

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

ELTON FRANCISCO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DO CONSUMO ÓTIMO SUPLEMENTAR DE ZINCO NA
FORMA DE METAL AMINOÁCIDO PARA POEDEIRAS DE 55 A 71
SEMANAS DE IDADE**

**RECIFE
2025**

ELTON FRANCISCO DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DO CONSUMO ÓTIMO SUPLEMENTAR DE ZINCO NA
FORMA DE METAL AMINOÁCIDO PARA POEDEIRAS DE 55 A 71
SEMANAS DE IDADE**

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-graduação em Zootecnia da
Universidade Federal Rural de
Pernambuco para obtenção do título de
Mestre em Zootecnia

Área de concentração: Zootecnia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Boa-Viagem
Rabello

Coorientadora: Profa. Dra. Lilian
Francisco Arantes de Souza

**RECIFE
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

O48e Oliveira, Elton Francisco de.

Estimativa do consumo ótimo suplementar de zinco na forma de metal aminoácido para poedeiras de 55 a 71 semanas de idade / Elton Francisco de Oliveira. – Recife, 2025.

53 f.; il.

Orientador(a): Carlos Boa-Viagem Rabello.

Co-orientador(a): Lilian Francisco Arantes de Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Galinhas. 2. Hemograma. 3. Zinco. 4. Nutrição animal I. Rabello, Carlos Boa-Viagem, orient. II. Souza, Lilian Francisco Arantes de, coorient. III. Título

CDD 636



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**ESTIMATIVA DO CONSUMO ÓTIMO SUPLEMENTAR DE ZINCO NA
FORMA DE METAL AMINOÁCIDO PARA POEDEIRAS DE 55 A 71
SEMANAS DE IDADE**

Dissertação elaborada por
ELTON FRANCISCO DE OLIVEIRA

Aprovado em 21/02/2025

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

CARLOS BOA VIAGEM RABELLO

Data: 21/02/2025 16:22:25-0300

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

Prof. Dr. Carlos Boa-Viagem Rabello
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Documento assinado digitalmente

CLAUDIA DA COSTA LOPES

Data: 22/02/2025 18:48:40-0300

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

Profª. Dra. Cláudia da Costa Lopes
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



Documento assinado digitalmente

MARCOS JOSE BATISTA DOS SANTOS

Data: 24/02/2025 11:31:05-0300

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

Dr. Marcos José Batista dos Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, Edvaldo Francisco de Luciene Francisco, que me apoiaram nessa jornada em busca do conhecimento e contribuíram de inúmeras maneiras para a formação da pessoa que sou hoje.

Agradeço à minha avó, Tereza Maria, por ter contribuído de forma essencial para o meu crescimento e pelos ensinamentos valiosos que me transmitiu ao longo dos anos.

A Karina, Ingrid, Maria Clara, Mayra, Leandra, Stephani e as demais pessoas que contribuíram assiduamente no dia a dia e para a execução desta pesquisa.

A Weber, por estar ao meu lado durante essa jornada, compartilhando desafios, ajudando a superar os contratempos e trazendo clareza quando eu precisava.

À Adrielle, pelo companheirismo e por ter me dado aquele “empurrãozinho” diversas vezes durante todo esse processo, o que me fez chegar aonde estou hoje.

Agradeço imensamente a Maria Victória e Maria Vitória, que estiveram comigo desde a graduação e continuam ao meu lado no mestrado, tornando essa trajetória ainda mais especial.

Agradeço a Yasmin, Gabriela, Maria Thelma, Carolina, que conheci durante a pós-graduação e tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora.

Ao meu orientador, Carlos Boa-Viagem Rabello, que me guiou e compartilhou conhecimento ao longo desta caminhada, contribuindo significativamente para a minha formação e para realização deste estudo.

A minha coorientadora, Lilian Francisco Arantes pelos ensinamentos e contribuições que foram importantes para minha formação acadêmica.

Agradeço ao Grupo de Pesquisa GEAVES pelos valiosos ensinamentos e pela troca de experiências acadêmicas, contribuindo para minha formação.

“Passamos toda a vida nos preocupando com o futuro, fazendo planos, tentando prevê-lo, como se desvendá-lo fosse aliviar o impacto. Mas o futuro está sempre mudando. Ele é o lar dos nossos medos mais profundos e das nossas maiores esperanças. No entanto, uma coisa é certa: quando ele finalmente se revela nunca é como imaginamos”

Shonda Rhimes

RESUMO

O zinco é um micromineral essencial para galinhas poedeiras, sendo geralmente suplementado por fontes inorgânicas. No entanto, a forma complexada a aminoácidos apresenta melhor aproveitamento pelo animal em comparação às fontes inorgânicas. Entretanto, é necessário estabelecer os valores ideais de suplementação. Portanto, o estudo foi conduzido com o objetivo de estimar a necessidade de zinco complexado a aminoácidos (ZnCAA) para poedeiras comerciais no período pós-pico. Para isso, foram utilizadas 336 poedeiras com idade inicial de 55 semanas, distribuídas de forma inteiramente casualizada. O período experimental ocorreu até as 71 semanas de idade das aves. Os níveis de suplementação utilizados foram 0, 5, 15, 25, 40, 60 e 80 mg/kg de ZnCAA. Com o intuito de determinar a ingestão ótima, foram realizadas avaliações de desempenho produtivo, qualidade dos ovos a cada 28 dias, avaliação das células sanguíneas e qualidade óssea. Os dados obtidos foram testados quanto à homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos. Em seguida, foi realizada análise de regressão para estimar o consumo ideal de zinco. O modelo Broken Line foi o que melhor se ajustou, descrevendo a relação entre a resposta e ingestão de zinco. Houve efeito significativo para massa de ovo ($P=0,010$) e produção ($P=0,001$), com estimativas de 2,715 e 6,301 mg/ave/dia, respectivamente. Foi considerado efeito significativo para altura do albúmen ($P=0,053$), com estimativa correspondente a 4,8 mg/ave/dia. Para densitometria proximal, houve efeito quadrático ($P=0,002$), e para densitometria medial, houve efeito significativo ($P=0,026$), com a estimativa de 1,8 mg/ave/dia. Houve efeito significativo para hemoglobina ($P=0,010$), volume corpuscular médio ($P=0,046$) e considerado para concentração de hemoglobina corpuscular média ($P=0,059$) com níveis de suplementação de 3,4, 2,9 e 2,3 mg/ave/dia, respectivamente. Recomenda-se a suplementação de 6,3 mg/ave/dia de ZnAAC dietético, o que equivale a 60 mg/kg de ração, a fim de garantir um desempenho produtivo satisfatório, homeostase hematológica e qualidade óssea para poedeiras comerciais leves de 55 a 71 semanas de idade.

Palavras-chaves: desempenho; hemograma; micromineral; minerais complexados; qualidade óssea.

ABSTRACT

Zinc is an essential micromineral for laying hens, typically supplemented with inorganic sources. However, the amino acid complexed form provides better utilization by the animal compared to inorganic sources. Nevertheless, it is necessary to establish the ideal supplementation levels. Therefore, the study was conducted with the aim of estimating the zinc requirement as amino acid complexed zinc (ZnCAA) for commercial laying hens in the post-peak period. A total of 336 hens, initially 55 weeks old, were used, and the experimental period lasted until the hens reached 71 weeks of age. The supplementation levels used were 0, 5, 15, 25, 40, 60, and 80 mg/kg of ZnCAA. To determine the optimal intake, evaluations of productive performance, egg quality every 28 days, blood cell analysis, and bone quality were performed. The obtained data were tested for homogeneity of variances and residual normality. A regression analysis was then carried out to estimate the ideal zinc intake. The Broken Line model was the best fit, describing the relationship between the response and zinc intake. There was a significant effect on egg mass ($P=0.010$) and production ($P=0.001$), with estimates of 2.715 and 6.301 mg/hen/day, respectively. A significant effect on albumen height ($P=0.053$) was found, with an estimate of 4.8 mg/hen/day. For proximal densitometry, a quadratic effect was observed ($P=0.002$), and for medial densitometry, a significant effect ($P=0.026$) was found, with an estimate of 1.8 mg/hen/day. There was a significant effect on hemoglobin ($P=0.010$), mean corpuscular volume ($P=0.046$), and mean corpuscular hemoglobin concentration ($P=0.059$), with supplementation levels of 3.4, 2.9, and 2.3 mg/hen/day, respectively. It is recommended to supplement 6.3 mg/bird/day of dietary ZnAAC, which corresponds to 60mg/kg of feed, to ensure satisfactory productive performance, hematological homeostasis, and bone quality for commercial laying hens from 55 to 71 weeks of age.

Keywords: bone quality; complexed minerals; hemogram; trace minerals; performance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Definição dos minerais ligados a moléculas orgânicas.	21
Tabela 2. Níveis de suplementação dos metais aminoácidos nas dietas experimentais de acordo com os níveis de suplementação de ZnCAA	26
Tabela 3. Composição basal calculada e analisada das dietas experimentais.....	26
Tabela 4. Desempenho produtivo das poedeiras comerciais de 55 a 71 semanas de idade submetidas as dietas contendo zinco complexado a aminoácido.	31
Tabela 5. Peso e avaliações métricas dos componentes dos ovos de poedeiras comerciais de 55 a 71 semanas alimentadas com dietas contendo de zinco complexado a aminoácidos.....	32
Tabela 6. Qualidade do ovo e percentual de componentes de ovos de ovos de poedeiras comerciais de 55 a 71 semanas alimentadas com dietas contendo de zinco complexado a aminoácidos.....	33
Tabela 7. Avaliação de densitometria óssea de poedeiras comerciais com 71 semanas suplementadas com Zinco complexado a aminoácido	34
Tabela 8. Leucograma de poedeiras comerciais com idades entre 55 e 71 semanas, suplementadas com zinco complexado a aminoácido	35
Tabela 9. Hemograma de poedeiras comerciais com idades entre 55 e 71 semanas, suplementadas com zinco complexado a aminoácido	35
Tabela 10. Estimativa da suplementação de Zinco obtida com base nas variáveis analisadas no atual estudo e comparativo com o sugerido	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Altura do Albúmen

AAFO – Association of American feed Control Official

AG – Altura da Gema

BAS – Basófilos

CAA – Complexado à aminoácidos

CDZ – Conversão por Dúzia de Ovos

CG – Cor de Gema

CHCM – Concentração de Hemoglobina Corpuscular Média

CM – Conversão por Massa de Ovo

CR – Consumo de Ração

DD – Densitometria Distal

DG – Diâmetro da Gema

DM – Densitometria Medial

DMT1 – Transportador de Metais Divalentes 1

DP – Densitometria Proximal

EOS – Eosinófilos

ESP – Espessura da Casca

FQ – Força de Quebra

HEM – Hemácias

HET – Heterófilos

HGB – Hemoglobina

HTC – Hematócrito

HU – Unidade Haugh

IG – Índice de Gema

IS – Índice de Seedor

LEU – Leucócitos

LIN – Linfócitos

MnCAA – Minerais Complexado a Aminoácidos

MO – Massa de Ovo

MON – Monócitos

PA – Peso do Albúmen

PEA – Percentual de Albúmen

PEC – Percentual de Casca

PEG – Percentual de Gema

PPT – Proteínas Plasmáticas Totais

PR – Produção de Ovos

STD – Erro Padrão da Média

TBT – Trombócitos Totais

UH – Unidade Haugh

VCM – Volume Corpuscular Médio

ZIP4 – Proteína transportadora de zinco

ZnCAA – Zinco complexado a aminoácidos

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação da absorção e transporte de íons zinco no enterócito.....	18
Figura 2. Representação molecular do zinco ligado a uma molécula orgânica.....	22
Figura 3. Representação do modelo broken-line para a resposta da produção e massa de ovo com base na suplementação de ZnCAA. O modelo é representado pela linha, e a resposta máxima de cada variável indicada pelo ponto vermelho.....	32
Figura 4. Representação do modelo Broken-Line para a resposta da altura do albúmen com base na suplementação de ZnCAA. O modelo é representado pela linha, e a resposta máxima indicada pelo ponto vermelho.....	33
Figura 5. Representação do modelo Broken-Line quadrático para resposta da densidade medial, representado pela linha, e o ponto de quebra é indicado pelo ponto vermelho. Representação da resposta quadrática para densidade proximal representada pela linha vermelha.	34
Figura 6. Representação do modelo Broken-Line para a resposta da hemoglobina, volume corpuscular médio e concentração de hemoglobina corpuscular média com base na suplementação de ZnCAA, representado pela linha, e a resposta máxima é indicada pelo ponto vermelho.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Zinco como mineral.....	15
2.1.1	Caracterização do zinco.....	15
2.1.2	Zinco e a agricultura.....	16
2.1.3	Importância do zinco para o organismo animal.....	16
2.1.4	Absorção do zinco inorgânico.....	17
2.2	Suplementação mineral na avicultura.....	19
2.2.1	Suplementação Inorgânica.....	19
2.2.2	Suplementação mineral orgânica.....	20
2.2.3	Absorção da forma complexada.....	22
2.3	Suplementação mineral de zinco para poedeiras.....	23
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Local, instalações e período experimental.....	25
3.2	Delineamento e dietas experimentais.....	25
3.3	Avaliação de desempenho.....	26
3.4	Qualidade dos ovos.....	27
3.5	Eutanásia, coleta das tíbias.....	28
3.6	Índice de Seedor e Densitometria óssea.....	29
3.7	Coleta de sangue e análises hematológicas.....	30
3.8	Análise estatística.....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1	Resultados.....	31
4.2	Discussão.....	36
4.2.1	Desempenho.....	36
4.2.2	Qualidade de ovo.....	38
4.2.3	Avaliação óssea.....	39
4.2.4	Avaliação sanguínea.....	41
5	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A nutrição caracteriza-se por sua importância na criação animal, em poedeiras a suplementação mineral, principalmente de cálcio, é imprescindível para que ocorra a deposição adequada da casca do ovo e óssea, porém outros minerais estão relacionados com esse processo como o zinco (Zn). O Zn é um micromineral necessário para poedeiras pois é componente de mais de 300 enzimas que estão envolvidas no metabolismo das células, imunológico e antioxidantes (Yan e Waldroup, 2006; Yi et al., 2007).

O Zn é um dos microelementos essenciais necessários para a funcionamento adequado do organismo animal, incluindo crescimento físico e desenvolvimento muscular (Liu et al., 2018). O zinco é um componente da metaloenzima anidrase carbônica necessária para a formação da casca do ovo (Rodriguez-Navarro et al., 2015; Supuran et al., 2018).

O Cobre (Cu), Manganês (Mn) e Zn são essenciais para a formação da casca e das membranas do ovo, esses minerais são cofatores de enzimas que interagem com minerais de calcita que aumentam a resistência e a espessura da casca do ovo melhorando a sua estrutura (Zhang et al., 2017; Nys et al., 2018; Qiu et al., 2020).

