4,40 a	16,08	0,54	
FTC 0,14%	6,26 bc	3,10 b	15,76	0,53	60,36
FTC 0,28%	7,52 ab	3,91 ab	15,52	0,50	
EPM	0,3705	0,2028	1,0200	0,0368	
p -valor	$< ,0001$	$< ,0001$	0,1602	0,1182	

DB: Dieta Basal; FMS: Fosfato Monossódico; FBC: Fosfato Bicálcico; FTC: Fosfato Tricálcico.

GDP: Ganho de Peso Total, correspondente ao período de coleta de dados de desempenho, dia 0 a 20.

EA: Eficiência Alimentar, correspondente ao período de coleta de dados de desempenho, dia 0 a 20.

a, b, c Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna são diferentes pelo teste de Tukey ($P<0,05$)

As correlações entre P digestível e total ingerido, dados de desempenho e análises ósseas são ilustrados no Gráfico 1 para a 12ª costela e Gráfico 2 para o 3º e 4º metacarpo. Os dados de P total ingerido (PTotI) e P digestível ingerido (PDigI) correlacionaram-se positivamente entre si (0,9719; p -valor $< ,0001$), mas não apresentaram correlação com os dados de desempenho. A EA e o GPD apresentaram correlação significativa (0,7636; p -valor $< ,0001$) entre si, como esperado.

Para a 12ª costela, observa-se que as análises de POT e de CO em gramas apresentaram correlação de 0,9120, bem como correlação (p -valor $<0,05$) de ambas as análises aos dados de PTotI (POT = 0,5143; CO, $g = 0,4889$), PDigI (POT = 0,4620; CO, $g = 0,4221$), GPD (POT = 0,4305; CO, $g = 0,3648$) e EA (POT = 0,5185; CO, $g = 0,3570$). A PC apresentou correlação negativa (p -valor $< 0,05$) com POT (-0,4006) e CO em gramas (-0,4547), enquanto para CO em porcentagem houve correlação positiva ao CO em gramas (0,3735; p -valor $< 0,05$). Análises de DMO em mmAl e EC apresentaram correlação entre si (0,4005; p -valor $< 0,05$), assim como correlação de ambas as análises aos dados de PTotI (DMO, mmAl = 0,4816; EC = 0,4510),

PDigl (DMO, mmAl = 0,4187; EC = 0,4440), POT (DMO, mmAl = 0,6935; EC = 0,5100) e CO em gramas (DMO, mmAl = 0,6464; EC = 0,4887).

PDigl	0.9719										
	< 0.001										
GPD	0.1292	0.0057									
	0.4593	0.9742									
EA	-0.0633	-0.1059	0.7636								
	0.7178	0.5450	< 0.001								
POT	0.5143	0.4620	0.4305	0.5185							
	0.0016	0.0052	0.0098	0.0014							
CO, g	0.4889	0.4221	0.3648	0.3570	0.9120						
	0.0029	0.0116	0.0312	0.0353	< 0.001						
CO, %	-0.0609	-0.1188	-0.0452	-0.2538	-0.0321	0.3735					
	0.7280	0.4967	0.7963	0.1412	0.8546	0.0271					
PC	-0.1743	-0.1436	-0.1240	-0.0035	-0.4006	-0.4547	-0.1990				
	0.3166	0.4104	0.4778	0.9843	0.0171	0.0061	0.2519				
PO	-0.1692	-0.2085	-0.1070	-0.2331	-0.2577	0.0900	0.8225	0.3916			
	0.3313	0.2294	0.5408	0.1779	0.1350	0.6073	< 0.001	0.0200			
DMO, cm³	-0.0565	-0.1198	0.3448	0.1966	0.1179	0.2148	0.2754	0.0832	0.3106		
	0.7474	0.4932	0.0425	0.2578	0.4999	0.2153	0.1093	0.6346	0.0693		
DMO, mmAl	0.4816	0.4187	0.1900	0.3167	0.6935	0.6464	0.0062	-0.3006	-0.1567	-0.0203	
	0.0034	0.0123	0.2744	0.0638	< 0.001	< 0.001	0.9716	0.0793	0.3688	0.9081	
EC	0.4510	0.4440	-0.0957	0.0011	0.5100	0.4887	-0.0110	-0.2809	-0.1769	0.1140	0.4005
	0.0065	0.0075	0.5847	0.9948	0.0017	0.0029	0.9499	0.1022	0.3094	0.5142	0.0171
	PTotI	PDigl	GPD	EA	POT	CO, g	CO, %	PC	PO	DMO, cm³	DMO, mmAl

Figura 1. Análise de correlação para os dados de ingestão de P, desempenho e análises ósseas para a 12ª costela. PTotI: Fósforo total ingerido; PDigl: Fósforo digestível ingerido; GDP: Ganho de peso diário; EA: Eficiência alimentar; POT, g: Peso ósseo total em gramas; CO, g: Cinzas ósseas em g; CO, %: Porcentagem de cinzas ósseas por osso; PC: concentração de fósforo nas cinzas; PO: concentração de fósforo no osso; DMO: Densidade mineral óssea; EC: Espessura da cortical.

