

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA



Tesis

Impacto del fósforo disponible en el desarrollo de órganos e integridad ósea en pollos de
engorde Cobb 500, Abancay

Presentado por:

Persa Alexandra Cuenca Bayona

Para optar el título de Médico Veterinario y Zootecnista

Abancay, Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA



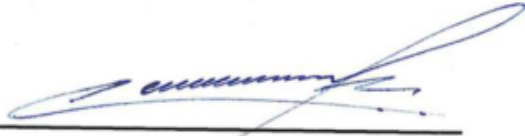
TESIS

Impacto de fósforo disponible en el desarrollo de órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500, Abancay

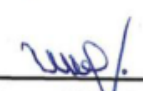
Presentada por **Persa Alexandra Cuenca Bayona**, para optar el título de Médico Veterinario y Zootecnista

Sustentada y aprobada el 12 de agosto de 2026 ante el jurado evaluador:

Presidente:


Dr. Aldo Alim Valderrama Pomé

Primer miembro:


Ph.D. Oscar Elispán Gómez Quispe

Segundo miembro:


Mtro. Juan Roberto Soncco Quispe

Asesor:


Ph.D. Jhonatan Steve Inca Moreano



Constancia de similitud

Informe de Tesis Constancia 29-2026-UDI-FMVZ-UNAMBA

El director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

Hace constar:

Que, **Persa Alexandra Cuenca Bayona**, egresado(a) de la Escuela Académico Profesional de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, presentó el informe de tesis titulado:

Impacto del fósforo disponible en el desarrollo de órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500, Abancay

Para ser evaluado mediante el software de detección de similitud.

Se utilizó el software Turnitin, considerando los siguientes filtros: excluir citas, excluir bibliografía, excluir fuentes que tengan menos de 18 palabras. Se obtuvo el siguiente resultado:

Porcentaje de índice de similitud: 9 %

Parte de esta constancia forman los anexos donde figuran los resultados del Turnitin.

Se expide la presente, a solicitud de la persona interesada, para fines de trámites en la UNAMBA.

Abancay, 8 de setiembre de 2026

Atentamente,



Dr. Ulises S. Quispe Gutiérrez
Director

investigacion.fmvz@unamba.edu.pe
cc/.Arch.



Agradecimiento

Agradezco profundamente a mis padres, Rolando y Sarita, por su apoyo incondicional y constante a lo largo de mi vida, así como por respetar y acompañar cada una de las decisiones que he tomado en mi desarrollo personal y profesional.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a Mauricio Guevara por haber sido parte fundamental de este proceso, brindándome apoyo y compañía hasta la culminación de esta etapa académica.



Dedicatoria

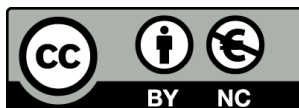
Dedico esta tesis a los animales que se cruzaron en mi camino, ya que gracias a ellos nació y se fortaleció mi vocación, motivándome a elegir la medicina veterinaria como profesión.



Impacto del fósforo disponible en el desarrollo de órganos e integridad ósea en pollos de
engorde Cobb 500, Abancay

Línea de investigación: Desarrollo de Modelos y Sostenibilidad de Sistemas Agropecuarios en
el Contexto Altoandino.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	6
1.2.1 Problema general	6
1.2.2 Problemas específicos	6
1.2.3 Justificación de la investigación	6
CAPÍTULO II	7
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	7
2.1 Objetivos de la investigación	7
2.1.1 Objetivo general	7
2.1.2 Objetivos específicos	7
2.2 Hipótesis de la investigación	7
2.2.1 Hipótesis general	7
2.2.2 Hipótesis específicas	7
2.3 Operacionalización de variables	8
CAPÍTULO III	9
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	9
3.1 Antecedentes	9
3.2 Marco teórico	14
3.2.1 Pollo de engorde	14
3.2.2 Fósforo	14
3.2.3 Fósforo disponible	15
3.2.4 Metabolismo del fósforo	15
3.2.5 Deficiencia de fósforo	16
3.2.6 Factor de crecimiento fibroblástico	16
3.2.7 Fósforo y desarrollo de órganos internos	16
3.2.8 Morfometría	18
3.2.9 Integridad ósea	18
3.2.10 Calidad ósea	18



3.2.11	Funcionalidad locomotora	19
3.2.12	Condición locomotora	19
3.3	Marco conceptual	19
CAPÍTULO IV		21
METODOLOGÍA		21
4.1	Tipo y nivel de investigación	21
4.1.1	Tipo de investigación	21
4.1.2	Nivel de investigación	21
4.2	Diseño de la investigación	22
4.3	Descripción ética de la investigación	22
4.4	Población y muestra	23
4.4.1	Población	23
4.4.2	Muestra	23
4.5	Procedimiento	23
4.5.1	Instalaciones	23
4.5.2	Tratamientos	23
4.6	Técnica e instrumentos	27
4.6.1	Adecuación y equipamiento del galpón	27
4.6.2	Obtención de estructuras corporales y huesos	28
4.7	Análisis estadístico	32
CAPÍTULO V		33
RESULTADOS Y DISCUSIONES		33
5.1	Análisis de resultados	33
5.1.1	Características morfométricas de los órganos	33
5.1.2	Integridad ósea	35
5.1.3	Evaluación de funcionalidad locomotora	40
5.1.4	Evaluación de condición patológica	40
5.2	Discusión	41
5.3	Limitaciones del estudio	45
CAPÍTULO VI		47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		47
6.1	Conclusiones	47
6.2	Recomendaciones	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		49
ANEXOS		53



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	8
Tabla 2. Composición porcentual de los ingredientes	25
Tabla 3. Contenido nutricional calculado de los tratamientos	26
Tabla 4. Niveles de nutrientes recomendados para broilers medianos y grandes	27
Tabla 5. Morfometría de órganos internos (peso, ancho y largo) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	33
Tabla 6. Morfometría ósea (peso, largo y diámetro) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	35
Tabla 7. Calidad ósea (volumen y densidad) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	36
Tabla 8. Calidad ósea (índice modificado de Seedor de fémur, tibia, tarso y quilla) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	37
Tabla 9. Calidad ósea (Índice de Quetelet de fémur, tibia, tarso y quilla) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	38
Tabla 10. Índice de robusticidad de huesos de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	39
Tabla 11. Capacidad para caminar de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	40
Tabla 12. Índice de necrosis femoral de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible	40
Tabla 13. Prueba de normalidad de los datos	60
Tabla 14. Prueba de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene)	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fotografía de la recolección e identificación de muestras óseas	54
Figura 2. Fotografía del pesaje de muestras óseas en balanza analítica	54
Figura 3. Fotografía de la medición de muestras óseas con calibrador Vernier	55
Figura 4. Fotografía de la estimación del volumen de muestras óseas haciendo uso de probeta	56
Figura 5. Fotografía del pesaje de aves	57
Figura 6. Fotografía del galpón de tratamiento 1 y 2	58
Figura 7. Fotografía del galpón de tratamiento 3 y 4	59

INTRODUCCIÓN

La industria avícola ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas, impulsado por el incremento de la demanda mundial de carne de pollo, considerada una de las principales fuentes de proteína de origen animal. Este crecimiento ha favorecido el desarrollo de líneas genéticas comerciales como el Cobb 500, caracterizadas por su alta velocidad de crecimiento, eficiencia alimenticia y elevado rendimiento de carne (1). En consecuencia, los sistemas de producción buscan optimizar el desempeño productivo mediante programas de alimentación que cubran adecuadamente los requerimientos nutricionales de las aves.