A maior parte dos aditivos minerais utilizados na produção pecuária são fabricados a partir de compostos inorgânicos como sulfatos, óxidos, fosfatos e carbonatos (Seyfori et al., 2019). Micro minerais têm sido amplamente utilizados na produção animal a partir de fontes inorgânicas devido ao seu custo inferior ao das fontes orgânicas (Nys et al., 2018).

Apesar da popularidade da suplementação mineral a partir de fontes inorgânicas há desvantagens relacionadas. Existem efeitos antagônicos entre os diferentes minerais o que pode acarretar facilmente na formação de complexos com outros ingredientes da dieta como fitato, tanino a nível intestinal resultando na diminuição de sua utilização (Swiatkiewicz e Koreleski, 2008).

Por isso é imprescindível na alimentação animal buscar ou desenvolver fontes alternativas, que entre em substituição a fontes convencionais, e que sejam mais bem aproveitadas pela ave. As fontes orgânicas de minerais são mais facilmente absorvidas do que as fontes inorgânicas, o que permitiria a adição de concentrações mais baixas à ração (Li et al., 2019).

Quelatos de aminoácidos de zinco como zinco metionina, lisina de zinco e treoninato de zinco podem melhorar a disponibilidade e a absorção, reduzindo o antagonismo em comparação com a forma inorgânica, que pode reagir com compostos não absorvíveis no trato

gastrointestinal (Hu et al., 2010; Zhao et al., 2010). Gheisari et al. (2011) relataram que os minerais orgânicos poderiam ser utilizados em menor concentração na dieta do que os minerais inorgânicos, sem causar impacto negativo no desempenho da produção.

Os minerais ligados a moléculas orgânicas têm como característica principal reduzir os efeitos quelantes no intestino, diminuir a interação de íons metálicos, aumentar a estabilidade mineral em valores baixos de pH, e em decorrência da maior absorção geram menos poluição (Wedekind et al., 1992; Cao et al., 2000).

Portanto, objetivou-se estimar a necessidade de zinco na forma de metal-aminoácidos para galinhas poedeiras comerciais durante a fase de produção, de 55 às 71 semanas de idade, sob a hipótese de que o consumo ótimo suplementar de zinco na forma de metal-aminoácido pode ser determinado a partir da avaliação de desempenho, qualidade de ovo, hemograma e condições ósseas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Zinco como mineral

2.1.1 Caracterização do zinco

O zinco é um elemento químico com o símbolo "Zn" e número atômico 30. Ele está localizado no grupo 12 da tabela periódica. O zinco é um metal de transição, caracterizado por sua cor cinza-azulada. O ponto de fusão desse mineral é de aproximadamente 419,5 °C, e seu ponto de ebulição é de cerca de 907 °C (Mewes, 2021). O Zn é um dos elementos de transição mais abundantes na crosta terrestre e é relatado como um oligoelemento essencial para todos os organismos vivos (Roohani et al., 2013; Jarosz et al., 2017; Lee, 2018).

Quando aquecido a temperaturas superiores a 110°C, torna-se facilmente maleável e é considerado como um metal moderadamente reativo a elementos como o oxigênio e outros metais (Wuana e Okieimen, 2011). O Zn ocorre naturalmente na forma de esfalerita (ZnS) e possui cinco isótopos estáveis (^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn e ^{70}Zn) na natureza, dos quais ^{64}Zn é o principal isótopo em termos de abundância natural (Audi et al., 2017).

O zinco é normalmente encontrado em minérios de sulfeto, frequentemente associado a outros metais como chumbo e cobre. A extração e o refino do zinco e seus minérios normalmente envolvem múltiplas etapas. O primeiro passo geralmente é a concentração do minério, por meio de flotação em espuma, feito para concentrar o zinco. O minério concentrado é então torrado ao ar para converter o sulfeto de zinco em óxido de zinco (ZnO) (We, 2015).

O zinco é um mineral amplamente utilizado há muito tempo, no entanto, inicialmente, seu uso não ocorria em sua forma purificada. O latão, uma liga de cobre e zinco, foi utilizado muito antes do zinco ser isolado em sua forma metálica. A produção de latão começou provavelmente na Ásia Menor por volta do primeiro milênio a.C., e foi amplamente utilizada pelos romanos para cunhagem e metalurgia decorativa. Porém, o zinco, em sua forma metálica (pura), só foi isolado mais tarde devido à sua volatilidade em altas temperaturas, o que dificultava sua extração direta dos minérios (Craddock, 1987).

2.1.2 Zinco e a agricultura

Além de sua utilização na metalurgia o zinco é um mineral que apresenta diversas funções para os organismos vivos, sendo essencial para seu funcionamento. A primeira evidência do impacto do zinco na produção agrícola surgiu em 1869, quando foi relatado que esse elemento era essencial para o crescimento do *Aspergillus niger*, um fungo responsável pelo mofo negro em produtos como uvas, cebolas e amendoins (Raulin, 1905). Mais tarde, Mazé (1914) observou que o milho cultivado por meio da hidroponia necessitava de zinco para seu crescimento e desenvolvimento.

Posteriormente, sua importância na alimentação animal foi reconhecida. A deficiência de zinco na nutrição animal foi identificada pela primeira vez na década de 1950, quando se observou que a suplementação desse mineral poderia curar a paraqueratose em suínos (Tucker e Salmon, 1955). Mais tarde, em 1958, foi relatado que a deficiência de zinco resultava em crescimento deficiente, anormalidades nas pernas, má plumagem e paraqueratose em pintos (Nielsen, 2012).

2.1.3 Importância do zinco para o organismo animal

O zinco é um componente essencial de mais de 300 enzimas, desempenhando diversas funções, incluindo o metabolismo da glicose, a síntese e o metabolismo de proteínas, o metabolismo de ácidos nucleicos, a manutenção da integridade do tecido epitelial, os processos de divisão e reparação celular, além do transporte e utilização das vitaminas A e E (Yan e Waldroup, 2006; Younas et al., 2023).

Além disso, o Zn é o segundo oligoelemento mais abundante no organismo, ficando atrás apenas do ferro (Fe) e sendo significativamente mais abundante que o cobre (Solomons, 1988). Diversas proteínas, enzimas e fatores de transcrição estão associados ao zinco e dependem desse mineral para desempenhar suas funções (Negi et al., 2023).

O Zn é essencial para o funcionamento apropriado do organismo, desempenhando um papel crucial no crescimento adequado animal (Case & Carlson, 2002). Esse mineral está associado a funções prioritárias, como a respiração celular, o consumo de oxigênio pelas células, a expressão de DNA e RNA, a preservação da integridade da membrana celular, captura de radicais livres e a defesa contra a peroxidação lipídica (Kanakari & Dendrinou-Samara, 2023).

A carboxipeptidase é uma metaloenzima que contém zinco e a sua atividade pode ser desativada pela remoção desse mineral (Coleman e Vallee, 1960). Da mesma forma, a síntese de RNA é dependente de íons Zn^{2+} para atividade catalítica das RNA polimerases (RNA nucleotídeo transferases) (Cousins, 1998).

Sinais de deficiência de zinco em galinhas alimentadas com 15 ppm de Zn tornaram-se mais pronunciados quando o acesso a fontes desse mineral no ambiente, proveniente das gaiolas, foi removido. Entre os sinais relatados, observaram crescimento reduzido, encurtamento e espessamento dos ossos longos, desenvolvimento inadequado das penas, respiração rápida e dificultada (O'Dell et al., 1958)

A deficiência de zinco na dieta está associada a diversas alterações clínicas e bioquímicas e, em aves, pode levar à redução do apetite e ao aumento da mortalidade no plantel (Ensminger et al., 1990). Além disso, pintinhos com deficiência de zinco podem apresentar aumento na frequência respiratória (Dell et al., 1957).

A deficiência crônica de zinco em frangos de corte leva a alterações taxonômicas e à diminuição da diversidade da microbiota intestinal, impactando a utilização de zinco da dieta e possivelmente na saúde do hospedeiro (Reed et al., 2015). Além disso, a deficiência de zinco está associada a lesões cutâneas, crescimento reduzido, problemas ósseos e articulares, plumagem deficiente, falha reprodutiva, comprometimento do sistema imunológico e maior suscetibilidade a infecções (Salim et al., 2008).

2.1.4 Absorção do zinco inorgânico

A relação entre a deficiência de zinco e seus impactos fisiológicos enfatiza a importância de conhecer os mecanismos de absorção intestinal desse mineral, fundamentais para garantir sua disponibilidade e atender às necessidades do organismo.

De acordo com Cousins (1996) a absorção de Zn é limitada ao intestino delgado em espécies monogástricas, com maior capacidade de absorção no duodeno. O processo de

absorção dos íons de zinco é mediado pela proteína transportadora ZIP4, presente na membrana apical, que o transporta para dentro da célula (Figura 1). Vale destacar que a quantidade de ZIP4 na membrana apical é regulada positivamente quando há maior demanda de Zn pelo organismo e reduzida quando os níveis de Zn são adequados (Mao et al., 2007).

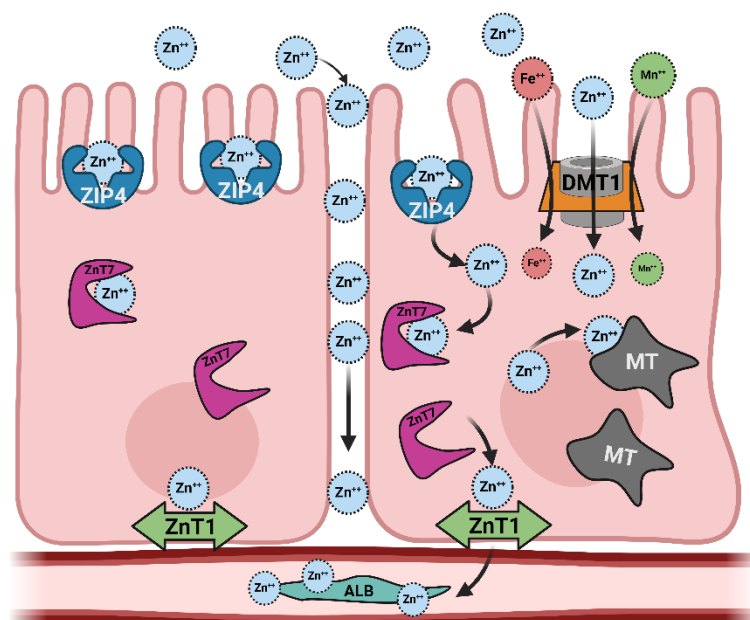


Figura 1. Representação da absorção e transporte de íons zinco no enterócito. Adaptado de Goff (2018); Byrne e Murphy (2022)

Além disso, outros transportadores da família ZIP, como ZIP11 e ZIP14, também podem contribuir, embora em menor grau, para a mobilização de Zn^{2+} através da membrana apical (Cousins, 2010). Outra proteína envolvida na absorção do zinco é o Transportador de metais divalentes (DMT1), entretanto há competição pelo sítio de ligação com outros oligoelementos como o cobre, ferro (López-Alonso, 2020).

Sabe-se que a absorção via paracelular de Zn ocorre em meio a altas concentrações de desse mineral no intestino (Condomina et al., 2002). Apesar das diferentes formas de absorção a ZIP4 é considerado o principal transportador intestinal de importação de Zn para dentro do enterócito (Yuzbasiyan-Gurkan et al., 2006; Spears, 2013).

Dentro da célula as proteínas chaperona 2, 4, 5, 6 e principalmente 7 (ZnT7), move o Zn^{2+} para a membrana basolateral, onde o transportador intestinal de Zn1 (ZnT1) move o Zn^{2+} para o fluido intersticial antes de ser ligado à albumina (Cousins, 2010). Por fim, os íons zinco no sangue ligam-se à albumina e à transferrina para serem transportados ao fígado e outros tecidos, onde serão utilizados ou armazenados (Evans e Winter, 1975).

Quando há um excesso de Zn^{2+} , os enterócitos sintetizam a metalotioneína, uma proteína que se liga a átomos de Zn, Cu e Cd. A metalotioneína atua como um tampão para reter o excesso de Zn e evitar íons Zn^{2+} livres dentro do citosol (Goff, 2018).

2.2 Suplementação mineral na avicultura

2.2.1 Suplementação Inorgânica

As fontes minerais utilizadas nas rações para poedeiras são, em sua maioria, compostos inorgânicos de origem geológica ou industrial. Estes compostos são frequentemente incorporados na formulação das rações por meio de premixes minerais, com o intuito de suprir as necessidades minerais dos animais (Araujo, 2008).

Nas dietas comerciais de aves, a suplementação mineral, em sua grande parte é feita a partir das formas inorgânicas (sais de sulfato ou óxido), entretanto esses minerais podem sofrer altas taxas de perda devido ao antagonismo. Nesse contexto, minerais inorgânicos são fornecidos entre duas e dez vezes mais do que as quantidades recomendadas para dietas animais (Inal et al., 2001).

Convencionalmente, os minerais traço inorgânicos zinco, cromo e selênio são utilizados na dieta de frangos, pois são econômicos e facilmente disponíveis, mas são relativamente inferiores aos minerais traço orgânicos devido à baixa biodisponibilidade (Virden et al., 2004).

Microminerais inorgânicos, como óxidos, carbonatos, cloretos e sulfatos são tradicionalmente usados em formulações de ração comercial para atender às necessidades minerais de animais de produção e prevenir eventuais deficiências minerais. Embora a suplementação inorgânica seja mais barata, pesquisas indicam que o uso de minerais orgânicos proporciona um retorno econômico maior em comparação aos inorgânicos (Byrne, 2022).

No entanto, a biodisponibilidade dos minerais inorgânicos é limitada, e são necessárias doses elevadas para satisfazer as necessidades dos animais, o que muitas vezes resulta em um desequilíbrio de nutrientes e possíveis problemas de toxicidade (Thompson et al., 1991). A alta inclusão leva então ao desperdício mineral e à poluição ambiental devido à excreção excessiva pelas aves (Leeson, 2003).

Durante a passagem pelo trato gastrointestinal, íons de microminerais inorgânicos dissolvidos podem potencialmente se ligar a outros componentes da dieta, formando complexos insolúveis que são excretados, reduzindo assim sua disponibilidade (Cao et al., 2002;

Dobrzański et al., 2008). Os sulfatos geralmente têm maior valores relativos de biodisponibilidade do que óxidos (Pesti e Bakalli, 1996).

Outra desvantagem dos minerais inorgânicos é quanto as impurezas. O sulfato de cobre e o óxido de zinco geralmente são derivadas da indústria siderúrgica que contém grande quantidade de contaminantes, como flúor e cádmio, que acabam sendo incorporados nos produtos (Lopes et al., 2018).

2.2.2 Suplementação mineral orgânica

Apesar da maior popularidade dos minerais inorgânicos, existem uma alternativa a esse tipo de suplementação que são os minerais complexados a moléculas orgânicas.

O químico alemão Alfred Werner, ao estudar íons metálicos ligados a moléculas orgânicas, verificou que essas estruturas, denominadas por ele como complexos, apresentavam alta estabilidade e mantinham-se inteiras após passarem por uma série de reações químicas. Posteriormente, o termo foi alterado para quelato. De forma geral, essas moléculas apresentam um ligante que se prende a um mineral, deixando-o disponível para participar de outras reações. Posteriormente essas moléculas foram introduzidas na alimentação animal sob o termo generalista "minerais orgânicos", sem evidenciar as diversas fontes desse tipo de suplementação mineral (Ashemed, 1993).