Para o 3º e 4º metacarpo, POTg, Cg e PC% correlacionaram-se com os dados de PtotI (POT = 0,5824; CO, g = 0,6706; PC = 0,3961; p -valor < 0,05), enquanto POT e CO em gramas correlacionaram-se ao dados de Pdigt (POT = 0,5386; CO, g = 0,3985; PC = 0,3961) e PC apresentou correlação em significância marginal para Pdigt (0,3135; p -valor = 0,0667). A avaliação de POT não demonstrou correlação com os dados de desempenho, ao contrário de CO em gramas e PC. Além disso, CO em gramas e POT apresentaram correlação de 0,7888 (p -valor < 0,0001), e a PC apresentou correlação com CO em gramas (0,5067; p -valor = 0,0019) e porcentagem de CO (0,4536; p -valor = 0,0062). A análise de DMO em mmAl demonstrou correlação com significância marginal aos dados PtotI (0,3068; p -valor = 0,0730) e PDigl (0,3135; p -valor = 0,0666), enquanto DMO em cm³ apresentou correlação apenas para a PtotI (0,3297; p -valor = 0,0531). A DMO em cm² apresentou correlação positiva para os dados de ingestão e para a maioria das análises ósseas testadas, exceto DMO em mmAl e EC, com correlação mais alta para a análise de CO em gramas (0,8764; p -valor < 0,0001).

PDigI	0.9714 < 0.001												
GPD	0.1292 0.4593	0.0057 0.9742											
EA	-0.0633 0.7178	-0.1059 0.5450	0.7636 < 0.001										
POT	0.5824 0.0002	0.5386 0.0008	0.2750 0.1099	0.1756 0.3130									
CO, g	0.6706 < 0.001	0.5985 0.0001	0.3858 0.0221	0.3290 0.0536	0.7888 < 0.001								
CO, %	0.2705 0.1160	0.2261 0.1916	0.1880 0.2795	0.2433 0.1591	-0.1848 0.2880	0.4485 0.0069							
PC	0.4047 0.0159	0.3135 0.0667	0.3961 0.0185	0.3586 0.0344	0.2470 0.1525	0.5067 0.0019	0.4536 0.0062						
PO	0.1615 0.3539	0.1030 0.5561	0.2428 0.1598	0.2256 0.1926	0.2017 0.2453	0.3716 0.0280	0.2580 0.1345	0.3876 0.0214					
DMO, cm ³	0.3297 0.0531	0.2776 0.1064	0.2618 0.1287	0.2319 0.1801	0.3212 0.0599	0.3347 0.0524	0.0325 0.8531	0.3501 0.0392	0.1369 0.4331				
DMO, mmAl	0.3068 0.0730	0.3135 0.0666	-0.1301 0.4564	-0.0785 0.6540	0.3705 0.0285	0.2720 0.1139	-0.0968 0.5802	0.1984 0.2532	0.1104 0.5277	0.5112 0.0017			
EC	0.0839 0.6317	0.1462 0.4022	-0.1889 0.2772	-0.1839 0.2902	-0.1064 0.5430	-0.0779 0.6566	0.0097 0.9560	-0.0996 0.5693	-0.2433 0.1591	-0.1163 0.5060	0.1432 0.4118		
DMO, cm ²	0.6184 < 0.001	0.5684 0.0004	0.2727 0.1130	0.3093 0.0706	0.5006 0.0022	0.8764 < 0.001	0.6644 < 0.001	0.4106 < 0.001	0.4382 0.0085	0.3476 0.0408	0.2626 0.1275	-0.0384 0.8268	
	PTotI	PDigI	GPD	EA	POT	CO, g	CO, %	PC	PO	DMO, cm ³	DMO, mmAl	EC	

Figura 2. Análise de correlação para os dados de ingestão de P, desempenho e análises ósseas para o 3º e 4º metacarpo. PTotI: Fósforo total ingerido; PDigI: Fósforo digestível ingerido; GDP: Ganho de peso diário; EA: Eficiência alimentar; POT, g: Peso ósseo total em gramas; CO, g: Cinzas ósseas em g; CO, %: Porcentagem de cinzas ósseas por osso; PC: concentração de fósforo nas cinzas; PO: concentração de fósforo no osso; DMO: Densidade mineral óssea; EC: Espessura da cortical.

Os gráficos com as equações lineares múltiplas e os cálculos de BDR de P utilizando duas das análises com maiores correlações (CO em gramas e DMO em cm², para o metacarpo, e de CO em gramas e DMO em mmAl, para a costela) e uma sem correlação significativa (CO, %) com o P digestível ingerido, são demonstrados na Figura 1 e Figura 2 para o metacarpo e a costela, respectivamente. Nota-se que o modelo teve melhor ajuste para os slopes obtidos para as análises de CO em gramas, DMO em cm² e em mmAl (p -valor < 0,05). A Tabela 4 contém os resultados do intervalo de confiança (IC), limite superior (LS), média (M) e limite inferior (LI) dos cálculos de BDR, onde é possível observar valores mais elevados de IC para porcentagem de CO no metacarpo e valores negativos de BDR de P para ambos os fosfatos testados nas análises de porcentagem de CO da costela. A Figura 3 ilustra as informações de IC e os valores do LS, M e LI das BDRs de P calculadas.