En los pollos de engorde, la evaluación de las características morfométricas de los órganos internos permite valorar el estado fisiológico y la respuesta a estrategias nutricionales. La medición de variables como el peso, longitud, ancho y diámetro del corazón, hígado, molleja y proventrículo permite determinar el efecto de distintos programas de alimentación en el desarrollo de los órganos internos de las aves (1).

Entre los nutrientes de mayor importancia en la producción avícola destaca el fósforo, debido a su participación en numerosos procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y mantenimiento del organismo. Además de intervenir en la mineralización ósea, forma parte del adenosín trifosfato (ATP), los ácidos nucleicos y los fosfolípidos de membrana, participando en el metabolismo energético, la división celular y el funcionamiento de diversos tejidos (2,3). Por ello, las variaciones en su disponibilidad pueden influir en las características morfométricas de los órganos internos.

A pesar de los avances genéticos en líneas como el Cobb 500, un híbrido comercial desarrollado por la empresa Cobb-Vantress mediante el cruzamiento de líneas paternas y maternas seleccionadas para promover el rápido crecimiento, aún se presentan trastornos metabólicos y alteraciones del sistema esquelético. Esto se debe a que el crecimiento óseo no siempre ocurre al mismo ritmo que el desarrollo muscular. Estas alteraciones comprometen el bienestar animal, reducen el rendimiento productivo y generan pérdidas económicas asociadas a decomisos, mortalidad y menor calidad de la canal. Entre los principales factores nutricionales destacan los

desequilibrios de calcio y fósforo, elementos esenciales para la formación y adecuada mineralización del tejido óseo (4).

Debido a lo expuesto previamente, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto de fósforo disponible sobre las características morfométricas de los órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500, en la ciudad de Abancay, ubicada aproximadamente a 2377 m s. n. m., en una zona altoandina cuyas condiciones de altitud podrían influir en el metabolismo y la utilización del fósforo en las aves. Los resultados contribuirán a generar información científica que permita optimizar los programas de alimentación mineral y mejorar el desempeño productivo y la salud de las aves en sistemas de producción de la región altoandina.



RESUMEN

La investigación evaluó el efecto de cuatro niveles de fósforo disponible (0,26 %, 0,31 %, 0,36 % y 0,41 %) sobre las características morfométricas de los órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500 criados en Abancay (2377 m s. n. m.). Se utilizaron 80 aves distribuidas en un diseño completamente aleatorizado con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. Al finalizar el periodo experimental se seleccionaron 20 aves (cinco por tratamiento) para evaluar el peso, ancho y largo del hígado, corazón, proventrículo y molleja, así como las características morfométricas y la integridad ósea del fémur, tibia, tarso y quilla mediante volumen, densidad, índice modificado de Seedor, índice de Quetelet, índice de robusticidad, capacidad para caminar y necrosis femoral. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en el peso del hígado ($p = 0,032$), el peso del proventrículo ($p = 0,041$), el ancho del hígado ($p = 0,024$) y el ancho de la molleja ($p = 0,025$). En la evaluación de la integridad ósea se encontraron diferencias significativas en el peso de la quilla ($p = 0,014$), la densidad del fémur izquierdo ($p = 0,047$), la densidad de la quilla ($p = 0,015$), el índice modificado de Seedor de la tibia derecha ($p = 0,041$) y de la quilla ($p = 0,006$), y el índice de Quetelet de la tibia derecha ($p = 0,041$). No se encontraron diferencias significativas en el volumen óseo, el índice de robusticidad, la capacidad para caminar ($p = 0,587$) ni en la necrosis femoral ($p = 0,549$). Se concluye que los cuatro niveles de fósforo disponible evaluados mantuvieron la integridad ósea y la funcionalidad locomotora de los pollos de engorde Cobb 500; los niveles más altos (0,36 % y 0,41 %) favorecieron el desarrollo del hígado y del proventrículo, mientras que los indicadores óseos de la quilla alcanzaron sus mayores valores con 0,31 % de fósforo disponible.

Palabras clave: *fósforo disponible, Cobb 500, morfometría de órganos, integridad ósea, densidad ósea.*



ABSTRACT

This study evaluated the effect of four levels of available phosphorus (0.26 %, 0.31 %, 0.36 %, and 0.41 %) on organ morphometric characteristics and bone integrity in Cobb 500 broiler chickens raised in Abancay (2377 m a.s.l.). A total of 80 broiler chickens were randomly assigned to four dietary treatments with five replicates each in a completely randomized design. At the end of the experimental period, 20 birds (five per treatment) were selected and euthanized to evaluate the weight, width, and length of the liver, heart, proventriculus, and gizzard, as well as the morphometric characteristics and bone integrity of the femur, tibia, tarsus, and keel through measurements of bone volume, bone density, the modified Seedor index, Quetelet index, robustness index, gait score, and femoral head necrosis. The results showed significant differences in liver weight ($p = 0.032$), proventriculus weight ($p = 0.041$), liver width ($p = 0.024$), and gizzard width ($p = 0.025$). Significant differences were also found in keel weight ($p = 0.014$), left femoral bone density ($p = 0.047$), keel bone density ($p = 0.015$), the modified Seedor index of the right tibia ($p = 0.041$) and of the keel ($p = 0.006$), and the Quetelet index of the right tibia ($p = 0.041$). No significant differences were observed in bone volume, the robustness index, gait score ($p = 0.587$), or femoral head necrosis ($p = 0.549$). It was concluded that the four levels of available phosphorus maintained bone integrity and locomotor function in Cobb 500 broiler chickens; the highest levels (0.36 % and 0.41 %) favoured liver and proventriculus development, whereas the keel bone indicators reached their highest values with 0.31 % available phosphorus.

Keywords: *available phosphorus, Cobb 500, organ morphometry, bone integrity, bone density.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Los pollos de engorde Cobb 500 son el resultado de programas de selección genética con el objetivo de incrementar la masa muscular y maximizar el rendimiento productivo en el menor tiempo posible (1), lo que ha favorecido una elevada tasa de crecimiento, pero también ha incrementado la incidencia de trastornos del sistema locomotor, afectando principalmente las patas (5). La frecuencia de irregularidades en el sistema locomotor está en aumento debido a la rápida tasa de crecimiento. En Europa, se descarta al 3,3 % de las aves debido a dificultades locomotoras, mientras que el 27,6 % experimenta dificultades al caminar. La aparición de problemas esqueléticos está vinculada a diversos aspectos nutricionales, como bajos niveles de proteína y deficiencias de minerales y vitaminas, destacando la participación del calcio, fósforo y vitamina D3 (6).