A Tabela 1 apresenta a definição dos minerais orgânicos conforme a Association of American Feed Control Officials (AAFCO), categorizados de acordo com tipo de molécula orgânica associada ao sal metálico.

Tabela 1. Definição dos minerais ligados a moléculas orgânicas.

Molécula	Definição	Exemplo
Metal complexado a aminoácido	É o produto resultante da complexação de um sal metálico solúvel (como potássio ou manganês) com um ou mais aminoácidos.	Complexo de aminoácido de potássio, complexo de aminoácido de cobre, complexo de aminoácido de zinco
Metal complexado a polissacarídeo	É o produto resultante da complexação de um sal solúvel com uma solução de polissacarídeo.	Complexo de polissacarídeo de cobre, complexo de polissacarídeo de zinco, complexo de polissacarídeo de ferro
Metal Proteinato	O produto resultante do quelação de um sal solúvel com aminoácidos e/ou parcialmente proteína hidrolisada	Proteinato de Magnésio, Proteinato de Ferro, Proteinato de Cobalto
Metal aminoácido específico	É o produto resultante da complexação de um sal metálico solúvel com um aminoácido específico.	Complexo de cobre-lisina, complexo de zinco-lisina, complexo de manganês metionina e complexo de zinco metionina.
Metal aminoácido quelatado	Resultante da reação de um íon metálico (sal metálico) solúvel com aminoácidos, em uma proporção molar de um mol de metal para um a três (preferencialmente dois) moles de aminoácido, formando ligações covalentes coordenadas. Os ligantes quelantes são uma mistura de aminoácidos hidrolisados com um peso molecular médio de aproximadamente 150 ou aminoácidos específicos. O peso molecular resultante do quelato não deve exceder 800.	Quelato de Aminoácido de Zinco, Quelato de Aminoácido de Cobalto, Quelato de Aminoácido de Cobre.

Fonte: AAFO, 2024.

Complexos metálicos são compostos por um átomo metálico central conectado a ligantes, sendo que pelo menos um desses ligantes contém um átomo com um par de elétrons livres. Compostos como proteínas, carboidratos e lipídios, que contêm oxigênio, enxofre ou nitrogênio, podem atuar como ligantes, estabelecendo uma ligação coordenada por meio da doação de elétrons para o átomo metálico central. Um quelato metálico é caracterizado pela doação de pares de elétrons de dois ou mais átomos do ligante ao metal, em vez de apenas um, formando ligações coordenadas (Figura 2) (Swinkelset al., 1994).

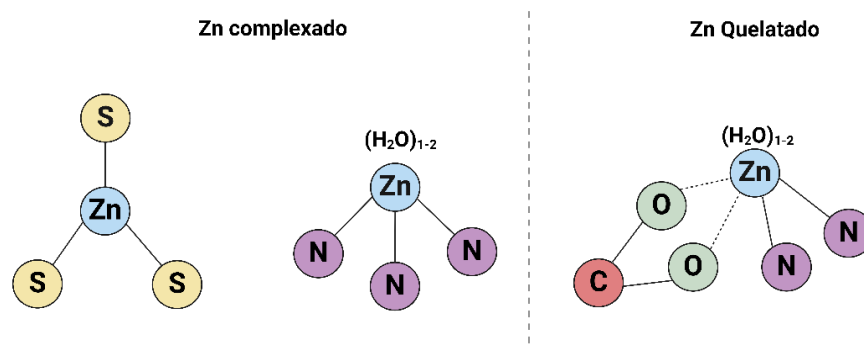


Figura 2. Representação molecular do zinco ligado a uma molécula orgânica. Adaptado de Swinkels et al. (1994)

A complexação de minerais com ligantes orgânicos pode favorecer a absorção passiva no intestino, ao diminuir a interação entre o mineral e outros quelantes potenciais presentes no lúmen intestinal. Isso impede a formação de complexos insolúveis com substâncias como hidróxidos, carbonatos, fosfatos, oxalatos e fitatos, que poderiam tornar o mineral indisponível para absorção (Greene, 1995; Rompala e Halley, 1995).

2.2.3 Absorção da forma complexada

Quando apenas um aminoácido quelata em um átomo de metal, ele pode não formar um quelato de ligação suficientemente forte para resistir à dissociação no intestino e o resultado é um lado aberto onde espécies eletrofílicas competitivas podem atacar. Por isso, quelatos de aminoácidos de dois e três anéis são mais estáveis. O complexo de aminoácidos, podem se dissociar quimicamente no estômago e intestino, liberando o íon metálico tornando-o suscetível a reações no trato gastrointestinal (Ashmead, 1991).

A quelatação reduz o tamanho e melhora a estabilidade do complexo, permitindo que ele permaneça inalterado durante o trajeto pelo trato gastrointestinal e seja absorvido intacto, sem a degradação dos seus aminoácidos (Bao et al., 2007). Devido ao melhor aproveitamento a sua suplementação pode ser feita em quantidade reduzida. De acordo com Rostagno et al. (2024), os minerais complexados possuem requerimentos significativamente menores que os minerais não complexados, com uma redução média de 56% na suplementação.

Segundo Ashmead (1991), o mineral ligado a um aminoácido é absorvido de forma intacta, formando uma ligação entre um dos aminoácidos e a porção gama-glutamil da glutathione presente no enterócito, o que permite o transporte ativo da molécula para o citoplasma. No interior do enterócito, a alteração no pH promove a quebra da ligação entre o quelato e a molécula que o transporta. Em seguida, a molécula migra pela célula da mucosa até

a membrana basal, sendo liberada no plasma como uma molécula intacta, sem a necessidade de transportadores intracelulares.

Após a absorção, o complexo metal-aminoácido pode ser direcionado para processos metabólicos ou transportado intacto para os tecidos. A separação entre o metal e o aminoácido ocorre, em geral, apenas quando os tecidos a demandam, sendo realizada nos locais específicos de utilização (Ashmead, 1993; Malik et al., 2017).

Além disso, alguns estudos relataram que minerais traço na forma de metal aminoácido pode ser absorvidos pela via de transporte de aminoácidos ou peptídeos, que pode ser a principal razão para melhora da disponibilidade e utilização, em comparação com as vias gerais de absorção de minerais inorgânicos (Glover e Wood, 2008; Muszyński et al., 2017; Muszyński et al., 2018).

Minerais organicamente complexados disponibilizam vias alternativas de absorção, levando assim a uma redução na excreção de minerais para o meio ambiente (Scott et al., 2016; Bao et al., 2007). Diante do exposto, essa forma de suplementação apresenta diversas vantagens em relação a suplementação inorgânica.

2.3 Suplementação mineral de zinco para poedeiras

Medeiro-Ventura et al. (2023) encontraram que galinhas poedeiras alimentadas com minerais complexados a aminoácidos apresentaram menor consumo de ração, aumento no percentual de postura, melhora na conversão alimentar, aumento no peso da gema e melhoria na resistência da casca dos ovos, em comparação com galinhas alimentadas com minerais inorgânicos.

De acordo com Zhang et al. (2017) aves suplementadas com de zinco na forma de metal aminoácido apresentaram uma melhora na espessura, peso e proporção da casca. De forma semelhante Idowu et al. (2011) constatou que aves suplementadas com proteinato de zinco resultaram em maior produção de ovos, redução na conversão por dúzia além de aumento no percentual de cálcio e fósforo na casca do ovo.

Santos et al. (2024) também relataram melhora na produção, peso, qualidade da casca e massa de ovos, além de uma melhora na conversão alimentar de poedeiras alimentadas com minerais complexados a aminoácidos, em comparação com minerais inorgânicos.

Em seu estudo Abd El-hack et al. (2017) constatou aumento número de ovos, peso e massa de ovos no grupo alimentado com dieta suplementada com zinco metionina em

comparação com a suplementação inorgânica. Além disso da qualidade dos ovos foram afetadas como uma resposta à suplementação alimentar de zinco metionina. Além de proporcionar modificações séricas a partir da redução nos níveis de triglicerídeos e colesterol LDL.

Li et al. (2019) em seu estudo comparativo entre a suplementação de sulfato de zinco e zinco metionina detectou um aumento na altura das vilos, a área de vilos e a profundidade da cripta, entretanto não houve modificação nos aspectos produtivos.

Silva et al. (2023) destaca a partir de sua revisão sistemática e metanálise que há evidências na literatura de que a substituição total do Zn inorgânico por Zn orgânico melhora a produção de ovos, espessura e resistência da casca de ovos.

Apesar da presença de diversos estudos utilizando minerais orgânicos, nenhum deles determina com precisão a ingestão ideal, além disso, as recomendações encontradas na literatura são variáveis. De acordo com Rostagno et al. (2024) a suplementação sugerida de zinco orgânico para poedeiras na fase de produção é 30,85 mg/kg de ração. Por outro lado, Alirezae et al. (2024) recomenda a utilização de 80 mg/kg. Niknia et al. (2022) recomenda 30 mg/kg na forma de metal-aminoácido.

Sabe-se que o peso do ovo está estritamente relacionado à idade da galinha (Tûmová e Gous, 2012). Os ovos aumentam de peso ao longo do período de produção, enquanto a espessura e a resistência da casca geralmente diminuem (Duman et al., 2016). O aumento no peso do ovo é um dos principais aspectos de produção que precisa ser monitorado, visto que, são mais propensos a rupturas de casca durante a coleta, transporte e embalagem do que os ovos menores (Dunn, 2013). Além disso é importante salientar que as perdas econômicas causadas por ovos rachados e partidos na fase final do período de postura representaram 12-20% das perdas totais (Travel et al., 2011).

Outro problema relacionado a galinhas poedeiras velhas é a perda de qualidade óssea. De acordo com Yamada et al. (2021) a mobilização óssea em aves mais velhas é maior resultando em redução no volume óssea tanto medular como cortical podendo levar a osteoporose. Portanto a suplementação mineral orgânica para poedeiras velhas pode ser uma ferramenta para atenuar os efeitos indesejáveis atrelados do envelhecimento.

Niknia et al. (2022) relata melhora na massa de ovos diminuição na conversão, melhoras no aspecto ósseo e aumento da resistência óssea em aves mais velhas (80 semanas) alimentadas com zinco orgânico. Min et al. (2018) relata que a suplementação dietética de quelatado de

zinco diminuiu significativamente a taxa de quebra de ovos, aumentou o peso, espessura, resistência, porcentagem da casca, densidade da casca do ovo em aves com 72 semanas, além de que melhorou as concentrações de Zn e Ca de cascas de ovos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, instalações e período experimental

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), sob o protocolo nº 6000110221. A pesquisa foi conduzida no galpão de postura do Laboratório de Pesquisa com Aves do Departamento de Zootecnia da UFRPE, no município de Recife-PE.

As aves utilizadas no experimento estavam recebendo as dietas teste com os diferentes níveis de suplementação de zinco (0, 5, 15, 25, 40, 60 e 80 mg/kg), e com minerais na forma complexada a aminoácidos (Zn, Cu, Mn, Fe e Se), antes do período experimental, desde as 35 semanas de idade.

No estudo foram utilizadas 336 poedeiras da linhagem Dekalb White, com 55 semanas de idade, e o período experimental ocorreu até a semana 71. Os animais distribuídos foram distribuídos em 42 gaiolas experimentais equipadas com comedouros tipo calha e bebedouros do tipo nipple. A água foi fornecida *ad libitum*, enquanto a ração foi oferecida diariamente conforme o descrito no manual da linhagem. O programa de luz adotado consistiu em 16 horas de iluminação diária, sendo 12h de luz natural e 4h de luz artificial.

3.2 Delineamento e dietas experimentais

As aves foram distribuídas em delineamento inteiramente casualizado, com 7 tratamentos, 6 repetições por tratamento e 8 aves por unidade experimental. Os tratamentos consistiram em dietas contendo diferentes níveis de suplementação de Zinco complexado á aminoácidos (0, 5, 15, 25, 40, 60 e 80 mg/kg) e os minerais utilizados na formulação das dietas foram os complexados com aminoácidos (CAA) (Tabela 2). A fonte mineral utilizada apresentava os aminoácidos essenciais em sua composição: lisina, metionina, treonina, valina, serina, prolina, tirosina, leucina, isoleucina, fenilalanina, ácido glutâmico, glicina, alanina, arginina, ácido aspártico e histidina, ligados ao íon de zinco na proporção de 1:1.

Tabela 2. Níveis de suplementação dos metais aminoácidos nas dietas experimentais de acordo com os níveis de suplementação de ZnCAA

Tratamentos	MCAA						
	0	5	15	25	40	60	80
Minerais¹				mg kg ⁻¹			
Zinco	0,00	5,0	15,00	25,00	40,00	60,00	80,00
Manganês	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
Cobre	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
Ferro	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Selênio	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Iodo	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

¹Minerais: Availa Mn, 80 g/kg de produto; Availa Zn, 120 g/kg de produto; Availa Cu, 100 g/kg de produto; Availa Fe, 100 g/kg de produto; Availa Se, 1000 mg/kg de produto; Iodato de cálcio: 628 g/kg.

As rações experimentais foram elaboradas de forma isoenergética e isonutritivas, com base nas recomendações nutricionais descritas por Rostagno et al. (2017). A composição da dieta está descrita na Tabela 3.

Tabela 3. Composição basal calculada e analisada das dietas experimentais.

Ingredientes	%	Composição química e energética	
Milho	61,65	EM, kcal/kg	2.800
Farelo de Soja	23,38	Proteína bruta, %	22,60
Óleo de soja	1,80	Matéria seca, %	88,17
Calcário calcítico	9,96	Matéria mineral, %	13,11
Fosfato bicálcico	1,51	Sódio, %	0,20
Bicarbonato de sódio	0,15	Cloro, %	0,20
Sal comum	0,30	Potássio, %	0,60
DL – Metionina (99,5%)	0,39	Fósforo, %	0,37
L – Lisina (98,5%)	0,17	Cálcio, %	4,20
L – Treonina (98,5%)	0,13		
Cloreto de colina (60%)	0,20		
Premix mineral ¹	0,20		
Premix vitamínico ²	0,15		
Total	100		

¹Minerais: Availa Mn, 80 g/kg de produto; Availa Zn, 120 g/kg de produto; Availa Cu, 100 g/kg de produto; Availa Fe, 100 g/kg de produto; Availa Se, 1000 mg/kg de produto; Iodato de cálcio: 628 g/kg;

²Composição do Premix vitamínico: vitamina A (12.000.000,00 UI/kg), vitamina D3 (3.500.000,00 UI/kg), vitamina E (50.000,00 UI/kg), vitamina K3 (3,00 g/kg), vitamina B1 (2,50 g/kg), vitamina B2 (6,50 g/kg), vitamina B6 (5,00 g/kg), vitamina B12 (30.000,00 mcg/kg), niacina (40,00 g/kg), ácido fólico (1,00 g/kg), ácido pantotênico (10,00 g/kg), biotina (0,20 g/kg).