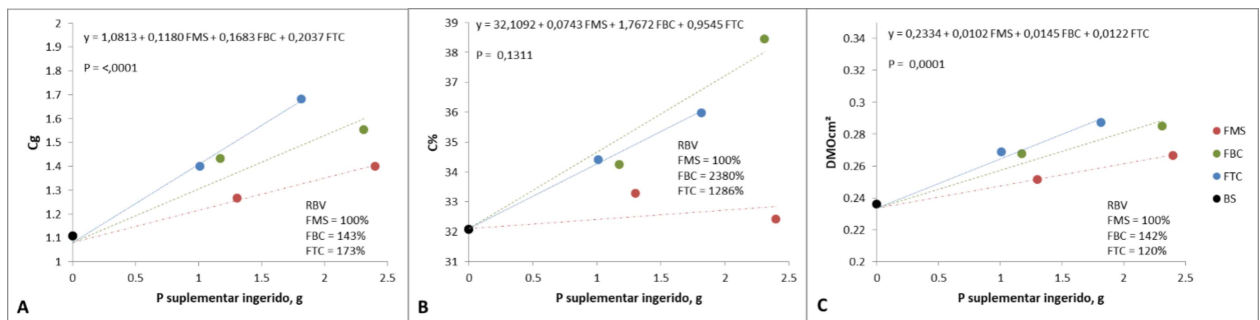


Figura 3. Biodisponibilidade relativa de P utilizando diferentes análises do metacarpo. A: análise de cinzas em gramas; B: análise de cinzas em porcentagem C: análise de densidade mineral óssea em cm^2 . FMS = Fosfato monossódico (fonte padrão); FBC = Fosfato Bicálcico; FTC = Fosfato tricálcico; BS = Dieta basal.

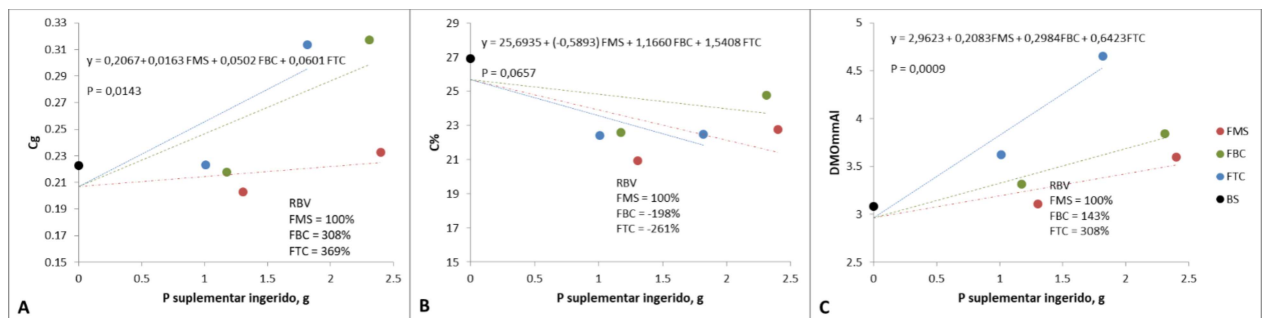


Figura 4. Biodisponibilidade relativa de P utilizando diferentes análises da costela. A: análise de cinzas em gramas; B: análise de cinzas em porcentagem C: análise de densidade mineral óssea em mmAl . FMS = Fosfato monossódico (fonte padrão); FBC = Fosfato Bicálcico; FTC = Fosfato tricálcico; BS = Dieta basal.

Tabela 4. Médias e intervalos de confiança da biodisponibilidade de P para os fosfatos testados.

Osso	Fonte	Análise óssea	Biodisponibilidade de P				Corr ¹	P-valor ²
			IC	LS	M	LI		
Metacarpo	FBC	Cg	0,39	182%	143%	104%	0,5985	0,0001
	FTC	Cg	0,62	234%	173%	111%		
	FBC	C%	14,39	3819%	2380%	941%	0,2261	0,1916
	FTC	C%	22,93	3579%	1286%	-1008%		
	FBC	DMOcm ²	0,44	186%	142%	98%	0,5684	0,0004
	FTC	DMOcm ²	0,73	193%	120%	47%		
Costela	FBC	Cg	0,90	397%	308%	218%	0,4620	0,0116
	FTC	Cg	1,50	518%	368,60%	219%		
	FBC	C%	1,54	-44%	-197,90%	-352%	-0,1188	0,4967
	FTC	C%	2,16	-45%	-261%	-478%		
	FBC	DMOmmAl	0,65	208%	143%	78%	0,4187	0,0123
	FTC	DMOmmAl	1,10	418%	308%	198,80%		

IC = Intervalo de confiança; LS = Limite superior; M = Média; LI = Limite inferior