Es así que estos problemas se han asociado a niveles inadecuados de minerales, siendo el fósforo y el calcio los más relevantes (7) y dado que la fuente de fósforo y su biodisponibilidad influyen en la fortaleza ósea (8), buscamos determinar el nivel de fósforo disponible necesario para prevenir trastornos de locomoción en pollos de engorde Cobb 500, criados en la ciudad de Abancay, cuyas condiciones ambientales difieren de aquellas donde se han establecido la mayoría de las recomendaciones nutricionales. Además del impacto económico negativo debido a las pérdidas en las aves destinadas al beneficio o sometidas a tratamientos relacionados a estas cuestiones por problemas óseos (9), se sabe que el fósforo es un mineral esencial para el desarrollo y funcionamiento del organismo de las aves, la mayoría de las investigaciones se ha centrado en su relación con la integridad ósea, mientras que existe limitada información acerca de su impacto sobre las características morfométricas de los órganos (10,11).

Esta falta de evidencia dificulta comprender los efectos del fósforo disponible sobre el desarrollo orgánico de los pollos de engorde, lo que evidencia la necesidad de realizar investigaciones en esta área (12). Por lo tanto, precisar los requerimientos de fósforo



disponible y la detección de variaciones en el peso de los órganos podría sugerir una correlación significativa entre los niveles de fósforo y las características morfométricas de órganos en pollos Cobb 500 en la ciudad de Abancay (2).

En Abancay, las condiciones climáticas y de producción difieren de aquellas donde se han generado la mayoría de las recomendaciones nutricionales para pollos de engorde, sin embargo, los criadores locales suelen utilizarlas como referencia, pese a la limitada evidencia de su aplicabilidad en la zona. Esto evidencia la necesidad de generar información adaptada a la localidad (13).

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Las características morfométricas de los órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500 se modificarán según los niveles de fósforo disponible de la dieta?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influyen los niveles de fósforo disponible sobre las características morfométricas de los órganos en pollos de engorde Cobb 500?
- ¿Cuál es el impacto de los niveles de fósforo disponible sobre la integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500?

1.2.3 Justificación de la investigación

El fósforo cumple una función fundamental en la formación y el mantenimiento de los huesos. En las aves de engorde de alto rendimiento, la selección genética orientada a un rápido desarrollo muscular ha incrementado su predisposición a sufrir diversos trastornos esqueléticos. Por esta razón, resulta necesario garantizar niveles adecuados de fósforo en la dieta, con el fin de prevenir o reducir dichos problemas óseos y favorecer el bienestar aviar. Además, el fósforo no solo incide en la salud del esqueleto, sino que también desempeña un papel esencial en las características morfométricas de órganos y músculos, lo que puede influir directamente en el peso de las distintas estructuras corporales del pollo de engorde.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del fósforo disponible sobre las características morfométricas de los órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500, Abancay.

2.1.2 Objetivos específicos

- Establecer las características morfométricas de los órganos de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con dietas de distintos niveles de fósforo disponible.
- Determinar la integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500 alimentados con dietas de distintos niveles de fósforo disponible.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

La dieta con el nivel más elevado de fósforo disponible mejorará las características morfométricas de los órganos e integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500.

2.2.2 Hipótesis específicas

- La dieta con el nivel más elevado de fósforo disponible mejorará las características morfométricas de los órganos de pollos de engorde Cobb 500
- La dieta con el nivel más elevado de fósforo disponible mejorará la integridad ósea de pollos de engorde Cobb 500.



2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
Fósforo disponible en la dieta (VI)	Composición de dieta	0,26	%
		0,31	%
		0,36	%
		0,41	%
Características morfométricas de órganos (VD1)	Morfometría de órganos	Peso	g
		Largo	mm
		Ancho	mm
Integridad ósea (VD2)	Morfometría ósea	Peso	g
		Largo	mm
		Diámetro	mm
	Calidad ósea	Volumen	cm ³
		Densidad	mg/cm ³
		Índice modificado de Seedor	mg/mm
		Índice de Quetelet	mg/mm ²
		Índice de robusticidad	cm/g ^{1/3}
	Funcionalidad locomotora	Capacidad para caminar	0 – 5
	Condición patológica	Índice de necrosis femoral	1 – 5

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

- a) Omotoso et al. en el 2023, investigaron la respuesta fisiológica de pollos de engorde frente a dietas con bajos niveles de fósforo en diversas etapas de producción. Se utilizaron 308 polluelos de engorde de la línea Ross 308, a los cuales se les suministró alimento *ad libitum* en forma de pellets, compuesto principalmente de trigo, maíz y harina de soja. Se implementaron tres tratamientos con diferentes niveles de fósforo no fitato durante la fase de inicio (días 1 a 10): un nivel medio (M: 0,52 % fósforo no fitato, considerado como el 100 % de referencia), un nivel bajo (L: 0,26 % fósforo no fitato, equivalente a -50 % respecto a M) y un nivel alto (H: 0,78 % fósforo no fitato, equivalente a +50 % respecto a M); estos tratamientos se mantuvieron hasta el día 17. A partir de ese momento (día 17), se redujeron los niveles de fósforo para las fases de crecimiento (0,23 % fósforo no fitato para las dietas bajas) y acabado (0,21 % fósforo no fitato para las dietas bajas). Los resultados revelaron que, al día 17, los pollos que recibieron la dieta baja en fósforo no fitato presentaron un menor peso, menor consumo de alimento y una tasa de conversión alimenticia más baja en comparación con los tratamientos M y H. Además, el grupo L experimentó un significativo aumento en la mortalidad durante el periodo del día 1 al 17, a diferencia de los grupos M y H. En la etapa de crecimiento, solo hubo diferencias significativas en el peso corporal y la ganancia de peso, siendo estos menores en la dieta con disminución de fósforo en comparación con los grupos control. En la fase de acabado, no se observaron variaciones significativas en los datos zootécnicos. En cuanto a la medición de rasgos óseos, se determinó que, al día 17, los pollos alimentados con la dieta L difirieron en fuerza, peso, diámetro y ceniza en comparación con los tratamientos M y H. En el día 24, las dietas disminuidas en fósforo también mostraron diferencias significativas en la carga de fractura ósea. Finalmente, en el día 37, el diámetro óseo del fémur difirió significativamente entre los pollos alimentados con dietas disminuidas en fósforo en comparación con las dietas con niveles medios y aumentados de fósforo (12).