3.3 Avaliação de desempenho

Para avaliação de desempenho os ovos foram coletados diariamente pela manhã em horário fixo (10h), contabilizados e pesados por unidade experimental. A ração destinada ao fornecimento diário foi previamente pesada e acondicionada em sacos plásticos individuais, devidamente identificados por parcela experimental. Em caso de mortalidade de aves durante

o período experimental, o consumo médio da parcela foi ajustado para calcular o consumo médio real da unidade experimental. Os dados coletados foram utilizados para avaliar o peso do ovo (g), a produção de ovos (%), a massa de ovos (g/ave/dia), o consumo de ração (g/ave/dia) e a conversão alimentar (kg de ração/dúzia de ovos e kg de ração/kg de ovos).

A produção de ovo (PR) foi calculada a partir da razão entre o número de ovos produzidos e o número de aves alojadas.

$$\text{Produção} = \frac{\text{N. Ovos produzidos}}{\text{N. Aves alojadas}} \times 100$$

A massa de ovos (MO) foi obtida multiplicando-se o peso médio dos ovos pela produção de ovos e o resultado dividido por 100.

$$\text{Massa} = \frac{\text{Peso medio ovo} \times \text{Produção}}{100}$$

O consumo de ração (CR) foi calculado considerando a quantidade de ração fornecida no período de sete dias, subtraindo as sobras e dividindo-se pelo número de aves alojadas por unidade experimental.

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Fornecido} - \text{Sobras}}{\text{N. Aves}}$$

Para o cálculo da conversão por massa de ovo (CM) considerou-se o consumo médio da ave dividido pela massa de ovos obtida no mesmo período. Já a conversão dúzia de ovos (CDZ) foi obtida dividindo-se o consumo médio da ração da parcela pela quantidade de dúzias de ovos produzida.

$$\text{Conversão por massa} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Massa. Ovo}}$$

$$\text{Conversão por dúzia} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Quant. Dúzias}}$$

3.4 Qualidade dos ovos

As avaliações da qualidade dos ovos foram realizadas a cada 28 dias (período), correspondente às semanas 59, 63, 67 e 71 de idade. Para cada unidade experimental, foram selecionados 3 ovos com peso médio da parcela, permitindo uma variação máxima de 5%. As análises foram realizadas ao longo de 3 dias consecutivos, totalizando 378 ovos por período de avaliação.

Os ovos identificados foram encaminhados ao Laboratório de Carne da UFRPE, onde foram analisados utilizando um Testador de ovo digital (Modelo DET6500, Nabel.Co.,Ltd®, Quioto, Japão) para determinar as seguintes variáveis: peso do ovo (g), cor da gema, altura do albúmen (mm), altura e diâmetro da gema (mm), força de quebra da casca (Kgf). Além de determinar a Unidade Haugh (UH) e índice de gema (IG) de acordo com as fórmulas abaixo.

$$HU=100 \times \log (\text{Altura do albúmen} - 1,7 \times \text{Peso do ovo}^{0,37+7,6})$$

$$IG= \frac{\text{Altura gema}}{\text{Diâmetro gema}}$$

As gemas foram pesadas individualmente em balança semi-analítica de precisão 0,01g (Modelo L3102iH, Bel Engineering®, Milão, Itália), em seguida as cascas dos ovos foram lavadas para retirada de todo albúmen e secas ao ar por um período de 48 horas. Após a secagem as cascas foram pesadas individualmente e verificada a espessura (mm) em três pontos distintos (apical, equatorial e basal) e feito uma média das aferições utilizando um micrômetro digital (Modelo MT547-361S, Mitutoyo®, SP, BR).

O peso do albúmen (PA) foi obtido pela diferença entre o peso do ovo e o peso da casca e gema.

$$PA = \text{Peso ovo} - \text{Peso gema} - \text{Peso casca}$$

O cálculo da porcentagem de albúmen (PEA), gema (PEG) e casca (PEC) foi obtido de acordo com o peso desses componentes em relação ao peso do ovo multiplicado por 100.

$$PEA = \frac{\text{Peso Albúmen}}{\text{Peso Ovo}} \times 100$$

$$PEG = \frac{\text{Peso Gema}}{\text{Peso Ovo}} \times 100$$

$$PEC = \frac{\text{Peso Casca}}{\text{Peso Ovo}} \times 100$$

3.5 Eutanásia, coleta das tíbias

Ao final do experimento, uma ave por unidade experimental, que representava o peso médio da parcela, foi selecionada e eutanasiada por deslocamento cervical. As tíbias direita e esquerda foram coletadas, acondicionadas em sacos, identificados de acordo com o tratamento e, em seguida, congeladas em freezer a -20°C .

3.6 Índice de Seedor e densitometria óssea

Posteriormente todas as tíbias foram descongeladas em temperatura ambiente para possibilitar a remoção de todo tecido muscular que envolvem a tíbia, a dissecação foi realizada de forma minuciosa para não causar danos à estrutura óssea. A tíbia esquerda foi utilizada para avaliar o peso, comprimento e índice de Seedor (IS) e com a tíbia direita foi realizada a avaliação de densitometria óssea.

As tíbias esquerdas descarnadas foram pesadas em uma balança de precisão de 0,01 g (Modelo L3102iH, Bel Engineering®, Milão, Itália). Em seguida, foram colocadas sobre uma superfície livre de ondulações com o auxílio de um paquímetro digital (Modelo Absolute Digital AOS Mitutoyo, SP, BR – precisão de 0,01 mm), e foi determinado o comprimento. Por fim, as tíbias foram queimadas em mufla para obtenção da matéria mineral (550°C; 4h) (AOAC, 2000). Após a obtenção das medidas e do peso das cinzas dos ossos, foi calculado o Índice de Seedor, que é obtido pela razão entre o peso das cinzas do osso (mg) e seu comprimento (mm) (Seedor et al., 1993).

A análise de densitometria óssea foi realizada na tíbia direita por meio de tomografia computadorizada utilizando um tomógrafo digital (Scanner HiSpeed FXI CT 06824, General Electric, Fairfield, USA). As tíbias foram dispostas lado a lado em uma superfície plana para a obtenção das imagens tomográficas. Foram adquiridas imagens transversais a partir de cortes seccionais com 2 mm de espessura e intervalo de reconstrução de 1 mm.

Posteriormente, as imagens foram analisadas utilizando o software Horos (versão 1,1,7, Horos, Purview, Annapolis, MD 21401, EUA) para estimar os valores de radiodensidade em três partes distintas de cada tíbia: região proximal, medial e distal. Em cada região, o osso foi dividido em 4 quadrantes e foi obtido um valor médio. Os valores obtidos foram expressos em unidades Hounsfield (HU) e foram convertidos para mg/cm³ de hidroxiapatita de cálcio utilizando a equação descrita por Park et al. (2015).

$$\text{BMD} = \frac{200\text{HU}_t}{(\text{HU}_b - \text{HU}_w)}$$

Onde: HU_t representa a radiodensidade do osso mensurado; HU_b, a radiodensidade do phantom ósseo contendo 200 mg de hidroxiapatita de cálcio/cm³; e HU_w, a radiodensidade do phantom de água, sem hidroxiapatita de cálcio.

3.7 Coleta de sangue e análises hematológicas

No final do período experimental (71 semanas), foram coletados 0,5 ml de sangue de uma ave por parcela, a partir da veia ulnar, para a realização das análises hematológicas. As amostras sanguíneas foram acondicionadas em tubos contendo EDTA e armazenadas em recipiente refrigerado. Ao final da coleta, o material foi encaminhado para laboratório.

A contagem das células foi realizada em câmara Neubauer. Foi feito a avaliação de eritrograma a partir da quantificação dos seguintes componentes: hemácias (HEM), hemoglobina (HGB), hematócrito (HTC), volume corpuscular médio (VCM), concentração da hemoglobina corpuscular média (CHCM), proteínas plasmáticas totais (PPT). Além disso, foi avaliado o leucograma, incluindo leucócitos (LEU), heterofilos (HET), linfócitos (LIN), monócitos (MON), eosinófilos (EOS) e trombócitos totais (TBT).

3.8 Análise estatística

Os dados foram submetidos a homogeneidade das variâncias (Cramér-von Mises) e normalidade dos resíduos (Shapiro Wilk) para verificar as suposições da análise de variância. Posteriormente, efetuou-se a análise de regressão linear pelo procedimento PROC NLIN, PROC NLMIXED no SAS (2009) com 5% de probabilidade ($P < 0,05$). Para estimar a ingestão ideal de zinco.

O modelo utilizado foi o Broken line, proposto por Robbins et al. (2006), descreve a relação entre a deposição e a ingestão de zinco por meio de três parâmetros: r_{max} , que representa a resposta máxima da variável estudada; U , que representa a inclinação até o ponto de quebra; e R , que representa o nível de máxima resposta. A equação que descreve o modelo é a seguinte:

$$Y = R_{max} + U (R-x)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados

Na avaliação de desempenho não foi verificado efeito significativo ($P>0,05$) para peso do ovo, consumo, conversão por massa de ovo e por dúzia. Por outro lado, foi verificado efeito significativo para produção ($P=0,01$) e massa de ovo ($P=0,001$) (Tabela 4). Para produção de ovos, a estimativa de ZnCAA foi de 6,3 mg/ave/dia com a resposta máxima de 94,7% de postura. Para massa de ovo, a estimativa de ZnCAA correspondeu a 2,7 mg/ave/dia, obtendo-se uma produção máxima de 62,9 g/dia (Figura 3).

Tabela 4. Desempenho produtivo das poedeiras comerciais de 55 a 71 semanas de idade submetidas as dietas contendo zinco complexado a aminoácido.

ZnCAA¹ (mg ave dia)	PO² (g)	PR³ (%)	MO⁴ (g/dia)	CR⁵ (g)	CM⁶ (kg/kg)	CDZ⁷ (kg/dúzia)
0	65,708	94,978	62,398	105,707	1,705	1,340
5	66,012	95,744	62,374	106,733	1,700	1,336
15	65,452	93,05	62,284	104,518	1,718	1,353
25	65,752	96,396	63,388	105,467	1,700	1,342
40	66,232	93,158	62,469	105,058	1,747	1,368
60	65,264	94,405	63,156	105,773	1,767	1,376
80	66,393	95,628	62,813	105,060	1,694	1,342
Média	65,835	94,856	62,760	105,474	1,72	1,351
P-Valor	0,672	0,010	0,001	0,675	0,251	0,438
STD⁸	0,178	0,370	0,219	0,330	0,010	0,005
Rmax⁹	-	94,708	62,967	-	-	-
U¹⁰	-	- 0,42	- 0,168	-	-	-
R¹¹	-	6,36	2,715	-	-	-

¹Níveis de zinco complexado a aminoácidos; ²Peso do ovo; ³Produção de ovo; ⁴Massa de ovo; ⁵Consumo de ração; ⁶Conversão por massa de ovo; ⁷Conversão por dúzia de ovos; ⁸Erro padrão da média; ⁹Resposta máxima; ¹⁰Inclinação da reta; ¹¹Valor da estimativa de ZnCAA para resposta máxima.

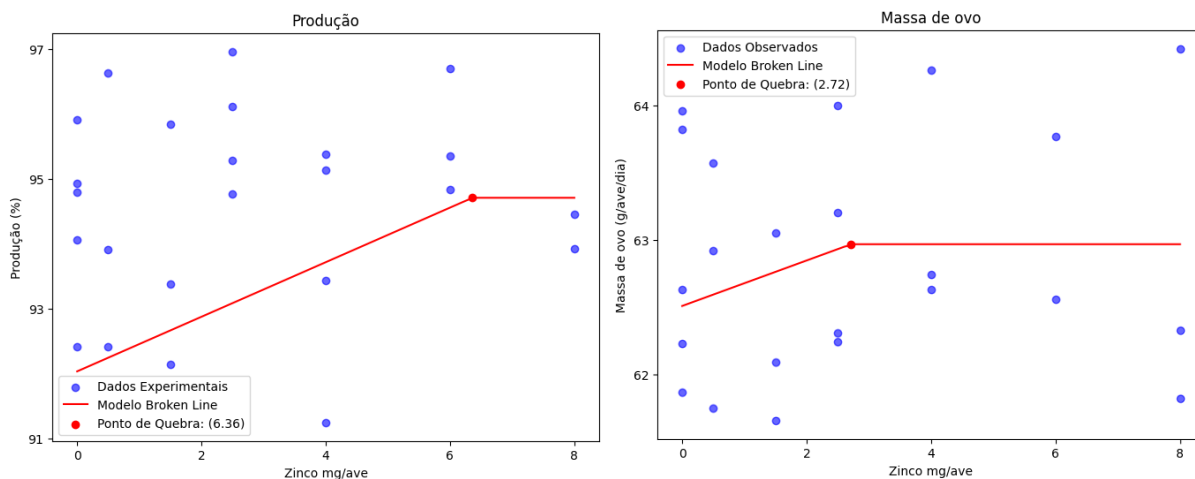


Figura 3. Representação do modelo broken-line para a resposta da produção e massa de ovo com base na suplementação de ZnCAA. O modelo é representado pela linha, e a resposta máxima de cada variável indicada pelo ponto vermelho.

A avaliação da qualidade do ovo revelou efeito significativo na altura do albúmen (AA) ($P=0,053$) (Tabela 5). Para AA, a estimativa foi de 4,8 mg/ave/dia de ZnCAA, com base na resposta máxima de 8,6 mm observada (figura 4). Não houve efeito para as demais variáveis de qualidade (Tabela 6)

Tabela 5. Peso e avaliações métricas dos componentes dos ovos de poedeiras comerciais de 55 a 71 semanas alimentadas com dietas contendo de zinco complexado a aminoácidos

ZnCAA ¹ (mg ave dia)	ESP ² (mm)	PO ³ (g)	AA ⁴ (mm)	FQ ⁵ (Kgf)	AG ⁶ (mm)	DG ⁷ (mm)	PA ⁸ (g)
0	0,387	65,223	8,518	4,050	17,673	43,881	41,797
5	0,402	65,841	8,764	4,077	17,777	44,072	41,614
15	0,386	65,189	8,561	4,087	17,747	43,785	41,419
25	0,387	65,402	8,594	4,160	17,653	43,609	41,937
40	0,390	65,172	8,676	4,077	17,826	43,818	41,972
60	0,390	66,042	8,524	4,092	17,774	43,637	42,258
80	0,390	65,404	8,378	4,089	17,681	43,708	41,683
Média	0,390	65,468	8,572	4,09	17,734	43,787	41,821
P-Valor	0,806	0,651	0,053	0,759	0,580	0,748	0,719
STD⁹	0,182	0,214	0,031	0,028	0,028	0,179	0,179
Rmax¹⁰	-	-	8,6	-	-	-	-
U¹¹	-	-	0,063	-	-	-	-
R¹²	-	-	4,805	-	-	-	-

¹Níveis de zinco complexado a aminoácidos; ²Espessura; ³Peso do ovo; ⁴Altura do albúmen; ⁵Força de quebra; ⁶Altura de gema; ⁷Diâmetro de gema; ⁸Peso do albúmen. ⁹STD: erro padrão da média; ¹⁰Resposta máxima; ¹¹Inclinação da reta; ¹²Valor da estimativa de ZnCAA para resposta máxima.