FBC = Fosfato bicálcico; FTC = Fosfato tricálcico

¹ Correlação entre análises ósseas e P digestível ingerido

² P-valor das análises de correlação

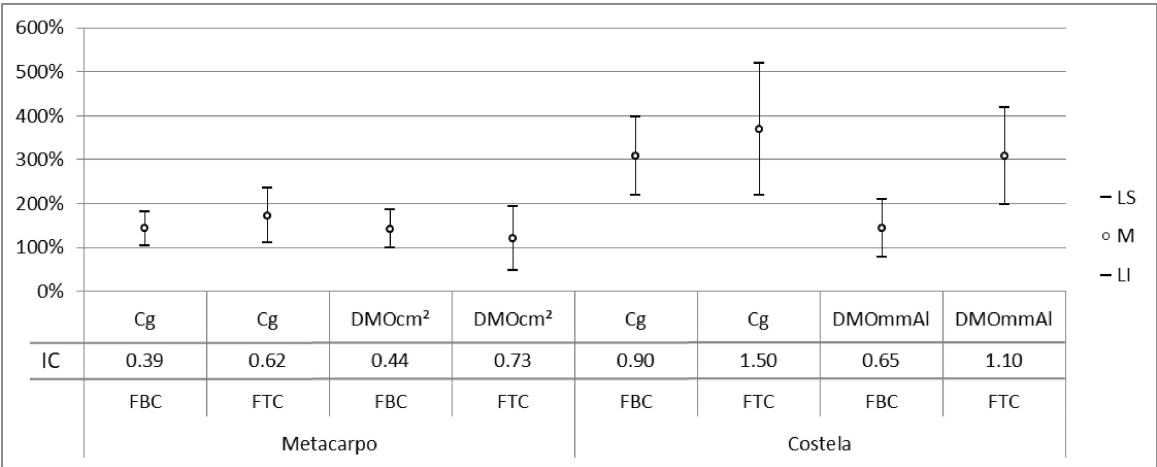


Figura 5. Gráficos de média, limite superior e inferior dos dados de BDR de P a partir das análises de Cg, DMOcm² e DMOmmAl. IC: Intervalo de confiança; LS: Limite superior; M: Média; LI: Limite inferior. FBC = Fosfato bicálcico FTC = Fosfato tricálcico.

13 DISCUSSÃO

Fosfatos inorgânicos são amplamente utilizados para a suplementação fosfórica na dieta de suínos, uma vez que a maior parte do P presente nos ingredientes de origem vegetal está sob a forma de ácido fítico, sendo considerado indigestível (Humer *et al.*, 2014). Os ensaios de BDR de P, como de Baker *et al.* (2013), Petersen *et al.* (2011), Souza *et al.* (2009) e outros, visam conhecer o real aproveitamento do P de diversas fontes alimentares utilizadas na nutrição animal a fim de melhorar a utilização de P da dieta. Uma vez que o fósforo fornecido não é absorvido e/ou utilizado de maneira eficiente pelos suínos, ele será excretado na forma de fezes e urina e contribuirá para os processos de eutrofização dos cursos d'água (McDonald *et al.*, 2012).

Na determinação da BDR de P de diferentes fosfatos monocálcicos e o FBC em relação ao FMS, Petersen *et al.* (2011) não encontraram diferenças nos dados de desempenho para as diferentes fontes, com aumento da ingestão de P em função do aumento da concentração nas dietas. Para Souza *et al.* (2009) houve aumento no desempenho dos animais quando comparados os tratamentos com suplementação fosfórica à dieta basal, mas não houve diferença entre as fontes suplementares. Os resultados do presente estudo apontam que o uso de diferentes fosfatos não foi capaz de influenciar dados de ganho de peso e eficiência alimentar, mas influenciou nos níveis de ingestão de P, com animais nos tratamentos com maior concentração de P apresentando maior consumo do mineral.

O presente ensaio faz parte de uma pesquisa que visa, além dos objetivos presentes, determinar a digestibilidade e a BDR de P dos fosfatos inorgânicos testados que, portanto, não serão discutidos de maneira aprofundada. Considerando-se a composição dos fosfatos utilizados, a diferença na digestibilidade encontrada entre os fosfatos já era esperada. Fosfatos de rocha possuem o P na sua forma disponível, diferentemente do P de origem vegetal que se encontra na forma de ácido fítico. Das fontes utilizadas no estudo, os resultados das análises laboratoriais demonstraram que FMS era constituído por 24,16% de P disponível, enquanto o FBC possuía 18,92% e FTC 14,84%, ambos em uma forma disponível para digestão.

Os estudos de BDR de P visam, em sua maioria, conhecer dados de análises ósseas que determinem a mineralização do osso, ou seja, a capacidade do P de integrar a matriz óssea quando suplementado em proporções corretas ao Ca. No entanto, não há uma padronização referente aos ossos investigados, às análises ósseas ou mesmo sobre as fontes adotadas como padrão nos estudos de BDR de P. Diversos estudos têm sido desenvolvidos a fim de aplicar diferentes metodologias de avaliação óssea para a determinação da mineralização óssea para aves e suínos (Onyango *et al.*, 2003; Shastak *et al.*, 2012; Sørensen *et al.*, 2019; Wensley *et al.*, 2020), bem como do osso ou região óssea (Floradin *et al.*, 2024; Willians *et al.*, 2023), uma vez que os ossos do esqueleto não respondem de forma igual às deficiências e suplementações fosfóricas.