- b) Li, T. et al en el 2020, realizaron un experimento con el objetivo de examinar los efectos de la falta de calcio (Ca) o fósforo (P) en la dieta sobre el desarrollo óseo y los parámetros metabólicos asociados en pollos de engorde machos de la raza Arbor Acres. Los resultados mostraron que los pollos que recibieron una dieta baja en fósforo (1,00% Ca + 0,23% fósforo no fitato) mostraron un menor consumo diario promedio de alimento y una ganancia diaria promedio reducida ($p < 0,05$). Además, presentaron una relación alimento-ganancia más alta y una mayor tasa de mortalidad ($p < 0,05$) en comparación con aquellos alimentados con una dieta baja en calcio (0,35 % Ca + 0,45 % fósforo no fitato) o con deficiencia en ambas sustancias (0,35 % Ca + 0,23 % fósforo no fitato). Los pollos alimentados con una dieta adecuada en calcio y fósforo (1,00% Ca + 0,45 % fósforo no fitato) exhibieron valores significativamente mayores ($p < 0,05$) en densidad mineral ósea, resistencia a la rotura de huesos y contenido de cenizas en la tibia en los días 7, 14 y 21, en comparación con aquellos que recibieron dietas deficientes en calcio o fósforo. Es importante señalar que los pollos alimentados con la dieta baja en fósforo, pero con suficiente calcio mostraron una disminución significativa ($p < 0,05$) en densidad ósea, resistencia de rotura y contenido de cenizas en la tibia en los días 7, 14 y 21, en comparación con aquellos alimentados con la dieta baja en calcio y fósforo. Se concluyó que todos los indicadores de desarrollo óseo en la tibia de los pollos de engorde fueron más sensibles a la deficiencia de fósforo (14).
- c) Wei, H. et al en el 2022, realizaron una investigación en gallinas ponedoras, en las cuales evaluaron los efectos del bajo nivel de fósforo en la dieta y cómo esta repercute en su salud y en la calidad de la quilla. Para ello se suministraron dos tipos de dieta, una dieta control (C), con 0,30 % de fósforo disponible, y una dieta baja en fósforo disponible (LP), con 0,15 % de fósforo disponible. A 180 gallinas ponedoras desde las 20 hasta las 36 semanas de edad. Los resultados evidenciaron que la incidencia de daño en el hueso de la quilla fue mayor en el grupo LP en comparación con el grupo C, y esta diferencia se incrementó con la edad a lo largo del experimento. A las 32 y 36 semanas de edad, se observó que la longitud del hueso de la quilla en las gallinas ponedoras del grupo LP fue significativamente menor que en el grupo C ($p < 0,05$). Asimismo, las gallinas ponedoras del grupo LP presentaron una mayor separación trabecular y fracción de superficie ósea ($p < 0,05$), junto con una disminución en el volumen óseo, fracción de volumen óseo, número y espesor trabecular, así como en la densidad mineral ósea ($p < 0,05$) a las 32 semanas de edad. Además, a las 36 semanas de edad, las aves alimentadas con la dieta LP mostraron incrementos en las concentraciones óseas de potasio, titanio, manganeso,



hierro, zinc, selenio, estroncio y plomo ($p < 0,05$), y reducciones en las concentraciones de fósforo y talio ($p < 0,05$) (15).

- d) Cowieson, A. J. et al en el 2020, llevaron a cabo un estudio para evaluar la interacción entre la concentración de proteína cruda en la dieta y el fósforo disponible en 900 pollos de engorde machos de la línea Ross 308. El experimento consistió en nueve tratamientos, donde se aplicaron tres niveles diferentes de proteína (baja, media o estándar) junto con niveles de fósforo disponible bajos, estándar y altos, durante las etapas de crecimiento y acabado, respectivamente (proteína cruda: 21,5/19,5; 19,5/17,5 o 17,5/15,5 %; y fósforo disponible: 0,48/0,45 %, 0,43/0,40 %, o 0,38/0,35 %). La dieta se suministró desde el día 8 hasta el día 24, finalizando entre el día 25 y el día 35. En el último día del experimento (día 35), se tomaron muestras de sangre de tres aves por corral para realizar mediciones bioquímicas. Se determinó el peso vivo y después de beneficiarlas, se extrajeron las tibias para llevar a cabo análisis de composición y pruebas mecánicas. También se tomaron muestras de la pechuga, muslo, muslo y almohadilla de grasa abdominal, así como del contenido proveniente de la digestión del íleon. En los pollos que recibieron una dieta baja en proteína y fósforo adicional, se observó una mejora en la conversión alimenticia por peso en comparación con la dieta que tenía niveles adecuados de proteína. En relación con la bioquímica sanguínea, se evidenció que los niveles de proteína y fósforo disponible influyeron en el fósforo, indicando que tanto la proteína como el fósforo desempeñan un papel en la acumulación y catabolismo de proteínas. Estos resultados sugieren que la inclusión de fósforo en la dieta podría mejorar el rendimiento de los pollos alimentados con niveles bajos de proteína (16).
- e) Catalan, A. A. S. et al en el año 2016, investigaron los efectos del fósforo fitato y la fitasa en el peso relativo de órganos, morfometría intestinal y rendimiento en pollos de engorde. Para ello, emplearon 384 pollos Cobb 500 machos, distribuidos en cuatro tratamientos: T1 (dieta baja en fósforo fitato: ~0,24 % de fósforo fitato), T2 (dieta baja en fósforo fitato con fitasa: ~0,24 % de fósforo fitato + 500 FTU kg⁻¹), T3 (dieta alta en fósforo fitato: ~0,32 % de fósforo fitato) y T4 (dieta alta en fósforo fitato con fitasa: ~0,32 % de fósforo fitato + 500 FTU kg⁻¹). Los resultados revelaron que, a los 32 días de edad, el T3 exhibió un mayor peso en la molleja, mientras que el T1 mostró un mayor peso relativo en el hígado. Además, se observó que el T3 favoreció el desarrollo y funcionamiento de la molleja, aunque con un menor peso relativo en el hígado. Por



último, se demostró que la inclusión de fitasa en las dietas incrementó el peso relativo del corazón, pero redujo el peso relativo del ciego (10).

- f) Li, X. K. et al en el 2016, investigaron el impacto de diferentes niveles de fósforo suministrados en la dieta de pollos de engorde, centrándose en su influencia en la calidad de la carne y el metabolismo de los lípidos. Este estudio involucró a 100 pollos de engorde sometidos a tres tratamientos con variados niveles de fósforo disponible: T1 (bajo en fósforo: 0,28 % de fósforo disponible en la fase de inicio y 0,26 % de fósforo disponible en la fase de crecimiento), T2 (normal: 0,56 % de fósforo disponible en inicio y 0,52 % de fósforo disponible en crecimiento) y T3 (alto: que incluyó dos niveles, H1 con 0,86 % /0,82 % de fósforo disponible y H2 con 1,16 % /1,10 % de fósforo disponible, para inicio y crecimiento respectivamente). Se evidenció que las dietas con contenido bajo y alto de fósforo presentaron efectos adversos en la calidad de la carne, a diferencia de la dieta con un nivel normal de fósforo. Adicionalmente, se observó que las dietas con altos niveles de fósforo ocasionaron una disminución significativa en el contenido de ácidos grasos y grasa intramuscular en la pechuga ($p < 0,01$). Además, esta redujo de manera significativa la acumulación de lípidos en el hígado ($p < 0,01$), aunque los niveles de fósforo experimentaron un incremento significativo en la carne de pechuga (11).
- g) Powell, S. et al en el 2008, evaluaron los efectos de distintos niveles de fósforo, suplementados o no con fitasa, en el rendimiento productivo, la resistencia a la rotura de huesos y la concentración de fósforo en la cama de pollos de engorde. La investigación incluyó a 7840 pollos de engorde comerciales de la línea Ross 508, distribuidos en siete tratamientos, cada uno con 70 unidades experimentales, y fueron criados desde el día cero hasta el día 50. Los pollos de engorde fueron sometidos a un programa de alimentación dividido en cuatro períodos: inicio (día 0 al día 14), crecimiento (día 14 al día 32), finalización (día 32 al día 41) y retiro (día 41 al día 50). La dieta de los pollos incluyó una fórmula de control con niveles de fósforo no fitato del 0,43 %, 0,40 %, 0,36 % y 0,32 % en los períodos de inicio, crecimiento, finalización y retiro, respectivamente. También se implementó una dieta baja en calcio y fósforo, y ambas dietas se suplementaron con fitasa a una tasa de 600 unidades de fitasa/kg. Durante los períodos de inicio y retiro, la dieta no mostró un impacto significativo en el rendimiento de los pollos de engorde ($p > 0,10$). Los resultados revelaron que tanto la adición de fitasa como la dieta baja en calcio y fósforo afectaron negativamente algunos aspectos del