Tabela 6. Qualidade do ovo e percentual de componentes de ovos de poedeiras comerciais de 55 a 71 semanas alimentadas com dietas contendo de zinco complexado a aminoácidos

ZnCAA¹ (mg ave dia)	CG²	HU³	IG⁴	PEG⁵ (%)	PEC⁶ (%)	PEA⁷ (%)
0	6,088	90,171	0,406	26,670	9,268	64,069
5	6,121	91,453	0,408	27,238	9,596	63,155
15	6,140	91,094	0,410	26,383	9,167	64,267
25	6,141	91,251	0,406	26,612	9,299	64,092
40	6,106	91,574	0,412	26,316	9,331	64,355
60	6,127	90,600	0,410	26,758	9,316	63,941
80	6,056	90,520	0,406	26,952	9,302	63,740
Média	6,100	91,027	0,408	26,704	9,325	63,945
P-Valor	0,277	0,230	0,241	0,397	0,275	0,521
STD⁸	0,014	0,171	0,0009	0,139	0,036	0,149

¹Níveis de zinco complexado a aminoácidos; ²Cor de gema; ³Unidade haugh; ⁴Índice de gema; ⁵Percentual de gema; ⁶Percentual de casca; ⁷Percentual de albúmen. ⁸Erro padrão da média.

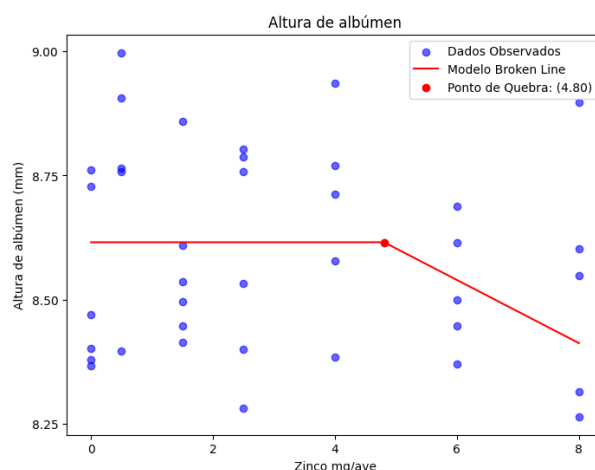


Figura 4. Representação do modelo Broken-Line para a resposta da altura do albúmen com base na suplementação de ZnCAA. O modelo é representado pela linha, e a resposta máxima indicada pelo ponto vermelho.

Para avaliação de qualidade óssea, não foi verificado efeito significativo para densitometria distal e índice de Seedor ($P > 0.05$), entretanto houve efeito significativo para densitometria proximal ($P = 0.002$) e medial ($P = 0.026$) (Tabela 7). A equação que descreve o efeito do zinco na densitometria proximal $PD = -2,4X^2 + 46,7X + 1016,4$, o coeficiente linear (46,7) indica que ocorre um crescimento à medida que aumenta a suplementação (tendência inicial de crescimento), Entretanto o coeficiente quadrático (-2,4) sugere que após um certo

ponto o a suplementação de Zinco atenua a taxa de crescimento da DP e, eventualmente pode fazer com que diminua (Figura 5).

Quanto a densitometria medial a estimativa foi de 1,85 mg de zinco ave/dia e a resposta correspondente foi 1094,9 mg/cm³ de hidroxiapatita de cálcio na tíbia (Figura 5).

Tabela 7. Avaliação de densitometria óssea de poedeiras comerciais com 71 semanas suplementadas com Zinco complexado a aminoácido

ZnCAA¹ (mg ave dia)	DP² (mg/cm³)	DM³ (mg/cm³)	DD⁴ (mg/cm³)	IS⁵ (mg/mm)
0	1058,7	1087,2	1076,6	25,4
5	997,2	1087,3	1146,9	26,6
15	1091,3	1108,4	1145,3	23,9
25	1106,6	1091,4	1086,3	25,1
40	1145,6	1137,1	1137,2	25,1
60	1276,8	1180,9	1150,6	24,8
80	1220,2	1320,5	1084,6	25,3
Média	1124,9	1139,4	1118,8	25,2
P-Valor	0,002	0,026	0,756	0,798
STD⁶	24,2	27,8	21,8	0,488
Rmax⁷	-	1094,6	-	-
U⁸	-	5,145	-	-
R⁹	-	1,854	-	-

¹Níveis de zinco complexado a aminoácidos; ²Densitometria proximal; ³Densitometria medial;

⁴Densitometria distal, ⁵Índice de Seedor; ⁶Erro padrão da média; ⁷Resposta máxima; ⁸Inclinação da reta;

⁹Valor da estimativa de ZnCAA para resposta máxima.

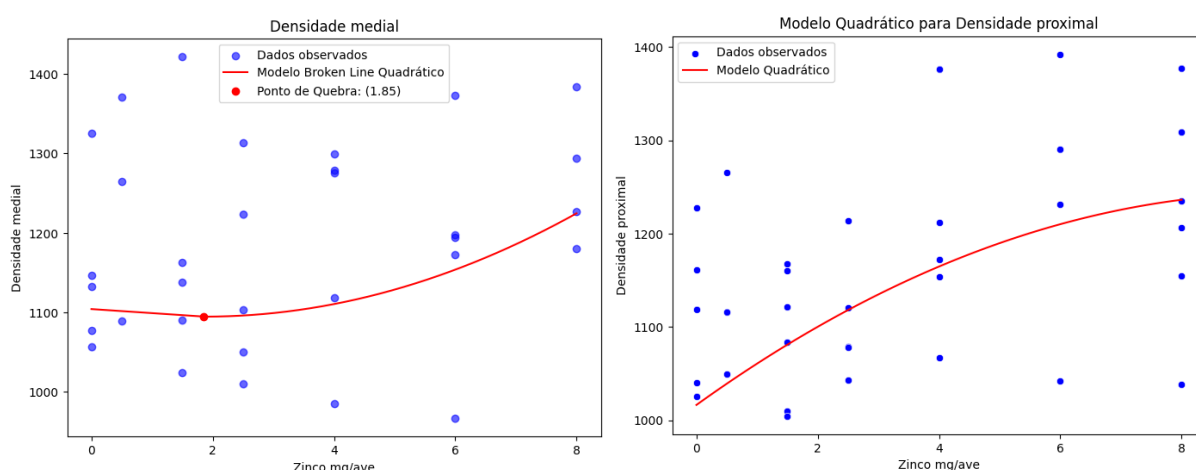


Figura 5. Representação do modelo Broken-Line quadrático para resposta da densidade medial, representado pela linha, e o ponto de quebra é indicado pelo ponto vermelho. Representação da resposta quadrática para densidade proximal representada pela linha vermelha.

Para as variáveis de leucograma não foi observado efeito significativo (Tabela 8).

Tabela 8. Leucograma de poedeiras comerciais com idades entre 55 e 71 semanas, suplementadas com zinco complexado a aminoácido

ZnCAA¹ (mg ave dia)	LEU² (%)	HET³ (%)	LIF⁴ (%)	MON⁵ (%)	BAS⁶ (%)	TBT⁷ (%)
0	22633	4234	14390	1216,0	437,6	19083
5	15740	2556	9222	1017,1	461,5	14666
15	26850	3058	20952	1319,5	1154,0	19500
25	17640	2986	14919	915,8	571,0	16583
40	26083	3228	20273	1166,8	245,0	15916
60	15616	2035	11310	518,8	445,3	17166
80	16600	2712	12822	640,3	342,3	15166
Média	19997	2986	14692	948,5	505,5	16804
P-Valor	0,172	0,586	0,256	0,149	0,285	0,767
STD⁸	1158,4	293,3	1053,3	118,4	80,4	794,2

¹Níveis de zinco complexado a aminoácidos; ²Leucócitos; ³Heterofilos; ⁴Linfócitos; ⁵Monócitos; ⁶Basófilos; ⁷Trombócitos totais ⁸STD: erro padrão da média.

Para hemograma foi observado efeito significativo para HGB (P=0,010), CHCM (P=0,059) e VCM (P= 0,046) (Tabela 9). A resposta máxima para HGB foi de 8,17 g/dL, correspondente à suplementação de 3,40 mg de ZnCAA ave/dia. Para o VCM, a suplementação encontrada foi de 2,9 mg/ave/dia, com a resposta correspondente de 119,9 fL. Para CHCM a suplementação foi de 2,3 mg/ave/dia e resposta correspondente 26,3 (%) (Figura 6).

Tabela 9. Hemograma de poedeiras comerciais com idades entre 55 e 71 semanas, suplementadas com zinco complexado a aminoácido

ZnCAA¹ (mg ave dia)	HEM² (μL)	HGB³ (g/dl)	HTC⁴ (%)	VCM⁵ (fL)	CHCM⁶ (%)	PPT⁷ (g/dL)
0	2,5	8,0	30,5	121,6	26,5	8,8
5	2,3	7,6	29,0	141,2	26,3	7,4
15	2,2	7,8	30,0	135,7	26,3	7,9
25	2,6	8,2	31,7	114,5	26,2	7,2
40	2,6	8,2	30,3	116,2	26,6	8,0
60	2,4	8,1	30,0	122,4	27,2	7,8
80	2,4	8,1	30,6	120,4	27,3	7,3
Média	2,4	8,0	30,3	124,5	26,6	7,7
P-Valor	0,561	0,010	0,805	0,046	0,059	0,518
STD⁸	0,037	0,048	0,288	2,344	4,514	0,194
Rmax⁹	-	8,17	-	119,9	26,3	-
U¹⁰	-	-0,103	-	4,553	-0,187	-
R¹¹	-	3,419	-	2,936	2,338	-

¹Níveis de Zn complexado a aminoácidos; ²Hemácias; ³Hemoglobina; ⁴Hematócitos; ⁵Volume corpuscular médio; ⁶Concentração de hemoglobina corpuscular média; ⁷Proteínas plasmáticas totais; ⁸Erro padrão da média; ⁹Resposta máxima; ¹⁰Inclinação da reta; ¹¹Valor da estimativa de ZnCAA para resposta máxima.

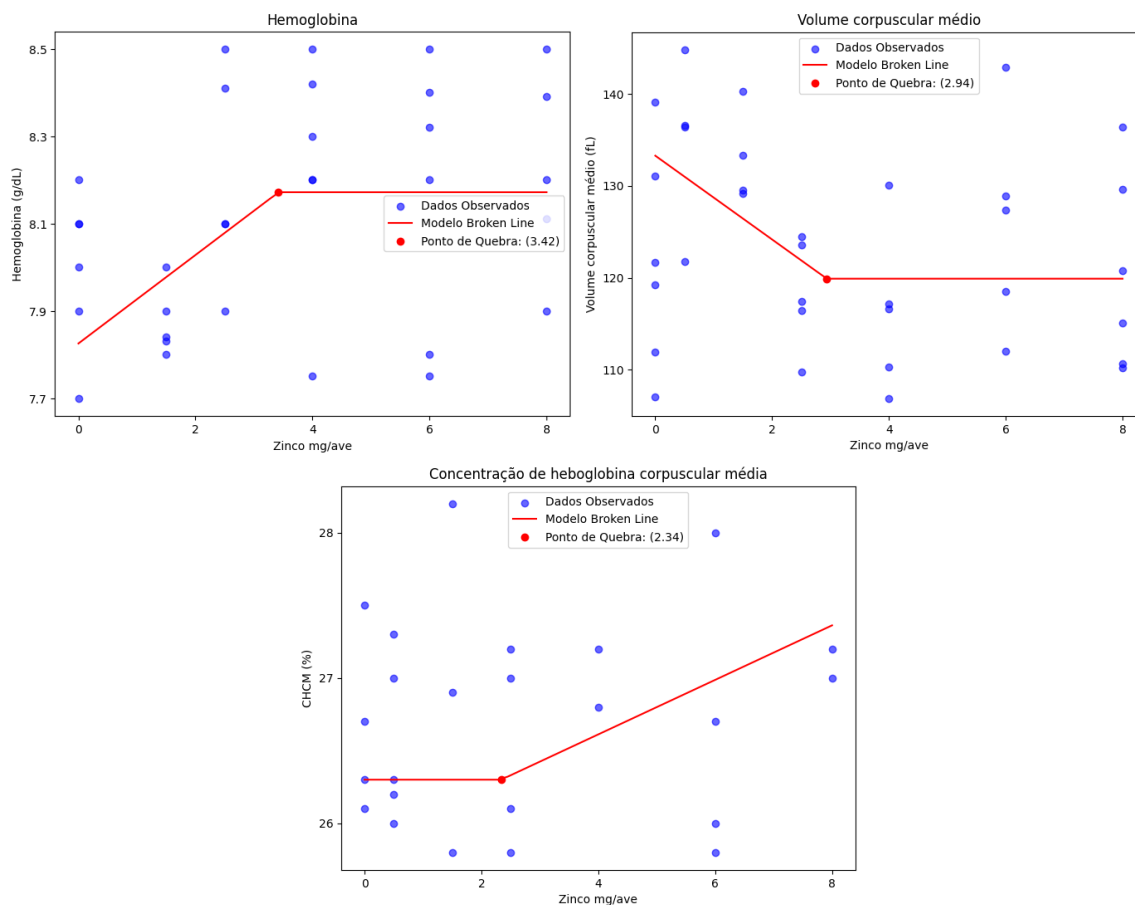


Figura 6. Representação do modelo Broken-Line para a resposta da hemoglobina, volume corpuscular médio e concentração de hemoglobina corpuscular média com base na suplementação de ZnCAA, representado pela linha, e a resposta máxima é indicada pelo ponto vermelho.

4.2 Discussão

4.2.1 Desempenho

O Zn é um micromineral que está envolvido em diversas funções do metabolismo animal e pode estar relacionado com melhoria dos índices produtivos. O Zn parece atenuar indiretamente o estresse oxidativo ao estimular a produção de substâncias com propriedades antioxidantes (Powell, 2000)

Estudos relataram que a suplementação de zinco mesmo na forma inorgânica, pode aumentar a produção total de ovos em galinhas poedeiras, um efeito atribuído às suas propriedades antiestresse e antioxidantes (Gerzilov et al., 2015). O zinco é um componente essencial da enzima superóxido dismutase, desempenhando um papel crucial na desintoxicação de radicais livres superóxido. Sua função envolve a proteção celular contra o estresse oxidativo,

catalisando a conversão do ânion superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Yu et al., 2020).

A superóxido dismutase de cobre-zinco é o principal eliminador de radicais superóxido no citoplasma, núcleo, lisossomos e no espaço intermembrana das mitocôndrias (Elchuri et al., 2005; Fukai et al., 2011). Assim, os efeitos na produção observados no presente estudo podem ser explicados pela ação do zinco no sistema antioxidante, uma vez que a redução do estresse oxidativo favorece a manutenção adequada da produtividade de ovos.