Os ossos apresentam uma camada externa compacta, chamada de osso cortical, e uma estrutura interna esponjosa, chamada de osso trabecular. O osso trabecular parece ser mais sensível às deficiências minerais, em comparação ao osso cortical (Kim e Park, 2013; Gerlinger *et al.*, 2019; Floradin *et al.*, 2024), sendo então interessante a avaliação de tecidos ósseos com diferentes características. Ao avaliarem a mineralização óssea de diferentes ossos e regiões ósseas para leitões de reposição, Floradin *et al.* (2024) observaram que estruturas ósseas com maior proporção de osso trabecular apresentavam maior sensibilidade ao período de deficiência de P. Para os estudos de BDR, é necessário o fornecimento de nutrientes em níveis inferiores

aos exigidos pelos animais, isto é, em deficiência. Portanto, seria possível obter uma melhor resposta para o real aproveitamento de P utilizando-se ossos mais sensíveis a esta variação. Williams *et al.* (2023) avaliaram diferentes ossos e concluíram que a fíbula e a 2ª costela eram as estruturas com maior resposta aparente a suplementação de P e vitamina D, e que a 10ª costela era mais apropriada para a identificação histopatológica de lesões para suínos na fase de creche.

As respostas das análises ósseas podem variar a depender do nível de P utilizado e do osso utilizado para análise. Além disso, cada animal apresentou um nível de ingestão de P total e/ou digestível, com desvio padrão chegando a 1,32 para PTotI e 0,79 para PDigI (dados não demonstrados). Isso implicaria em níveis de mineralização óssea diferentes, não em função da fonte utilizada, mas do nível de P ingerido e absorvido. Portanto, considerando ainda que os estudos de BDR visam analisar a mineralização óssea em função dos dados de ingestão de P, realizou-se análises de correlação para a determinação da avaliação óssea e do osso mais adequado para o teste de BDR de P. As análises de correlação contam com os dados de PTotI e PDigI, uma vez que a fração digestível do nutriente é importante para a escolha do ingrediente utilizado nas formulações. Além disso, o P aproveitado no organismo será uma fração do P que foi digerida pelo animal. Portanto, o conhecimento de P biodisponível seria uma informação adicional à escolha de ingredientes com alta digestibilidade.

Quando considerado apenas os dados de ingestão de P (total e digestível), ambos os ossos apresentaram correlação positiva para as análises de POT e CO em gramas. Para a costela, as análises ósseas de POT e CO em gramas correlacionaram-se aos dados de desempenho (GPD e EA). Desse modo, infere-se que o peso do osso e das cinzas pode estar relacionado à melhora no desempenho animal, em função da melhor utilização do P ingerido, mas não em função do nível de ingestão de P. No entanto, cabe ressaltar que, para a costela, esse dado pode estar subestimado, uma vez que não houve uma padronização do tamanho ou proporção do fragmento retirado dos animais. Já o metacarpo, foi utilizado integralmente, de modo que animais que se diferenciavam em tamanho e/ou deposição óssea possivelmente apresentariam diferenças equivalentes para POT e CO em gramas. No entanto, para o metacarpo, houve correlação positiva apenas entre CO em gramas e GPD e correlação em significância marginal entre CO em gramas e EA, indicando que o aumento do peso ósseo e de cinzas pode não estar necessariamente ligado ao ganho de peso do animal.

Houve correlação positiva com significância marginal entre os dados de PTotI e DMO em cm³ para ossos do metacarpo. Os resultados de Ryan *et al.* (2021) indicam que a densidade em cm³ para o metacarpo foi significativamente menor para dois períodos subsequentes de baixa concentração de P digestível nas dietas. Ossos como o metacarpo, com sua maior proporção de osso cortical, poderiam responder melhor a esta análise, uma vez que o osso trabecular é um tecido esponjoso que, quando seco, permitiria uma maior variação no momento da imersão em água.

Para a costela, os dados de ingestão ainda se correlacionaram positivamente às análises de DMO em mmAl e EC, enquanto para metacarpo os dados de ingestão demonstraram apenas correlação em significância marginal para a DMO em mmAl. Além disso, ambas as análises ósseas, DMO em mmAl e EC, correlacionaram-se positivamente à POT e CO em gramas, para ossos da costela, com níveis mais elevados para DMO em mmAl. Na avaliação de diferentes ossos e análises ósseas para a determinação da cinza corporal total, Lee *et al.* (2021) demonstram que as análises de cinzas, Ca e P para os ossos metacarpo, metatarso e tíbia apresentam melhor correlação com a cinza corporal. Este dado indica que essas estruturas e

análises ósseas seriam mais adequadas para estimar a mineralização óssea total, mas não indica a capacidade de utilização do P ingerido. O comportamento das correlações do presente estudo sugere que ossos da costela respondem mais rapidamente à restrição ou suplementação fosfórica enquanto, como apontado por Floradin *et al.* (2024), ossos com maior proporção de osso cortical, como o metacarpo, são mais estáveis às alterações de P dietético, o que pode ser percebido principalmente pelos resultados de EC mm e DMO em mmAl.