rendimiento durante los períodos de crecimiento y finalización. Aunque la fitasa no tuvo un efecto significativo en la resistencia a la rotura de huesos, se observó una disminución en pollos alimentados con la dieta baja en calcio y fósforo con fitasa durante los períodos de crecimiento ($p < 0,02$) y retiro ($p < 0,01$). Además, los niveles totales de fósforo, fósforo soluble y fósforo soluble reactivo disminuyeron significativamente ($p < 0,04$) en la cama de los pollos que recibieron dietas bajas en calcio y fósforo. Asimismo, se observó una reducción significativa ($p < 0,01$) en los niveles de fósforo total, fósforo soluble y fósforo soluble reactivo en la cama de los pollos alimentados con fitasa. Estos hallazgos indican que la suplementación con fitasa puede tener efectos adversos en ciertos aspectos del rendimiento, mientras que las dietas bajas en calcio y fósforo influyen en la concentración de fósforo en la cama de los pollos (17).

- h) Murga, T. et al en 2020, investigaron el efecto de cinco fuentes comerciales de fosfatos inorgánicos sobre el comportamiento productivo, características morfométricas y calidad ósea de tibias en pollos de engorde Cobb 500. Los resultados indicaron que no se observaron diferencias estadísticas entre las variables evaluadas en cuanto al rendimiento productivo de los pollos de engorde a los 21 días de edad. Respecto a las mediciones de características morfométricas e indicadores de calidad ósea en la tibia derecha, el peso, volumen, índice de Seedor y resistencia de la tibia no se vieron afectados por la fuente de fosfato en la alimentación. Sin embargo, se observaron diferencias significativas en la longitud, donde el T1 con fosfato monosódico grado alimenticio a la dieta basal (25 % de P, 0 % de Ca) mostró la mayor longitud en comparación con los otros tratamientos. En cuanto al diámetro de la diáfisis, el T3 con fosfato monodiválcico 1 en la dieta basal (21,5 % P, 26 % Ca) tuvo el mayor valor; en términos de densidad, el T4 con fosfato monodiválcico 2 en la dieta basal (21,0 % P, 15 % Ca) exhibió la mayor densidad, y en relación con el índice de robustez, el T1 obtuvo el resultado más alto ($p < 0,05$). Las distintas fuentes de fosfato afectaron los contenidos de calcio y fósforo ($p < 0,05$), pero no tuvieron impacto en el porcentaje de ceniza (18).
- i) Uculmana, C. et al en 2018, investigaron la relación del calcio y fósforo sobre las características óseas, porcentaje de cenizas e integridad esquelética en pollos de engorde. Los resultados indican que los regímenes alimentarios no tuvieron un impacto significativo en la longitud ni ancho de los tres huesos de la pierna. La proporción de calcio a fósforo (Ca:P) utilizada en este estudio (1,13, 1,55 y 1,98, con niveles de calcio de 0,50 %, 0,68 % y 0,87 % respectivamente, y un nivel de fósforo constante de 0,44 %



en todas las dietas) no afectó el volumen de los tres huesos de la pierna y aunque no hubo variaciones significativas en el peso total de los tres huesos entre las dietas experimentales, se identificó que el peso específico del fémur y la tibia mostraron valores de p de 0,07 y 0,05, respectivamente, según el análisis de varianza, sugiriendo una posible influencia marginal de los tratamientos en estas dos variables. Se destacó que la relación Ca:P de 1,13 fue la única que afectó la densidad ($p < 0,05$), y se observó que la capacidad de caminar se veía afectada cuando la relación Ca:P era 1,13. En cuanto a la patología conocida como necrosis de cabeza femoral, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y en ninguno de ellos se presentaron casos severos de esta afección (19).

3.2 Marco teórico

3.2.1 Pollo de engorde

El pollo de engorde Cobb 500 es un híbrido comercial desarrollado mediante programas de mejoramiento genético, seleccionado por su rápido crecimiento, alta eficiencia en la conversión alimenticia y elevado rendimiento de carne, características que lo convierten en una de las líneas más utilizadas en la producción avícola intensiva (1).

3.2.2 Fósforo

El fósforo, es el segundo mineral más presente en el organismo animal después del calcio, éste, se encuentra en un 80 % en huesos y dientes y su función es la formación y preservación del tejido óseo. Asimismo, participa en los cambios estructurales y composicionales óseos y en la creación de la matriz orgánica y su posterior mineralización. El 20 % restante del fósforo corporal se distribuye en los fluidos y tejidos blandos, actúa como componente fundamental de los ácidos desoxirribonucleico y ribonucleico, esenciales para el desarrollo y la especialización de las células. En su forma de fosfolípido, contribuye a la flexibilidad y resistencia de las membranas celulares y a la protección de los nervios mediante la mielinización (20).

El fósforo, además, forma parte del tejido nervioso, la obtención de energía de los alimentos, el metabolismo de carbohidratos, la absorción y reabsorción de glucosa, la producción de energía (ATP), sistemas enzimáticos, metabolismo de proteínas, desarrollo y mantenimiento muscular, equilibrio ácido-base en la sangre, afectando



la fertilidad, peso al nacer, ganancia diaria, eficiencia alimentaria y desarrollo corporal general (21).

3.2.3 Fósforo disponible

Es la cantidad de fósforo proveniente de la dieta, que se libera durante el proceso de digestión y se une al conjunto de fósforo endógeno en los sitios de absorción del tracto gastrointestinal y que es utilizada por el organismo (8).

3.2.4 Metabolismo del fósforo

Las hormonas involucradas son la paratiroidea, el 1,25-dihidroxicolecalciferol (forma activa de la vitamina D) y la calcitonina. La hormona paratiroidea y el 1,25 dihidroxicolecalciferol ajustan los niveles de calcio y fósforo en sangre, ante una hipocalcemia se estimula la liberación de hormona paratiroidea, la cual a su vez potencia la producción de 1,25-dihidroxicolecalciferol en el riñón. Esto, a su vez, aumenta la absorción de calcio, intensifica la reabsorción de calcio en los túbulos renales distales y ocasiona la resorción ósea, incrementando así los niveles de calcio en la sangre. Al mismo tiempo, la hormona paratiroidea induce fosfaturia, disminuyendo la reabsorción de fósforo en los túbulos renales para mantener una proporción adecuada de calcio a fósforo en la sangre. En contraste, concentraciones elevadas de calcio reducen la liberación de hormona paratiroidea y la producción de 1,25-dihidroxicolecalciferol, contrarrestando así la hipercalcemia mediante mecanismos opuestos a los descritos anteriormente. La calcitonina actúa de manera similar para reducir los niveles plasmáticos de calcio, aunque responde a condiciones de hipercalcemia más extremas (22).

El fósforo se absorbe a través de la vía transcelular, penetrando la bicapa lipídica, y/o por la vía paracelular, que se produce mediante sitios de oclusión en los espacios laterales intercelulares. En condiciones fisiológicas normales, la vía transcelular es la más activa. Sin embargo, en situaciones de bajos niveles de sodio, la entrada de fósforo a la célula a través de la vía transcelular disminuye, sin afectar la vía paracelular. Esto sugiere que el sistema de transporte transcelular de fosfato está regulado por proteínas transportadoras de fosfato dependientes de sodio, mientras que el sistema paracelular no lo está (23).