Em seu estudo, Bahakaim et al. (2014) observaram que a suplementação com zinco metionina melhorou a produção e massa de ovo ao incluir, respectivamente, 50 e 100 mg/kg na dieta de galinhas poedeiras com 24 semanas de idade. Além disso, dietas sem a suplementação de zinco resultaram em uma redução na massa dos ovos, destacando a importância do mineral para esse índice produtivo. El-Hack et al. (2018) observaram um aumento no número, peso e massa dos ovos em grupos de aves com 35 semanas de idade alimentadas com suplementação de 100 mg/kg de zinco metionina.

Esses resultados estão em concordância com os achados do presente estudo no que diz respeito à melhora produtiva. No entanto, diferem em relação ao nível de suplementação, que foi menor em nosso trabalho, sendo de 25,7 e 60 mg/kg para massa de ovo e produção, respectivamente. Segundo Han et al. (2019), galinhas mais velhas (60 semanas) apresentam menor número de transportadores de zinco em comparação às mais jovens. Além disso, a suplementação de 90 mg/kg resulta em uma melhoria na expressão gênica do transportador duodenal de Zn, o que culmina em um melhor aproveitamento desse mineral quando suplementadas com uma fonte orgânica. Dessa forma, a suplementação encontrada pode ser justificada por esse fator. Além disso, diferentes fontes da molécula podem apresentar variação na biodisponibilidade

O efeito benéfico da suplementação de zinco na forma complexada está associado ao seu melhor aproveitamento pelo organismo. Alguns estudos indicam que o zinco complexado a uma molécula orgânica apresenta maior biodisponibilidade em comparação com fontes inorgânicas, como os óxidos. Além disso a biodisponibilidade pode variar dentre os tipos de moléculas orgânicas (Wedekind et al., 1992; Tronina et al., 2007; Gheisari et al., 2010).

Estudos utilizando diferentes fonte suplementares de zinco (óxido, nano partículas, proteinado e zinco metionina) observaram que a produção, peso e a massa dos ovos em galinhas

poedeiras não foram significativamente afetados independentemente do tipo de suplementação (Tsai et al., 2016; Cufadar et al., 2020).

Os diferentes resultados encontrados na literatura podem ser elucidados por fatores como, idade da ave, condições experimentais e principalmente pelo tipo de molécula orgânica em que o mineral está associado.

Os estudos apresentam diversos resultados sobre o efeito do zinco complexado a fontes orgânicas, com benefícios mais evidentes em suplementações mais altas. Nesta pesquisa, as recomendações foram de 60 e 25,7 mg/kg, valores inferiores aos estudos citados. Além disso, as recomendações foram, respectivamente, 94,5% maior e 16,69% menor do que o sugerido por Rostagno et al. (2024).

4.2.2 Qualidade de ovo

Na presente pesquisa, observou-se um decréscimo na AA a partir da ingestão de 4,8 mg/ave/dia de ZnCAA pelas aves. Yu et al. (2020), em seu estudo com poedeiras, avaliaram a suplementação de zinco na forma complexada (35 e 70 mg/kg) e não observaram efeitos sobre a unidade Haugh, espessura e peso da casca, bem como a altura do albúmen, resultado que diverge do presente estudo

Em contrapartida Zhao et al. (2016) ao avaliarem diferentes suplementações de nanopartículas de zinco (10, 25, 50, 100 e 200 mg/kg) observaram redução na altura do albúmen e UH a partir da suplementação de 10 mg/kg. Esse resultado corrobora com a atual pesquisa, exceto pelo fato de que a redução só ocorreu a partir da suplementação de 45,7 mg/kg, e a UH não foi alterada, apesar do decréscimo na altura do albúmen. Embora tenha sido observado efeito significativo, o mecanismo responsável não foi elucidado.

Minerais ligados a moléculas orgânicas, como quelatos e metal-aminoácidos, implementados nas dietas, podem melhorar a qualidade da casca do ovo sem comprometer a qualidade interna do ovo (Carvalho et al., 2016; Saleh et al., 2020). Stefanello et al. (2014) em seu estudo as dietas suplementadas com minerais proteínatos (Mn, Zn e Cu) proporcionaram menor perda de ovos, maior espessura e maior resistência da casca em relação as dietas com minerais inorgânicos, embora não tenha ocorrido alteração na altura de albúmen.

No estudo realizado com suplementação mineral complexada a aminoácidos, contendo zinco, manganês e cobre nas concentrações de 40, 40 e 7 mg/kg de ração, respectivamente, observou-se maior altura do albúmen e maior espessura da casca do ovo (Santos et al., 2024). A melhora observada na qualidade do albúmen e da casca do ovo nesses estudos pode estar

relacionada ao efeito dos diferentes minerais suplementados, que, ao atuarem de forma sinérgica, promovem benefícios significativos para essas características.

O zinco desempenha um papel importante na formação do ovo. O íon carbonato de cálcio, provém do dióxido de carbono no sangue, que é convertido em íons bicarbonato pela anidrase carbônica, uma enzima dependente de zinco (Gautron et al., 2021; López et al., 2021). Apesar desse mineral estar envolvido na formação do ovo, a qualidade da casca não foi alterada no presente estudo.

Melhorias na qualidade da casca do ovo proporcionadas pelo uso de zinco dietético seriam particularmente relevantes para aves mais velhas. De acordo com Benavides-Reyes et al. (2021) com o envelhecimento da ave ocorre modificações negativas a estrutura da casca do ovo, redução na espessura e diminuição da resistência podendo causar maiores perdas.

A suplementação dietética de zinco nessa fase poderia refletir na melhora e qualidade da casca. Zhang et al. (2017) em seu estudo observou maior atividade da anidrase carbônica no plasma sanguíneo de poedeiras com 65 semanas suplementadas com ZnCAA. Além disso, houve aumento do peso, na proporção e espessura da casca, porém sem alteração na resistência.

4.2.3 Avaliação óssea

A deficiência de zinco em ratos reduziu a densidade mineral óssea e as propriedades mecânicas do osso. Além disso, levou à diminuição da osteocalcina sérica (marcador de formação óssea) e ao aumento da desoxipiridinolina urinária (marcador de reabsorção óssea). Houve também redução do cálcio sérico e aumento do hormônio da paratireoide, sugerindo que a deficiência de zinco prejudica a homeostase do cálcio, resultando em fragilidade óssea (Suzuki et al., 2015)

O hormônio da paratireoide é regulado positivamente em resposta a baixos níveis de cálcio no sangue, resultantes da alta demanda de cálcio para a calcificação da casca do ovo Singh et al. (1986). O paratormônio estimula a reabsorção óssea osteoclástica no osso medular, aumentando os níveis de cálcio no sangue (Miller, 1978).

Estes achados sugerem que o zinco pode estar envolvido no mecanismo de homeostase do cálcio, influenciando a qualidade e a deposição óssea. Além disso, outros fatores também podem desempenhar um papel nesse processo. Em ratos ovariectomizados, a suplementação de zinco aumentou os níveis de estrogênio em comparação com grupos deficientes em zinco, sugerindo que o zinco pode ajudar a manter níveis normais de estrogênio. Além disso, a

suplementação de Zn contribuiu para um aumento de cálcio e fosforo no plasma sanguíneo (Sunar et al., 2009).

A presença de receptor de estrogênio foi demonstrada em osteoblastos *in vitro* (Komm et al., 1988; Westerlind et al., 1995). Nesse contexto, o osso medular apresenta remodelação em resposta aos níveis de estrogênio circulantes, sugerindo que os osteoblastos nessa região são altamente sensíveis ao estrogênio (Hiyama et al., 2009; Squire et al., 2017).

Prabakar et al. (2021) em seu trabalho com matrizes de frango de corte e verificou que a suplementação com 40 e 60 mg/kg de zinco na forma de zinco metionina proporcionou um aumento nos níveis de estrogênio sérico. Da mesma forma, Yang et al. (2022), ao avaliar matrizes velhas de frangos de corte (56 semanas) verificaram um aumento nos níveis de estrogênio com a suplementação de 50 mg/kg de zinco metionina, efeito equivalente ao suplementar com 100 mg/kg de sulfato de zinco.

Amen e Al-Daraji (2011) observaram que a suplementação de zinco em dietas para matrizes com 54 e 66 semanas resultou em um aumento nos níveis de estrogênio. Além disso, com o avanço da idade, houve uma redução nos níveis séricos desse hormônio, que passaram de 470 pg/mL às 54 semanas para 208 pg/mL às 66 semanas, indicando um declínio na produção de estrogênio com o envelhecimento das aves.

Hansen et al. (2003) observaram uma redução nos níveis de estrogênio em poedeiras de 70 semanas, em comparação ao pico de produção. Além disso, houve uma diminuição nos receptores de estrogênio nos tecidos, como o rim e duodeno.

Diante do exposto, o avanço da idade leva à redução da produção de estrogênio pelos tecidos das aves, o que pode afetar a remodelação óssea e comprometer a qualidade estrutural dos ossos. Por outro lado, o zinco contribui para a elevação dos níveis de estrogênio circulante. Além disso o zinco está associado a aumento nos níveis de cálcio sérico, esse estímulo inibe a presença do paratormônio reduzindo a reabsorção óssea. De forma geral o zinco contribui em diversos mecanismos, atuando direta e indiretamente na melhora da saúde óssea.

Niknia et al. (2022) determinou que a suplementação de 30mg/kg de zinco na forma de metal aminoácido, para galinhas velhas com 80 semanas, contribuiu para melhora na espessura cortical do osso em comparação com a suplementação na forma inorgânica. Olgum et al. (2017) encontrou que a suplementação de 50mg/kg de glicinato de zinco mostrou efeito semelhante a

suplementação de 75mg/kg óxido de zinco em relação a melhora da resistência óssea. Indicando que a suplementação orgânica pode ser feita em uma dosagem menor que a inorgânica.

Por outro lado, Cufadar et al. (2020) não observou efeito do zinco, seja na forma complexada ou inorgânica, nas variáveis ósseas de poedeiras com 44 semanas de idade. Esse achado sugere que o efeito do zinco na qualidade óssea não seja tão evidente em aves mais jovens. Abedini et al. (2018) encontrou que a suplementação de nano óxido de zinco culminou em uma melhora na força de quebra na tíbia de aves com 64 semanas de idade ao suplementar com 80 mg/kg.

Além disso, Idowu et al. (2011) encontrou que a suplementação de proteinado de zinco aumentou o percentual de cálcio na tíbia. Min et al. (2019) encontrou melhora na resistência da tíbia as 66, 70 e 72 semanas ao suplementar 40 mg/kg de MHA de zinco em comparação com a suplementação de 80mg/kg de óxido de zinco. Além disso melhorou o percentual de Ca e o conteúdo zinco na tíbia.

A literatura sugere uma melhora na qualidade óssea de aves velhas suplementadas com zinco, corroborando com os resultados obtidos na presente pesquisa. O aumento na ingestão de zinco contribuiu para um crescimento na densitometria óssea das aves estudadas. Para densitometria medial, a melhora ocorreu a partir de 1,8 mg/ave/dia, sugerindo que a suplementação a partir desse nível contribuiria positivamente para qualidade óssea.

Nesta pesquisa a suplementação recomendada foi de 17,1 mg/kg de ração de ZnCAA, um valor inferior aos mencionados anteriormente, que demonstraram efeito sobre a variável óssea. Além disso, essa recomendação é 44,57% menor do que a sugerida proposta por Rostagno et al. (2024).

4.2.4 Avaliação sanguínea

Na literatura, os valores de hemoglobina em poedeiras variam entre 9 g/dL e 17 g/dL, sendo ligeiramente maiores aos observados no presente estudo. O volume corpuscular médio está dentro da faixa reportada na literatura (110–130 fL) (El-Hack et al., 2019; Hong et al., 2021; Osadcha et al., 2023).

O mecanismo de zinco na eritropoiese é multifatorial, atuando como um catalisador na enzima ácido alfa-aminolevulínico desidratase, envolvida no metabolismo do ferro e a síntese da heme. Além disso, o zinco compõe a estrutura da proteína de dedo de zinco Gfi-1B e do fator de transcrição GATA-1, que regulam o crescimento de células eritróides. O zinco também está

envolvido em outras vias de sinalização, como as do hormônio do crescimento e do fator de crescimento semelhante à insulina tipo 1 (IGF-1), estimulando a transcrição da eritropoietina e favorecendo a eritropoiese. O zinco também é considerado um fator importante para a diferenciação eritroide (Hanson et al., 2023).

Na presente pesquisa, a suplementação de ZnCAA contribuiu para um aumento linear na quantidade de hemoglobina até a ingestão de 3,4 mg/ave/dia. Após esse ponto, houve um platô. Essa resposta observada pode ser atribuída ao mecanismo de atuação do zinco na síntese de heme, o que contribui para o aumento da quantidade de hemoglobina encontrada.

De acordo com Khairunnisa et al. (2021) a suplementação de 60 mg de zinco inorgânico aumentou a concentração de hemoglobina no sangue de frangos, além disso não foi evidenciado efeito nas demais variáveis hematológicas. Da mesma forma Abdel-Monem et al. (2021) encontrou aumento nos níveis de hemoglobina no sangue de poedeiras a partir da suplementação de zinco 40mg/kg (óxido de zinco) entretanto não houve alteração no volume corpuscular e concentração de hemoglobina corpuscular média no grupo estudado.

Esses estudos corroboram com os resultados encontrados na presente pesquisa, embora tenham utilizado zinco inorgânico. Nesse contexto, a suplementação complexada foi empregada em uma quantidade menor, de até 32,3 mg/kg, para alcançar o efeito no aumento da hemoglobina.

Outro possível efeito do zinco está relacionado à sua ação antioxidante, que pode contribuir para o aumento da longevidade dos eritrócitos. Chen et al. (2018) relatam que estudos em ratos e peixes indicam que a suplementação de zinco pode estimular a formação de glóbulos vermelhos, especialmente em condições de anemia induzida. O zinco parece atuar em conjunto com a transferrina sérica para favorecer a eritropoiese.

Estudos indicam que camundongos deficientes em superóxido dismutase SOD1 apresentam redução na contagem de eritrócitos e hemoglobina, além de um aumento no tamanho dos eritrócitos. A deficiência de SOD eleva a presença de espécies reativas de oxigênio, resultando em maior peroxidação lipídica, maior susceptibilidade à oxidação da hemoglobina e redução da vida útil dos eritrócitos (Grzelak et al., 2009).

Com o envelhecimento dos eritrócitos ocorre a diminuição da área de superfície e perda de água e isso ocasiona redução na deformidade, diminuição na área de superfície e volume celular (Waugh et al., 1992). Ganzoni et al. (1971) observou que as células vermelhas de rato

passam por redução de volume e perda significativa do conteúdo de hemoglobina com o envelhecimento, além disso, a concentração de hemoglobina dentro da célula demonstrou um aumento.