Diversos pesquisadores utilizam a DEXA para a determinação do conteúdo e da densidade mineral dos ossos de suínos frente à suplementação de P ou Ca (Létourneau-Montminy *et al.* 2014; Ryan *et al.* 2011; Floradin *et al.* 2024a; Heurtault *et al.* 2024), apresentando-se como um método não invasivo e não destrutivo (Floradin *et al.* 2024b). A ingestão de P também se correlacionou positivamente aos dados de DMO em cm². Em função do tamanho dos fragmentos ósseos utilizados, o DEXA não foi capaz de captar imagens da costela e, portanto, não é possível comparar os ossos para essa análise. Portanto, torna-se interessante a investigação da aplicação dessa análise para ossos com maior proporção de tecido trabecular, como a costela, a fim de determinar uma possível correlação com os dados de ingestão de P.

Para a 12^a costela, houve correlação negativa entre PC e as avaliações de POT e CO em gramas. No entanto, observa-se uma correlação positiva entre PO e porcentagem de CO. Estes dados podem indicar que, a diminuição do PC em relação ao POT e CO em gramas não está necessariamente ligada a menor PO, mas talvez na proporção de P que é depositado ou removido do osso em períodos de restrição. Lee *et al.* (2021) não encontraram diferenças na relação Ca:P nos ossos analisados para diferentes níveis de suplementação de P. Seria necessária, portanto, a verificação de Ca das costelas para a confirmação da hipótese levantada. O metacarpo, por sua vez, não sofreu alterações ou acompanhou os resultados de outras avaliações ósseas, demonstrando de fato sua maior estabilidade.

As análises de imagem de DMO em mmAl para a costela e de DMO em cm² para o metacarpo surgem como alternativas interessantes às análises laboratoriais como determinação de cinzas e/ou de fósforo, uma vez que se correlacionaram positivamente com algumas dessas análises. Os processos de análise podem variar entre laboratórios, o que limita a reprodutibilidade dos ensaios, além de apresentarem erro global de estimação (que engloba erros analíticos e de amostragem; Detmann *et al.*, 2021). Com o uso de tecnologias de imagem, é possível mitigar as divergências de procedimentos e os erros somados ao processamento de análise da mineralização óssea dos animais.

Ao aplicar os resultados das diferentes análises ósseas aos cálculos de BDR de P, nota-se que para o metacarpo houve um melhor ajuste ao modelo para as análises de CO em gramas e DMO em cm², as quais também obtiveram os maiores níveis de correlação positiva aos dados de ingestão de P. Já os slopes obtidos pela análise de porcentagem de CO não apresentaram bom ajuste a curva, com IC de 1439% para FBC e 2293% para FTC. Esta falta de ajuste ao modelo já era esperada uma vez que não houve correlação entre os valores de C% e a ingestão de P. Ao comparar as análises de CO em gramas e DMO em cm² é possível ainda observar um valor de IC numericamente menor para ambas as análises, em comparação ao IC de C%. Apesar da diferença nos valores média de BDR de P para os fosfatos quando comparada as análises de CO em gramas e DMO em cm² para o metacarpo, os resultados são estatisticamente semelhantes, quando considerado o LS e LI dos ICs, o que corrobora para o uso de tecnologias como o DEXA para a obtenção dos dados de mineralização óssea.

Do mesmo modo, as análises de CO em gramas e DMO em mmAl (com maiores correlações aos dados de ingestão, junto com EC) aplicadas à costela também apresentaram melhor ajuste ao modelo do que as análises de porcentagem de CO que não apresentou correlação aos dados de ingestão de P. A análise de porcentagem de CO não teve bom ajuste ao modelo, com resultados negativos até mesmo para o LS de ambos os fosfatos. Este resultado também já era esperado, uma vez que, embora sem correlação, os dados de C% e de ingestão apresentaram uma relação negativa. Ainda as análises de CO em gramas e DMO em mmAl resultaram em dados de BDR semelhantes para o FTC, mas o mesmo não ocorreu para FBC. É importante enfatizar que as análises realizadas na costela podem estar sub ou superestimadas, uma vez que o osso foi dividido para a realização das análises sem padronização exata. Os presentes resultados sugerem a necessidade de uma investigação mais abrangente e padronizada para o uso da costela como osso alvo dos estudos de BDR. O aumento numérico dos IC e dos valores médios de BDR de P obtidos com uso da costela em relação ao metacarpo podem estar associados à maior variação da deposição óssea de P nos períodos de restrição, o que poderia melhor traduzir o real aproveitamento de P no organismo.

Petersen *et al.* (2011) calcularam a BDR de P do FBC em 57% em relação aos FMS, no entanto utilizaram apenas a força de quebra como parâmetro ósseo empregado no cálculo dos slopes. Souza *et al.* (2009) obtiveram resultados que variavam de 58,5% a 146,3% a depender da origem do fosfato e da análise empregada. Os resultados obtidos no presente ensaio também demonstram a oscilação que pode ocorrer dentro de um mesmo estudo e entre diferentes estudos, uma vez os presentes valores de BDR de P do FBC estão entre 142% e 308% a depender do osso e do tipo de análise realizada (desconsiderando a porcentagem de CO). Assim, primeiramente, é importante que nutricionistas e pesquisadores estejam cientes e atentos à falta de padronização dos ensaios de BDR no momento de considerar esta informação. Segundo, é de grande importância que os estudos de BDR de P sejam padronizados a fim de mitigar as variações em termos experimentais, possibilitando a comparação dos estudos de maneira prática, garantindo ainda sua reprodutibilidade.