3.2.5 Deficiencia de fósforo

Es el estado en el cual el aporte de fósforo disponible en la dieta es insuficiente para cubrir los requerimientos fisiológicos del ave, afectando la mineralización ósea, el crecimiento y el metabolismo energético. La deficiencia de fósforo en la dieta de pollos de engorde se ha asociado ampliamente con alteraciones en el desarrollo esquelético, por su influencia en la calidad ósea y en el mantenimiento de la relación calcio-fósforo. Cuando el aporte de fósforo disponible es insuficiente, se afecta la formación de hidroxapatita, lo que reduce la resistencia ósea y favorece la aparición de deformidades, debilidad estructural y problemas locomotores (24). Estos son considerados trastornos del desarrollo óseo en aves de rápido crecimiento, donde el desequilibrio mineral compromete la integridad del sistema esquelético (25).

Además, factores ambientales como el estrés térmico o condiciones de producción no óptimas pueden agravar los efectos de deficiencias minerales, afectando la eficiencia de utilización del fósforo en el organismo (13).

Para pollos de engorde de la línea Cobb 500 en la fase de acabado, el nivel de fósforo disponible recomendado es de 0,36 %, valor por debajo del cual la dieta se considera insuficiente para cubrir plenamente los requerimientos fisiológicos del ave (1).

3.2.6 Factor de crecimiento fibroblástico

Participa en la homeostasis del fósforo. Cuando existe una deficiencia de fósforo en la dieta, disminuye la concentración de FGF23 y aumenta la síntesis de $1,25-(\text{OH})_2\text{D}_3$, lo que favorece la absorción intestinal de fósforo y reduce su excreción renal con el fin de restablecer el equilibrio mineral. Es por esto que un exceso de fósforo incrementa la secreción de FGF23, inhibe la producción de $1,25-(\text{OH})_2\text{D}_3$ y promueve la excreción renal de fósforo, manteniendo la homeostasis del organismo (24) (26).

3.2.7 Fósforo y desarrollo de órganos internos

A diferencia de su papel en la mineralización esquelética, ampliamente documentado en la literatura científica, la participación del fósforo en el desarrollo morfométrico de los órganos internos ha sido menos estudiada. Las vísceras, como el hígado, el corazón, la molleja y el proventrículo, están compuestas por tejidos de alta actividad metabólica y renovación celular constante, procesos que dependen directamente de la disponibilidad de fósforo para la síntesis de ATP, ácidos nucleicos y fosfolípidos



de membrana (20,21). En este sentido, Li et al. (27) determinaron que, entre los distintos órganos analizados en pollos de engorde, el hígado concentra el mayor contenido de fosfato libre y de fosfolípidos, lo que evidencia su elevada dependencia metabólica de este mineral y respalda la pertinencia de evaluar la respuesta morfométrica de los órganos ante distintos niveles de fósforo disponible en la dieta.

El crecimiento y desarrollo de los órganos en las aves está regulado principalmente por el eje endocrino somatotrópico, en el que la hormona de crecimiento y las hormonas tiroideas cumplen un papel central en la estimulación de la síntesis proteica y la proliferación celular de los tejidos viscerales. El fósforo no actúa como una señal hormonal en sí misma, sino como un sustrato indispensable para que estos procesos se lleven a cabo, al participar en la fosforilación de proteínas intracelulares y en la generación de la energía necesaria para la división y el mantenimiento celular. Al respecto, Parmer et al. (28) demostraron que pollos de engorde sometidos a dietas severamente deficientes en fósforo (0,05 % y 0,10 % de fósforo disponible) presentaron una reducción de la hormona de crecimiento circulante, alteraciones en la función tiroidea y modificaciones en el peso relativo de órganos como el corazón y los riñones, en comparación con aves alimentadas con un nivel adecuado de fósforo (0,65 %). Estos hallazgos indican que la deficiencia de fósforo no solo compromete el desarrollo óseo, sino también la actividad del eje hormonal responsable del crecimiento visceral, lo que sustenta que niveles más elevados de fósforo disponible favorecerían un mejor desarrollo morfométrico de los órganos internos.

En relación con el hígado en particular, este órgano desempeña funciones de alta demanda energética, como la síntesis de proteínas plasmáticas, el metabolismo lipídico y la biotransformación de compuestos, procesos que requieren un suministro constante de ATP y de fosfolípidos para la renovación de las membranas de los hepatocitos. La elevada concentración hepática de fósforo reportada por Li et al. (27) resulta consistente con esta intensa actividad metabólica, en la medida en que el mantenimiento funcional y la proliferación de los hepatocitos dependen de la disponibilidad energética que aporta este mineral. De manera concordante, Li X. K. et al. (11) reportaron que los niveles de fósforo en la dieta modifican el metabolismo lipídico hepático de los pollos de engorde, reduciendo la acumulación de grasa en el hígado cuando se suministran niveles altos de fósforo, lo que confirma la sensibilidad de este órgano frente a las variaciones del mineral en la dieta. Estos antecedentes



sustentan la decisión de incluir las características morfométricas de los órganos, y en particular del hígado, como variable de respuesta en la presente investigación, en tanto constituyen indicadores complementarios a la integridad ósea para valorar el estado nutricional fosfórico de las aves.

3.2.8 Morfometría

Conjunto de métodos utilizados para medir y cuantificar las dimensiones de estructuras biológicas, permitiendo analizar variaciones en tamaño, forma y proporciones de órganos o tejidos. En el ámbito de la biología y la producción animal, estas mediciones se emplean para evaluar el desarrollo corporal y los cambios morfológicos asociados a factores genéticos o nutricionales (29).

3.2.9 Integridad ósea

La integridad ósea se refiere al estado estructural y funcional del sistema esquelético, determinado por la resistencia, continuidad y calidad del tejido óseo, el cual permite al animal sostener su peso corporal, mantener la locomoción y responder adecuadamente a las exigencias mecánicas del crecimiento. En aves de engorde, esta integridad depende principalmente del adecuado equilibrio entre calcio, fósforo y vitamina D, fundamentales para la mineralización y mantenimiento del hueso (30).

La integridad ósea puede evaluarse mediante parámetros morfométricos (peso, longitud, ancho y volumen óseo), índices de calidad ósea como el índice de Seedor, índice de Quetelet y robusticidad ósea, así como mediante evaluación funcional de la locomoción y presencia de lesiones como necrosis femoral (18).

3.2.10 Calidad ósea

Es el conjunto de propiedades estructurales y mecánicas del tejido óseo, en aves de engorde, se relaciona con el equilibrio mineral, especialmente del calcio y fósforo, que forman la matriz ósea y su proceso de mineralización (31).

En pollos de engorde, una adecuada calidad ósea es fundamental debido al rápido crecimiento corporal, ya que un desarrollo muscular acelerado puede superar la capacidad de mineralización del esqueleto, predisponiendo a debilidad estructural y alteraciones locomotoras (25).