O VCM tende a diminuir com o envelhecimento das células vermelhas do sangue, enquanto a concentração de hemoglobina pode aumentar, uma vez que a perda de água celular ocorre em maior proporção do que a perda de hemoglobina (Bosh et al., 1994). Monem et al. (2021) observou-se que o VCM era menor nos machos do que em fêmeas, resultando em uma maior quantidade de HGB e CHCM. Indicando que o tamanho da célula pode estar relacionado com essas variáveis.

Os estudos apresentados indicam que o aumento na longevidade dos eritrócitos pode levar à redução do seu tamanho (VCM) com o envelhecimento, enquanto a quantidade de hemoglobina na célula tende a aumentar (CHCM). Associando isso a hipótese de que o zinco poderia ter um efeito quanto a longevidade dos eritrócitos, a presente pesquisa observou uma redução no VCM com a suplementação de ZnCAA até a ingestão de 2,9 mg/ave/dia posteriormente a isso houve um platô. A CHCM manteve-se em platô até a suplementação de 2,3 mg/ave/dia de ZnCAA, e, posteriormente, com aumento na ingestão, ela tendeu crescer.

As recomendações para o hemograma foram: HGB = 37,3, VCM = 27,6 e CHCM = 22,1. Essas variáveis foram, respectivamente, 4,89% maior, 10,55 e 29,02% menor do que os valores sugeridos por Rostagno et al. (2024).

A Tabela 10 apresenta um resumo das estimativas de suplementação de zinco complexado a aminoácidos, com base nas variáveis significativas, considerando o consumo médio de 105g de ração em comparação com as suplementações de mineral orgânico e inorgânico sugeridas por Rostagno et al. (2024).

Tabela 10. Estimativa da suplementação de Zinco obtida com base nas variáveis analisadas no atual estudo e comparativo com o sugerido

Variável	Estimativa		Orgânico ¹	Inorgânico ²	Rostagno et al. (2024)
	(mg/ave/dia)	(mg/kg de ração)			
PR³	6,3	60	+94,5	-12,47	Orgânico 30,85 mg/kg
MO⁴	2,7	25,7	-16,69	-62,5	
AA⁵	4,8	45,7	+48,12	-33,33	Inorgânico 68,55 mg/kg
DM⁶	1,8	17,1	-44,57	-75,05	
HGB⁷	3,4	32,36	+4,89	-55,79	
VCM⁸	2,9	27,6	-10,55	-59,73	
CHCM⁹	2,3	21,9	-29,02	-68,05	

¹Comparativo com orgânico sugerido por Rostagno; ²Comparativo com inorgânico sugerido por Rostagno; ³Produção de ovo; ⁴Massa de ovo; ⁵Altura de Albúmen; ⁶Densitometria medial; ⁷Hemoglobina; ⁸Volume corpuscular médio; ⁹Concentração de hemoglobina corpuscular média. Valores precedidos por '+' indicam aumento, e por '-' indicam redução em relação a suplementação comparada

5 CONCLUSÃO

Recomenda-se a suplementação de 6,3 mg/ave/dia de ZnAAC dietético, o que equivale a 60 mg/kg de ração, a fim de garantir um desempenho produtivo satisfatório, homeostase hematológica e qualidade óssea para poedeiras comerciais leves de 55 a 71 semanas de idade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD EL-HACK, M. E. et al. Effect of dietary supplementation of organic zinc on laying performance, egg quality and some biochemical parameters of laying hens. **Journal of animal physiology and animal nutrition**, v. 102, n. 2, p. 542-549, 2018.

ABD EL-HACK, M. E. et al. Productive performance, egg quality, hematological parameters and serum chemistry of laying hens fed diets supplemented with certain fat-soluble vitamins, individually or combined, during summer season. **Animal Nutrition**, v. 5, n. 1, p. 49-55, 2019.

ABDEL-MONEM, N. et al. Impact of dietary zinc oxide nano-particles on antioxidant status, liver and kidney functions in Alexandria chickens. **Egyptian Poultry Science Journal**, v. 41, n. 3, p. 675-690, 2021.

ABEDINI, M. et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on performance, egg quality, tissue zinc content, bone parameters, and antioxidative status in laying hens. **Biological trace element research**, v. 184, p. 259-267, 2018.

AGUILAR-LÓPEZ, L. J. et al. Dependencia de la velocidad de reacción de la anhidrasa carbónica en los eritrocitos. **TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río**, v. 8, n. 15, p. 28-34, 2021.

ALIREZAEI SHAHRAKI, P. et al. Determining the optimal level and the effect of different zinc sources on performance, egg quality and the immune system of laying hens at the end of the production period. **Veterinary Medicine and Science**, v. 10, n. 5, p. e70035, 2024.

AMEN, M. HM; AL-DARAJI, H. J. Influence of dietary supplementation with zinc on sex hormones concentrations of broiler breeder chickens. **Pakistan Journal of Nutrition**, v. 10, n. 11, p. 1089-1093, 2011.

ARAÚJO, J. A. et al. Fontes de minerais para poedeiras. **Acta veterinária brasileira**, v. 2, n. 3, p. 53-60, 2008.

ASHMEAD, H. D. Comparative intestinal absorption and subsequent metabolism of metal amino acid chelates and inorganic metal salts. **The roles of amino acid chelates in animal nutrition**, v. 319, n. 2, p. 306-319, 1993.

ASSOCIATION OF AMERICAN FEED CONTROL OFFICIALS (AAFCO). **Official Feed Terms, Common or Usual Ingredient Names and Ingredient Definitions**. 2024. Disponível em: < <https://downloads.regulations.gov/FDA-2024-D-2977-0003/content.pdf> >. Acesso em: 01 jan. 2025

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. **Official Methods of Analysis**. 17. ed. Arlington: AOAC, 2000

AUDI, G. et al. Avaliação NUBASE2016 de propriedades nucleares. **Chinese Physics C**, v. 41, n. 3, p. 030001, 2017.

BAHAKAIM, A. et al. Effect of using different levels and sources of zinc in layer's diets on egg zinc enrichment. **Egyptian Poultry Science Journal**, v. 34, n. 1, p. 39-56, 2014.

BAO, Y. M. et al. Effect of organically complexed copper, iron, manganese, and zinc on broiler performance, mineral excretion, and accumulation in tissues. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 16, n. 3, p. 448-455, 2007.

BENAVIDES-REYES, C. et al. Research Note: Changes in eggshell quality and microstructure related to hen age during a production cycle. **Poultry Science**, v. 100, n. 9, p. 101287, 2021.

BOSCH, F. H. et al. Determinants of red blood cell deformability in relation to cell age. **European journal of haematology**, v. 52, n. 1, p. 35-41, 1994.

BYRNE, L.; MURPHY, R. A. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: A review. **Animals**, v. 12, n. 15, p. 1981, 2022.

CAO, J. et al. Chemical characteristics and relative bioavailability of supplemental organic zinc sources for poultry and ruminants. **Journal of animal science**, v. 78, n. 8, p. 2039-2054, 2000.

CAO, J. et al. Relative bioavailability of organic zinc sources based on tissue zinc and metallothionein in chicks fed conventional dietary zinc concentrations. **Animal Feed Science and Technology**, v. 101, n. 1-4, p. 161-170, 2002.

CARVALHO, L. S. S. et al. Qualidade de ovos e desempenho produtivo de poedeiras em segundo ciclo de postura alimentadas com microminerais quelatados a aminoácidos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 17, n. 4, p. 491-500, 2016.

CASE, C. L.; CARLSON, M. S. Effect of feeding organic and inorganic sources of additional zinc on growth performance and zinc balance in nursery pigs. **Journal of animal science**, v. 80, n. 7, p. 1917-1924, 2002.

CHEN, N. N. et al. Safety evaluation of zinc methionine in laying hens: Effects on laying performance, clinical blood parameters, organ development, and histopathology. **Poultry Science**, v. 97, n. 4, p. 1120-1126, 2018.

CHEN, Y. H.; FENG, H.L.; JENG, S. S. Zinc supplementation stimulates red blood cell formation in rats. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 9, p. 2824, 2018.

COLEMAN, Joseph E.; VALLEE, Bert L. Metalloproteinase-inhibitor complexes. **Biochemistry**, v. 3, n. 12, p. 1874-1879, 1964.

CONDOMINA, J. et al. Kinetics of zinc transport in vitro in rat small intestine and colon: interaction with copper. **European Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 16, n. 4-5, p. 289-295, 2002.

COUSINS, R. J.; FILER, L. J.; ZIEGLER, E. E. Zinc. **Present knowledge in nutrition**. 7. ed. Washington, D.C.: International Life Science Institute Nutrition Foundation. v. 7, n 2, p. 293, 1996

COUSINS, R. J. Gastrointestinal factors influencing zinc absorption and homeostasis. **International Journal for Vitamin and Nutrition Research**, v. 80, n. 4, p. 243, 2010.

COUSINS, R. J. A role of zinc in the regulation of gene expression. **Proceedings of the Nutrition Society**, v. 57, n. 2, p. 307-311, 1998.

CRADDOCK, P. T. The early history of zinc. **Endeavour**, v. 11, n. 4, p. 183-191, 1987.

CUFADAR, Y. et al. Effects of dietary different levels of nano, organic and inorganic zinc sources on performance, eggshell quality, bone mechanical parameters and mineral contents of the tibia, liver, serum and excreta in laying hens. **Biological trace element research**, v. 193, p. 241-251, 2020.

DA SILVA, G. D. et al. Organic or Inorganic Zinc for Laying Hens? A Systematic Review and Meta-analysis of the Effects of Zinc Sources on Laying Performance, Egg Quality, and Zinc Excretion. **Biological Trace Element Research**, v. 202, n. 6, p. 2812-2827, 2024.

O'DELL, B. L.; NEWBERNE, P. M.; SAVAGE, J. E. Significance of dietary zinc for the growing chicken. **The Journal of nutrition**, v. 65, n. 4, p. 503-523, 1958.

DOBRZAŃSKI, Z. et al. Influence of organic forms of copper, manganese and iron on bioaccumulation of these metals and zinc in laying hens. **Journal of Elementology**, v. 13, n. 3, p. 309-319, 2008.

DUMAN, M. et al. Relation between egg shape index and egg quality characteristics. **European Poultry Science/Archiv für Geflügelkunde**, v. 80, n. 117, p. 9, 2016.

DUNN, I. C. Long Life Layer; genetic and physiological limitations to extend the laying period. In: **Proceedings of the 19th European Symposium on Poultry Nutrition**. v 19, n, 5. p. 124-129, 2013.

ELCHURI, S. et al. CuZnSOD deficiency leads to persistent and widespread oxidative damage and hepatocarcinogenesis later in life. **Oncogene**, v. 24, n. 3, p. 367-380, 2005.

ENSMINGER, M. E.; OLDFIELDS, J. E.; HEINEMANN, W. W. FEEDS & NUTRITION (FORMERLY, FEEDS AND NUTRITION-COMPLETE). 1990.

EVANS, G. W.; WINTER, T. W. Zinc transport by transferrin in rat portal blood plasma. **Biochemical and biophysical research communications**, v. 66, n. 4, p. 1218-1224, 1975.

FUKAI, T.; USHIO-FUKAI, M. Superoxide dismutases: role in redox signaling, vascular function, and diseases. **Antioxidants & redox signaling**, v. 15, n. 6, p. 1583-1606, 2011.

GANZONI, A. M. et al. Red cell aging in vivo. **The Journal of clinical investigation**, v. 50, n. 7, p. 1373-1378, 1971.

GAUTRON, J. et al. Avian eggshell biomineralization: an update on its structure, mineralogy and protein tool kit. **BMC Molecular and Cell Biology**, v. 22, n. 1, p. 1-17, 2021.

GERZILOV, V.; BOZAKOVA, N.; PETROV, P. Influence of dietary zinc and vitamin c supplementation on some blood biochemical parameters and egg production in free-range laying hens. **Journal of Central European Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 0-0, 2015.

- GHEISARI, A. A. et al. Effects of organic chelates of zinc, manganese and copper in comparison to their inorganic sources on performance of broiler chickens. **J Anim Plant Sci**, v. 6, n. 2, p. 630-636, 2010.
- GHEISARI, A. Ali et al. Effect of diets supplemented with different levels of manganese, zinc, and copper from their organic or inorganic sources on egg production and quality characteristics in laying hens. **Biological Trace Element Research**, v. 142, n. 2 p. 557-571, 2011.
- GILMAN, J. G.; BREWER, GEORGE J. The oxygen-linked zinc-binding site of human haemoglobin. **Biochemical Journal**, v. 169, n. 3, p. 625-632, 1978.
- GLOVER, C. N.; WOOD, C. M. Absorption of copper and copper–histidine complexes across the apical surface of freshwater rainbow trout intestine. **Journal of Comparative Physiology B**, v. 178, p. 101-109, 2008.
- GOFF, J. P. Invited review: Mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid–base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. **Journal of dairy science**, v. 101, n. 4, p. 2763-2813, 2018.
- GREENE, L. W. The nutritional value of inorganic and organic mineral sources. In: **Proc. Plains Nutr. Coun. Symp. Texas Tech Univ., Lubbock**. 1995. p. 23-31.
- GRZELAK, A. et al. The effects of superoxide dismutase knockout on the oxidative stress parameters and survival of mouse erythrocyt. **Cellular and Molecular Biology Letters**, v. 14, n. 1, p. 23-34, 2009.
- HAN, Qiqi et al. Effects of dietary zinc on performance, zinc transporters expression, and immune response of aged laying hens. **Biological trace element research**, v. 196, p. 231-242, 2020.
- HANSEN, K. K. et al. Estrogen receptor-alpha populations change with age in commercial laying hens. **Poultry Science**, v. 82, n. 10, p. 1624-1629, 2003.
- HANSON, Z. D. et al. Hemoglobin Response to Zinc Supplementation in Patients with Zinc Deficiency and Chronic Anemia. **Blood**, v. 142, p. 5222, 2023.
- HIYAMA, S. et al. Evidence for the expression of estrogen receptors in osteogenic cells isolated from hen medullary bone. **Acta histochemica**, v. 111, n. 6, p. 501-507, 2009.
- HONG, D. et al. Research Note: Effect of age on hematological parameter and reference intervals for commercial Lohmann silver layer. **Poultry Science**, v. 100, n. 12, p. 101497, 2021.
- HU, X. et al. Safety evaluation of zinc threoninate chelate. **International journal of toxicology**, v. 29, n. 4, p. 372-379, 2010.
- IDOWU, O. M. O. et al. Effects of zinc supplementation on laying performance, serum chemistry and Zn residue in tibia bone, liver, excreta and egg shell of laying hens. **Int J Poult Sci**, v. 10, n. 3, p. 225-230, 2011.