14 CONCLUSÃO

As avaliações de POT, CO em gramas, DMO em mmAl e EC realizadas na costela, apresentaram correlações semelhantes para dos dados de ingestão de P. Para as análises realizadas no metacarpo, POT, CO em gramas e DMO em cm² demonstraram os maiores níveis de correlação aos dados de ingestão. Portanto, as avaliações de CO em gramas, comumente utilizadas nos ensaios de BDR de P são um bom indicativo do uso de P ingerido e, consequentemente, da mineralização óssea. As avaliações de imagem (DMO em mmAl e cm²) apresentam-se como uma alternativa às metodologias de análises laboratoriais, mitigando erros de processamento. Para a determinação da BDR de P, propõe-se considerar o uso de ossos com maior proporção de osso trabecular, como a costela, uma vez que apresentaram maior sensibilidade aos níveis de P ingerido.

15 REFERÊNCIAS

- BAKER, S. R.; KIM, B. G.; STEIN, H. H. Comparison of values for standardized total tract digestibility and relative bioavailability of phosphorus in dicalcium phosphate and distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. **Journal of animal science**, v. 91, n. 1, p. 203-210, 2013. DOI: 10.2527/jas.2010-3776. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/91/1/203/470290>. Acesso em: 25 nov. 2024;
- DETMANN, E. *et al.* **Métodos para análise de alimentos**. 2ª Edição. Visconde do Rio Branco, MG: Suprema, v. 350, 2021;
- FLORADIN, P.; POMAR, C.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; SCHLEGEL, P. *et al.* Development of the mineralisation of individual bones and bone regions in replacement gilts according to dietary calcium and phosphorus. **Animal**, v. 18, n. 8, p. 101241, 2024. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101241. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731124001721?via%3Dihub>. Acesso em: 4 dez. 2024;
- GERLINGER, C. *et al.* Physiological and transcriptional responses in weaned piglets fed diets with varying phosphorus and calcium levels. **Nutrients**, v. 11, n. 2, p. 436, 2019. DOI: 10.3390/nul1020436. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6643/11/2/436>. Acesso em: 4 dez. 2024;
- HEURTAULT, J.; HISCOCKS, S.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; SCHLEGEL, P. Dynamics of bone mineralization in primiparous sows as a function of dietary phosphorus and calcium during lactation. **animal**, v. 18, n. 4, p. 101130, 2024a. DOI: 10.1016/j.animal.2024.101130. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38579665/>. Acesso em: 7 fev. 2025;
- HEURTAULT, J.; MAÏKOFF, G.; LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; SCHLEGEL, P. Method: Body composition assessment of sows using dual-energy X-ray absorptiometry. **Animal-Open Space**, v. 3, p. 100079, 2024b. DOI: 10.1016/j.anopes.2024.100079. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772694024000190>. Acesso em: 24 mar. 2025;
- HUMER, E.; SCHWARZ, C.; SCHEDLE, K. Phytate in pig and poultry nutrition. **Journal of animal physiology and animal nutrition**, v. 99, n. 4, p. 605-625, 2015. DOI: 10.1111/jpn.12258. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jpn.12258>. Acesso em: 28 nov. 2024;
- KIM, C.; PARK, D. The effect of restriction of dietary calcium on trabecular and cortical bone mineral density in the rats. **Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry**, v. 17, n. 4, p. 123, 2013. DOI: 10.5717/jenb.2013.17.4.123. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4241910/>. Acesso em: 28 nov. 2024;
- LEE, S. A.; LAGOS, L. V.; BEDFORD, M. R.; STEIN, H. H. Quantities of ash, Ca, and P in metacarpals, metatarsals, and tibia are better correlated with total body bone ash in growing pigs than ash, Ca, and P in other bones. **Journal of animal science**, v. 99, n. 6, p. skab149, 2021. DOI: 10.1093/jas/skab149. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33959745/>. Acesso em: 24 mar. 2025;

LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P.; LOVATTO, P. A.; POMAR, C. Apparent total tract digestibility of dietary calcium and phosphorus and their efficiency in bone mineral retention are affected by body mineral status in growing pigs. **Journal of Animal Science**, v. 92, n. 9, p. 3914-3924, 2014. DOI: 10.2527/jas.2013-7320. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25057034/>. Acesso em: 2 abr. 2025;

LITTELL, R. C. *et al.* Estimation of relative bioavailability of nutrients using SAS procedures. **Journal of Animal Science**, v. 75, n. 10, p. 2672-2683, 1997. DOI: 10.2527/1997.75102672x. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/75/10/2672/4624904>. Acesso em: 20 nov. 2024;

MCDONALD, P. *et al.* **Animal Nutrition**. 7th ed., Prentice Hall, Harlow, England, p. 112-115, 2010. Disponível em: <https://eliasnutri.files.wordpress.com/2020/07/animal-nutrition-7th-edition.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024;