3.2.11 Funcionalidad locomotora

Es la capacidad del animal para desplazarse de manera eficiente y coordinada, regulado por el sistema musculoesquelético. Esta funcionalidad depende de la integridad ósea, el desarrollo muscular y la ausencia de lesiones o deformidades en las extremidades, siendo un indicador del bienestar animal en condiciones de producción intensiva (32).

3.2.12 Condición locomotora

Es el estado físico del sistema musculoesquelético que determina la capacidad del animal para caminar, sostenerse y desplazarse sin dolor ni dificultad. Esta condición se evalúa mediante escalas de observación de la marcha, que permiten identificar alteraciones como cojera, debilidad o incapacidad para el movimiento, siendo un indicador del bienestar y salud ósea del ave (32).

3.3 Marco conceptual

- a) **Pollo de engorde Cobb 500.** La Línea genética comercial desarrollada por la empresa Cobb-Vantress mediante programas de mejoramiento genético para optimizar el desempeño productivo de las aves. Además de adaptarse a programas de alimentación con diferentes niveles nutricionales, lo que ha favorecido su amplia utilización en la producción avícola comercial (1).
- b) **Tablas brasileñas de aves y cerdos.** Son herramientas fundamentales en la nutrición animal, ya que ofrecen información detallada sobre la composición de alimentos y los requisitos nutricionales específicos para aves y cerdos. Estas tablas han sido desarrolladas por profesores del Departamento de Zootecnia del Centro de Ciencias Agrarias de la Universidad Federal de Viçosa, Brasil. Estas proporcionan datos que permiten la identificación precisa de los requerimientos nutricionales de aves y cerdos en diferentes etapas reproductivas, permitiendo lograr un equilibrio eficiente en la alimentación de estos animales, contribuyendo así a su salud y rendimiento óptimos.
- c) **Carbonato de calcio.** El carbonato de calcio se emplea como un suplemento alimenticio en situaciones en las cuales la ingesta de calcio a través de la dieta resulta insuficiente. Este mineral permite el mantenimiento de la salud ósea, muscular, del sistema nervioso y cardíaco de los animales.
- d) **Fosfato dicálcico.** El fosfato dicálcico, también denominado fosfato cálcico dibásico o fosfato cálcico monohidrógeno, constituye una variante del fosfato cálcico. Este compuesto se emplea



como una fuente de fósforo y calcio por lo que se utiliza como suplemento mineral en la alimentación de animales.

- e) **Fósforo total.** Corresponde a la concentración total de fósforo presente en un alimento, independientemente de su disponibilidad biológica para el animal, por lo que comprende tanto el fósforo disponible como el fósforo ligado al fitato.
- f) **Disponibilidad.** Cantidad y calidad de fósforo libre para ser absorbido y utilizado por el organismo.



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación fue de tipo aplicada, ya que, mediante la experimentación científica, evaluó el efecto de diferentes niveles de fósforo disponible en la dieta para determinar el tratamiento que produjo los mayores efectos sobre las características morfológicas de los órganos y la integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500. La deficiencia de fósforo causa problemas esqueléticos en pollos de engorde, estos efectos pueden verse influenciados por condiciones ambientales de producción, como el estrés térmico o altitud, que afectan el metabolismo y la eficiencia de utilización de nutrientes.

Una vez que se identifique el porcentaje con mejores resultados, servirá como información valiosa para los productores de la región, brindándoles una solución práctica y validada que reduce pérdidas económicas y mejora la competitividad avícola local. De acuerdo con el CONCYTEC (33), la investigación aplicada “está dirigida a determinar, a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede cubrir una necesidad reconocida y específica”.

4.1.2 Nivel de investigación

Esta investigación es de nivel explicativo porque va más allá de describir o correlacionar fenómenos, y se propone responder por las causas del impacto del fósforo disponible en las características morfológicas de los órganos e integridad ósea de pollos de engorde Cobb 500. Mediante un diseño experimental controlado con cuatro niveles de fósforo disponible (0,26 %, 0,31 %, 0,36 % y 0,41 %), la investigación busca establecer relaciones de causalidad entre la variable independiente (niveles de fósforo) y las variables dependientes (las características



morfométricas de los órganos e integridad ósea), formulando y contrastando hipótesis específicas que explican cómo y por qué niveles óptimos de fósforo (0,36 %) mejoran significativamente los indicadores de calidad ósea, peso de órganos viscerales y morfometría en estas aves criadas en condiciones altoandinas. De acuerdo con Hernández-Sampieri (34), en los estudios de nivel explicativo de enfoque cuantitativo se busca identificar las causas de los fenómenos y las relaciones de causalidad entre variables, por lo que requieren la formulación y comprobación de hipótesis, al igual que los estudios correlacionales.

4.2 Diseño de la investigación

La investigación tuvo un diseño experimental en el que se emplearon 80 pollos de engorde de la línea Cobb 500, los cuales fueron criados en las instalaciones de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAMBA en la ciudad de Abancay. El experimento tuvo una duración de 34 días. La temperatura y humedad se controlaron mediante un termostato. Se establecieron cuatro tratamientos, de los cuales uno fue el tratamiento control y los otros tres incluyeron distintos niveles de fósforo disponible. La recopilación de datos se realizó en la fase de acabado, al día 34, en el Laboratorio de Anatomía de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

4.3 Descripción ética de la investigación

La presente investigación se desarrolló considerando los principios de bienestar animal, manejo responsable y reducción del sufrimiento durante todas las etapas experimentales. Los pollos de engorde Cobb 500 fueron alojados en instalaciones previamente acondicionadas, limpiadas y desinfectadas, con disponibilidad permanente de alimento y agua *ad libitum*. Asimismo, se controlaron las condiciones ambientales de temperatura y humedad mediante el uso de calefactor a gas y termostato, con el propósito de mantener un ambiente adecuado para las aves durante el periodo experimental.

El manejo de las unidades experimentales se realizó procurando minimizar el estrés, evitar lesiones y preservar su estado sanitario. Para ello, se restringió el ingreso de personas no autorizadas al galpón, reduciendo el riesgo de contaminación o transmisión de enfermedades. Las aves fueron distribuidas en tratamientos según los niveles de fósforo disponible establecidos en la investigación, sin someterlas a procedimientos innecesarios que afectaran su bienestar más allá de los requeridos para el cumplimiento de los objetivos científicos. Al finalizar el experimento, el beneficio de las aves se realizó mediante



dislocación cervical, método aplicado con la finalidad de provocar una muerte rápida y reducir el sufrimiento animal. Posteriormente, se procedió a la extracción de órganos y estructuras óseas para las evaluaciones correspondientes, realizando las mediciones en el menor tiempo posible para evitar alteraciones post mortem. En todo momento, el manejo de los animales y de las muestras se efectuó con responsabilidad, respetando los criterios éticos aplicables a investigaciones con animales de producción y garantizando que el uso de las aves estuviera justificado por la relevancia científica y productiva del estudio.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población estuvo conformada por 80 pollos de engorde de la línea Cobb 500, machos y hembras, criados desde el primer día de vida hasta los 34 días de edad, clínicamente sanos y con pesos homogéneos. Las aves fueron alojadas y manejadas en las instalaciones de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, en la ciudad de Abancay.