- INAL, F. et al. The effects of withdrawal of vitamin and trace mineral supplements from layer diets on egg yield and trace mineral composition. **British Poultry Science**, v. 42, n. 1, p. 77-80, 2001.
- JAROSZ, M. et al. Efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios do zinco. Sinalização NF- κ B dependente de zinco. **Inflammopharmacology**, v. 25, p. 11-24, 2017.
- KANAKARI, E; DENDRINO-SAMARA, C. Fighting phytopathogens with engineered inorganic-based nanoparticles. **Materials**, v. 16, n. 6, p. 2388, 2023.
- KHAIRUNNISA, S. et al. The effect of zinc supplementation in different types of feed on the performance and health status of IPB-D2 chickens. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2021. p. 012072.
- KOMM, B. S. et al. Estrogen binding, receptor mRNA, and biologic response in osteoblast-like osteosarcoma cells. **Science**, v. 241, n. 4861, p. 81-84, 1988.
- LEE, S. R. Critical role of zinc as either an antioxidant or a prooxidant in cellular systems. **Oxidative medicine and cellular longevity**, v. 2018, n. 1, p. 9156285, 2018.
- LEESON, S. A new look at trace mineral nutrition of poultry: Can we reduce the environmental burden of poultry manure. **Nutritional Biotechnology in the Feed and Food Industries/Nottingham University Pres**, 2003.
- LI, L. et al. Effects of zinc methionine supplementation on laying performance, zinc status, intestinal morphology, and expressions of zinc transporters' mRNA in laying hens. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 14, p. 6582-6588, 2019.
- LI, L. L. et al. Effects of dietary Zn-methionine supplementation on the laying performance, egg quality, antioxidant capacity, and serum parameters of laying hens. **Poultry science**, v. 98, n. 2, p. 923-931, 2019.
- LIU, E. et al. Effect of zinc supplementation on growth outcomes in children under 5 years of age. **Nutrients**, v. 10, n. 3, p. 377, 2018.
- LOPES, M. et al. Effect of partial and total replacement of inorganic by organic microminerals sources on the quality of broiler carcasses. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 60, 2018.
- LÓPEZ-ALONSO, M.; MIRANDA, M. Copper supplementation, a challenge in cattle. **Animals**, v. 10, n. 10, p. 1890, 2020.
- MAO, X. et al. A histidine-rich cluster mediates the ubiquitination and degradation of the human zinc transporter, hZIP4, and protects against zinc cytotoxicity. **Journal of Biological Chemistry**, v. 282, n. 10, p. 6992-7000, 2007.
- MAZE, P. Influences respectives des éléments de la solutions minérale sur le développement du maïs. **Ann. Inst. Pasteur**, v. 28, p. 1-5, 1914.
- MEDEIROS-VENTURA, Waleska RL et al. The impact of phytase and different levels of supplemental amino acid complexed minerals in diets of older laying hens. **Animals**, v. 13, n. 23, p. 3709, 2023.

- MEWES, J. M.; SCHWERDTFEGGER, Peter. Exclusively relativistic: periodic trends in the melting and boiling points of group 12. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 60, n. 14, p. 7703-7709, 2021.
- MILLER, S. C. Rapid activation of the medullary bone osteoclast cell surface by parathyroid hormone. **The Journal of cell biology**, v. 76, n. 3, p. 615-618, 1978.
- MIN, Y. N. et al. Effects of methionine hydroxyl analog chelated zinc on laying performance, eggshell quality, eggshell mineral deposition, and activities of Zn-containing enzymes in aged laying hens. **Poultry Science**, v. 97, n. 10, p. 3587-3593, 2018.
- MIN, Y. N. et al. Effects of organic zinc on tibia quality, mineral deposit, and metallothionein expression level of aged hens. **Poultry science**, v. 98, n. 1, p. 366-372, 2019.
- MUSZYŃSKI, S. et al. Effect of dietary phytase supplementation on bone and hyaline cartilage development of broilers fed with organically complexed copper in a Cu-deficient diet. **Biological trace element research**, v. 182, p. 339-353, 2018.
- NEGI, S. et al. O passado, presente e futuro das proteínas artificiais de dedo de zinco: estratégias de design e aplicações químicas e biológicas. **JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 249-261, 2023.
- NIELSEN, F. H. History of zinc in agriculture. **Advances in Nutrition**, v. 3, n. 6, p. 783-789, 2012.
- NIKINIA, A. D.; VAKILI, R.; TAHMASBI, A.M. Zinc supplementation improves antioxidant status, and organic zinc is more efficient than inorganic zinc in improving the bone strength of aged laying hens. **Veterinary Medicine and Science**, v. 8, n. 5, p. 2040-2049, 2022.
- NYS, Y. et al. Adapting trace mineral nutrition of birds for optimising the environment and poultry product quality. **World's Poultry Science Journal**, v. 74, n. 2, p. 225-238, 2018.
- O'DELL, B. L.; NEWBERNE, P. M.; SAVAGE, J. E. Significance of dietary zinc for the growing chicken. **The Journal of nutrition**, v. 65, n. 4, p. 503-523, 1958.
- OLGUN, O.; YILDIZ, A. Ö. Effects of dietary supplementation of inorganic, organic or nano zinc forms on performance, eggshell quality, and bone characteristics in laying hens. **Annals of Animal Science**, v. 17, n. 2, p. 463-476, 2017.
- OSADCHA, Y.; PAVLOVYCH, O. Influence of Different Stocking Densities on Some Blood Parameters in Laying Hens. **Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences**, v. 33, n. 1, p. 111-118, 2023.
- PARK, H. J. et al. Fabrication of 3D porous silk scaffolds by particulate (salt/sucrose) leaching for bone tissue reconstruction. *Internat.* **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 78, n. 1, p. 215-223, 2015.
- PESTI, G. M.; BAKALLI, R. I. Studies on the feeding of cupric sulfate pentahydrate and cupric citrate to broiler chickens. **Poultry Science**, v. 75, n. 9, p. 1086-1091, 1996.
- POWELL, S. R. The antioxidant properties of zinc. **The Journal of nutrition**, v. 130, n. 5, p. 1447S-1454S, 2000.

PRABAKAR, G. et al. Effect of supplementation of zinc-methionine on egg production, semen quality, reproductive hormones, and hatchability in broiler breeders. **Biological trace element research**, v. 199, n. 5, p. 1-10, 2021.

QIU, J. L. et al. Organic trace minerals improve eggshell quality by improving the eggshell ultrastructure of laying hens during the late laying period. **Poultry Science**, v. 99, n. 3, p. 1483-1490, 2020.

RAULIN, J. **Études chimiques sur la végétation**. Masson & cie, 1905.

REED, S. et al. Chronic zinc deficiency alters chick gut microbiota composition and function. **Nutrients**, v. 7, n. 12, p. 9768-9784, 2015.

RIFKIND, J. M.; HEIM, J. M. Interaction of zinc with hemoglobin: Binding of zinc and the oxygen affinity. **Biochemistry**, v. 16, n. 20, p. 4438-4443, 1977.

RODRÍGUEZ-NAVARRO, A. B. et al. Amorphous calcium carbonate controls avian eggshell mineralization: a new paradigm for understanding rapid eggshell calcification. **Journal of structural biology**, v. 190, n. 3, p. 291-303, 2015.

ROMPALA, R. E.; HALLEY, J. T. Explaining the absorption of chelated trace minerals: The Trojan horse of nutrition. **Feed Management**, v. 46, n. 4, p. 52-58, 1995.

ROOHANI, N. et al. Zinc and its importance for human health: An integrative review. **Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences**, v. 18, n. 2, p. 144, 2013.

ROSTAGNO, H. S. et al. **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2024.

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

SALEH, A. A. et al. Impact of dietary organic mineral supplementation on reproductive performance, egg quality characteristics, lipid oxidation, ovarian follicular development, and immune response in laying hens under high ambient temperature. **Biological trace element research**, v. 195, p. 506-514, 2020.

SALIM, H. M.; JO, C.; LEE, B. D. Zinc in broiler feeding and nutrition. **Avian Biology Research**, v. 1, n. 1, p. 5-18, 2008.

SANTOS, M. J.B et al. Complexed amino acid minerals vs. bis-glycinate chelated minerals: Impact on the performance of old laying hens. **Animal Nutrition**, v. 16, p. 395-408, 2024.

SANTOS, M. J.B. et al. Levels of substitution of inorganic mineral to amino acids complexed minerals on old laying hens. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 24803, 2024.

SCOTT, A. et al. Effect of copper nanoparticles and copper sulphate on metabolic rate and development of broiler embryos. **Animal Feed Science and Technology**, v. 220, p. 151-158, 2016.

SEEDOR, J. G.; QUARTUCCIO, H. A.; THOMPSON, D. D. The bisphosphonate alendronate (MK217) inhibits bone loss due to ovariectomy in rats. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, v. 6, n. 4, p. 339–346, 1991.

SEYFORI, H. et al. Effects of water supplementation of anorganic acid-trace mineral complex on production and slaughter parameters, intestinal histomorphology, and macronutrient digestibility in growing ostriches. **Poultry Science**, v. 98, n. 10, p. 4860-4867, 2019.

SINGH, R. et al. Changes in the concentrations of parathyroid hormone and ionic calcium in the plasma of laying hens during the egg cycle in relation to dietary deficiencies of calcium and vitamin D. **General and comparative endocrinology**, v. 61, n. 1, p. 20-28, 1986.

SOLOMONS, N. W. Zinc and copper. **Modern Nutrition in Health and Disease**, p. 238-262, 1988.

SPEARS, J. Advancements in ruminant trace mineral nutrition. 2013.

SQUIRE, M. E. et al. Estrogen levels influence medullary bone quantity and density in female house finches and pine siskins. **General and comparative endocrinology**, v. 246, p. 249-257, 2017.

STEFANELLO, C. et al. Productive performance, eggshell quality, and eggshell ultrastructure of laying hens fed diets supplemented with organic trace minerals. **Poultry science**, v. 93, n. 1, p. 104-113, 2014.

SUNAR, F. et al. Zinc deficiency and supplementation in ovariectomized rats: their effect on serum estrogen and progesterone levels and their relation to calcium and phosphorus. 2009.

SUPURAN, C. T. Carbon-versus sulphur-based zinc binding groups for carbonic anhydrase inhibitors?. **Journal of enzyme inhibition and medicinal chemistry**, v. 33, n. 1, p. 485-495, 2018.

SUZUKI, T. et al. Zinc deficiency increases serum concentrations of parathyroid hormone through a decrease in serum calcium and induces bone fragility in rats. **Journal of nutritional science and vitaminology**, v. 61, n. 5, p. 382-390, 2015.

SWINKELS, J. WGM; KORNEGAY, E. T.; VERSTEGEN, Martin WA. Biology of zinc and biological value of dietary organic zinc complexes and chelates. **Nutrition Research Reviews**, v. 7, n. 1, p. 129-149, 1994.

TABATABAIE, M. M. et al. Effect of different sources and levels of zinc on egg quality and laying hen performance. **Pak J Biol Sci**, v. 10, n. 19, p. 3476-3478, 2007.

THOMPSON, L. J.; HALL, J. O.; MEERDINK, Gavin L. Toxic effects of trace element excess. **Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice**, v. 7, n. 1, p. 277-306, 1991.

TRAVEL, A.; NYS, Yves; BAIN, M. Effect of hen age, moult, laying environment and egg storage on egg quality. In: **Improving the safety and quality of eggs and egg products**. Woodhead Publishing, 2011. p. 300-329.

- TRONINA, W.; KINAL, S.; LUBOJEMSKA, B. Effect of various forms of zinc applied in concentrate mixtures for broiler chickens on its bioavailability as well as meat composition and quality. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 57, n. 4C, p. 577-581, 2007.
- TSAI, Y. H. et al. Effects of nanosize zinc oxide on zinc retention, eggshell quality, immune response and serum parameters of aged laying hens. **Animal feed science and technology**, v. 213, p. 99-107, 2016.
- TUCKER, H. F.; SALMON, W. D. Parakeratosis or zinc deficiency disease in the pig. **Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine**, v. 88, n. 4, p. 613-616, 1955.
- TŮMOVÁ, E.; GOUS, R. M. Interaction of hen production type, age, and temperature on laying pattern and egg quality. **Poultry Science**, v. 91, n. 5, p. 1269-1275, 2012.
- VIRDEN, W. S. et al. Immune system and cardiac functions of progeny chicks from dams fed diets differing in zinc and manganese level and source. **Poultry Science**, v. 83, n. 3, p. 344-351, 2004.
- WAUGH, R. E. et al. Rheologic properties of senescent erythrocytes: loss of surface area and volume with red blood cell age. 1992.
- WE, S. et al. Extraction of copper from copper and cadmium residues of zinc hydrometallurgy by oxidation acid leaching and cyclone electrowinning. **Minerals Engineering**, v. 128, p. 247-253, 2015.
- WEDEKIND, K. J.; HORTIN, A.E.; BAKER, D. H. Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide. **Journal of animal science**, v. 70, n. 1, p. 178-187, 1992.
- WESTERLIND, K. C. et al. Estrogen receptor mRNA is expressed in vivo in rat calvarial periosteum. **Steroids**, v. 60, n. 7, p. 484-487, 1995.
- YAMADA, M. et al. Effect of age on bone structure parameters in laying hens. **Animals**, v. 11, n. 2, p. 570, 2021.
- YAN, F.; WALDROUP, P. W. Evaluation of Mintrex® manganese as a source of manganese for young broilers. **Int. J. Poult. Sci**, v. 5, n. 8, p. 708-713, 2006.
- YANG, B. et al. Effects of zinc methionine hydroxy analog chelate on laying performance, serum hormone levels, and expression of reproductive axis related genes in aged broiler breeders. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, p. 918283, 2022.
- YI, L. et al. Determination of free heavy metal ion concentrations in soils around a cadmium rich zinc deposit. **Geochemical Journal**, v. 41, n. 4, p. 235-240, 2007.
- YOUNAS, Z. et al. Mechanistic approaches to the application of nano-zinc in the poultry and biomedical industries: A comprehensive review of future perspectives and challenges. **Molecules**, v. 28, n. 3, p. 1064, 2023.

YU, Q. et al. Effect of the level and source of supplementary dietary zinc on egg production, quality, and zinc content and on serum antioxidant parameters and zinc concentration in laying hens. **Poultry science**, v. 99, n. 11, p. 6233-6238, 2020.

YUZHANSKIYAN-GURKAN, V.; BARTLETT, E. Identification of a unique splice site variant in SLC39A4 in bovine hereditary zinc deficiency, lethal trait A46: An animal model of acrodermatitis enteropathica. **Genomics**, v. 88, n. 4, p. 521-526, 2006.

ZHANG, Y. N. et al. Effect of dietary supplementation of organic or inorganic zinc on carbonic anhydrase activity in eggshell formation and quality of aged laying hens. **Poultry Science**, v. 96, n. 7, p. 2176-2183, 2017.

ZHANG, Y. N. et al. Effect of dietary supplementation of organic or inorganic manganese on eggshell quality, ultrastructure, and components in laying hens. **Poultry Science**, v. 96, n. 7, p. 2184-2193, 2017.

ZHAO, Cui-Yan et al. Effects of dietary zinc oxide nanoparticles on growth performance and antioxidative status in broilers. **Biological trace element research**, v. 160, p. 361-367, 2014.

ZHAO, J. et al. Effects of chelated trace minerals on growth performance, breast meat yield, and footpad health in commercial meat broilers. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 19, n. 4, p. 365-372, 2010.