ONYANGO, E. M.; HESTER, P. Y.; STROSHINE, R.; ADEOLA, O. Bone densitometry as an indicator of percentage tibia ash in broiler chicks fed varying dietary calcium and phosphorus levels. **Poultry Science**, v. 82, n. 11, p. 1787-1791, 2003. DOI: 10.1093/ps/82.11.1787. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14653474/>. Acesso em: 2 abr. 2025;

PETERSEN, G. I.; PEDERSEN, C.; LINDEMANN, M. D.; STEIN, H. H. Relative bioavailability of phosphorus in inorganic phosphorus sources fed to growing pigs. **Journal of Animal Science**, v. 89, n. 2, p. 460-466, 2011. DOI: 10.2527/jas.2009-2161. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/89/2/460/4764228>. Acesso em: 25 nov. 2024;

ROSTAGNO, H. S. *et al.* Tabelas brasileiras de aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais. 4ª ed. **Viçosa-MG: Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Viçosa**, v. 488, 2017;

RYAN, W. F.; LYNCH, P. B.; O'DOHERTY, J. V. Compensatory effect of dietary phosphorus on performance of growing pigs and development of bone mineral density assessed using dual energy X-ray absorptiometry. **Livestock Science**, v. 138, n. 1-3, p. 89-95, 2011. DOI: 10.1016/j.livsci.2010.12.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871141310006074>. Acesso em: 24 mar. 2025

SHASTAK, Y. *et al.* Comparison and evaluation of bone measurements for the assessment of mineral phosphorus sources in broilers. **Poultry Science**, v. 91, n. 9, p. 2210-2220, 2012. DOI: 10.3382/ps.2012-02179. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032579119396798>. Acesso em: 4 dez. 2024;

SØRENSEN, K. U.; SHIGUETOMI-MEDINA, J. M.; POULSEN, H. D. Mineralization of tubular bones is affected differently by low phosphorus supply in growing-finishing pigs. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 7, p. 3628-3634, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9583. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6593434/>. Acesso em: 24 mar. 2025;

SOUZA, L. W. O. *et al.* Phosphorus availability of rock phosphates as compared with feed-grade phosphates for swine. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 90-98, 2009. DOI: 10.1590/S1516-35982009000100012. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbz/a/BnBHrvz6fQFGCYw9RSFB9sk/?lang=en>. Acesso em: 3 fev. 2025;

SUTTLE, N. F. **Mineral nutrition of livestock**. 4th ed. Oxfordshire, UK: CAB International p. 25-41 e 123-156, 2010;

WENSLEY, M. R. *et al.* Assessment of two methods for estimating bone ash in pigs. **Journal of Animal Science**, v. 98, n. 8, p. skaa251, 2020. DOI: 10.1093/jas/skaa251. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7457956/>. Acesso em: 2 abr. 2025;

WILLIAMS, H. R. *et al.* The effect of bone and analytical methods on the assessment of bone mineralization response to dietary phosphorus, phytase, and vitamin D in nursery pigs. **Journal of Animal Science**, v. 101, p. skad353, 2023. DOI: 10.1093/jas/skad353. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10635674/>. Acesso em: 7 fev. 2025;

ZHAI, H.; ADEOLA, O.; LIU, J. Phosphorus nutrition of growing pigs. **Animal Nutrition**, v. 9, p. 127-137, 2022. DOI: 10.1016/j.aninu.2022.01.010. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9079227/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

16 CONCLUSÕES GERAIS

Com base nos estudos apresentados, foi possível entender que não há uma padronização das metodologias aplicadas aos ensaios de BDR de Ca e P, sendo então necessário que pesquisadores e nutricionistas estejam atentos no momento de uso destes dados para a escolha de ingredientes. Ainda, torna-se necessária a padronização das metodologias de determinação da BDR de Ca e P, a fim de tornar a comparação entre os estudos mais prática, assegurando ainda a reprodutibilidade dos ensaios.

A análise de CO em gramas é a mais frequentemente utilizada nos ensaios de BDR de Ca e P identificados na revisão sistemática, sendo também uma das análises de maior correlação com os dados de ingestão de P para suínos em crescimento suplementados com diferentes fosfatos inorgânicos. Além disso, análise que utilizam tecnologias de imagem, como a DMO em mmAl e cm² apresentam-se como alternativas interessantes para a obtenção de respostas ósseas, mitigando erros que possam ser acumulados nos processos de análises laboratoriais. Propõe-se considerar o uso de ossos com maiores proporção de osso trabecular, como a costela. Propõe-se, ainda, considerar o cálculo de correlação entre as análises ósseas e a ingestão do mineral antes da realização da *slope ratio*, uma vez que, no presente estudo, as análises com melhores correlações apresentaram ajuste ao modelo.

A padronização da metodologia dos ensaios de BDR de Ca e P contribuirá para o uso mais preciso desses minerais nas dietas, garantindo a reprodutibilidade dos ensaios e permitindo a comparação dos resultados. Desse modo, a consideração da biodisponibilidade das fontes permitirá a escolha de fontes mais biodisponíveis, possibilitando o atendimento das exigências nutricionais dos animais aliada a redução da excreção dos minerais, promovendo uma produção cada vez mais sustentável.