4.4.2 Muestra

La muestra estuvo constituida por 20 pollos de engorde Cobb 500, cinco por cada tratamiento (T1, T2, T3 y T4), seleccionados completamente al azar entre las 20 aves alojadas en cada uno. La unidad experimental fue el ave individual sacrificada al día 34, de modo que cada tratamiento contó con cinco repeticiones y el experimento con 20 unidades experimentales en total ($n = 5$ por tratamiento). Las 60 aves restantes no fueron sacrificadas ni incluidas en la evaluación de las variables de respuesta y, por lo tanto, no intervienen en el análisis estadístico.

4.5 Procedimiento

4.5.1 Instalaciones

Las instalaciones contaron con adecuaciones necesarias para los cuatro tratamientos y así mantener el diseño completamente aleatorizado.

4.5.2 Tratamientos

Se establecieron cuatro tratamientos con variaciones en el porcentaje de fósforo disponible en la dieta para las 80 aves. Esta dieta estuvo compuesta por maíz grano, harina de soya, afrecho de trigo, aceite de soya, fosfato dicálcico, carbonato de calcio, sal común, bicarbonato de sodio, DL-Metionina, L-Lisina HCL, L-Treonina, Cloruro



de colina al 60%, Premix, Zinc Bacitracina, Secuestrante de micotoxinas, Antioxidante y distintos niveles de fósforo disponible. Cabe precisar que, para mantener constantes la energía metabolizable y el perfil de nutrientes al modificar el aporte de fosfato dicálcico y de carbonato de calcio, el porcentaje de cloruro de colina al 60 % se ajustó de forma decreciente entre T1 y T4 (0,356 %, 0,350 %, 0,256 % y 0,162 %, respectivamente), tal como se detalla en la Tabla 2. Esta variación se toma en cuenta al interpretar los resultados de morfometría hepática y se declara entre las limitaciones del estudio.

Los tratamientos fueron los siguientes:

Tratamiento 1: 0,26 % de fósforo disponible

Tratamiento 2: 0,31 % de fósforo disponible (control)

Tratamiento 3: 0,36 % de fósforo disponible

Tratamiento 4: 0,41 % de fósforo disponible

Durante todo el experimento, el alimento y el agua se suministraron *ad libitum*.



Tabla 2. Composición porcentual de los ingredientes

INGREDIENTES	Niveles de Fósforo Disponible			
	T1	T2	T3	T4
Maíz grano (6,92 % PC)	52,411	52,411	52,411	52,411
Harina de soya (45 % PC)	34,276	34,276	34,276	34,276
Afrecho de trigo	0,050	0,050	0,050	0,050
Aceite de soya	8,472	8,472	8,472	8,472
Fosfato dicálcico	0,825	1,096	1,366	1,636
Carbonato de calcio	0,829	0,664	0,498	0,333
Sal común	0,050	0,052	0,075	0,099
Bicarbonato de sodio	0,626	0,624	0,589	0,554
DL-Metionina	0,283	0,283	0,283	0,283
L-Lisina HCL	0,142	0,142	0,142	0,142
L-Treonina	0,061	0,061	0,061	0,061
Cloruro de colina 60%	0,356	0,350	0,256	0,162
Premix	0,380	0,380	0,380	0,380
Zinc Bacitracina	0,380	0,380	0,380	0,380
Secuestrante de micotoxinas	0,380	0,380	0,380	0,380
Antioxidante	0,478	0,380	0,380	0,380
TOTAL, %	100,000	100,000	100,000	100,000

Tabla 3. Contenido nutricional calculado de los tratamientos

NUTRIENTES	T1	T2	T3	T4
Energía metabolizable, Kcal/Kg	3250	3250	3250	3250
Proteína cruda, %	19,540	19,540	19,540	19,540
Calcio total, %	0,661	0,661	0,661	0,661
Fósforo disponible, %	0,260	0,310	0,360	0,410
Sodio, %	0,201	0,201	0,201	0,201
Cloro, %	0,175	0,175	0,175	0,175
Potasio, %	0,796	0,796	0,796	0,796
Lisina, %	1,176	1,176	1,176	1,176
Metionina, %	0,563	0,563	0,563	0,563
Metionina + Cisteína, %	0,871	0,871	0,871	0,871
Treonina, %	0,812	0,812	0,812	0,812
Triptófano, %	0,246	0,246	0,246	0,246
Arginina, %	1,322	1,322	1,322	1,322
Glicina + Serina, %	1,849	1,849	1,849	1,849
Valina, %	0,929	0,929	0,929	0,929
Isoleucina, %	0,851	0,851	0,851	0,851
Leucina, %	1,644	1,644	1,644	1,644
Histidina, %	0,522	0,522	0,522	0,522
Fenilalanina, %	0,975	0,975	0,975	0,975
Fenilalanina + Tirosina, %	1,670	1,670	1,670	1,670

Tabla 4. Niveles de nutrientes recomendados para broilers medianos y grandes

		Fase de acabado
Cantidad de alimento	g	2100
Proteína cruda	%	17 – 18
Energía metabolizable	Kcal / kg	3100
Aminoácidos Digestibles		
Lisina	%	0,96
Metionina	%	0,40
Metionina + Cistina	%	0,74
Triptofano	%	0,17
Treonina	%	0,62
Arginina	%	1,05
Valina	%	0,74
Isoleucina	%	0,63
Leucina	%	1,06
Minerales		
Calcio	%	0,72
Fósforo disponible	%	0,36
Sodio	%	0.16 – 0.23
Cloro	%	0.16 – 0.30
Potasio	%	0.60 – 0.95
Acido linoleico	%	1,00

Fuente: (1).

4.6 Técnica e instrumentos

4.6.1 Adecuación y equipamiento del galpón

Para la adecuación del galpón se utilizaron los siguientes materiales:

- Calaminas
- Rafia
- Maderas
- Clavos y Martillos
- Malla
- Comederos
- Bebederos
- Focos
- Calefactor a gas
- Termostato
- Pediluvio y cal



Una vez que se concluyó la adecuación del galpón, se llevó a cabo la limpieza y desinfección de este según las indicaciones proporcionadas por el asesor, PhD. Jhonatan Steve Inca Moreano. Adicionalmente, se restringió el acceso de personas no autorizadas a las instalaciones con el fin de prevenir posibles enfermedades.

4.6.2 Obtención de estructuras corporales y huesos

Los animales fueron beneficiados mediante el método de dislocación cervical, luego fueron desangrados e inmediatamente después se extrajeron los órganos: hígado, proventrículo, molleja y corazón. Estas mediciones se realizaron en un plazo no mayor a dos horas desde el sacrificio para evitar posibles alteraciones *post mortem* (35). Posteriormente se removió la pechuga junto con la quilla, la cual se pesó inicialmente con la quilla y luego sin esta.

Se procedió a la separación de los fémures, tibias, tarsos y quillas, los cuales fueron colocados en mallas mosquiteras previamente etiquetadas para garantizar precisión en la experimentación. Luego, se llevó a cabo la remoción manual de la mayor cantidad posible de piel adherida. A continuación, para eliminar aproximadamente el 80 % de grasa (36), se sumergieron en agua hervida durante 15 minutos para facilitar la eliminación manual del resto de la piel (29) (37). El procedimiento se aplicó de manera uniforme a las muestras de los cuatro tratamientos, por lo que cualquier efecto sobre el tejido óseo incide por igual en los grupos comparados y no altera el sentido de las diferencias entre tratamientos. No obstante, la inmersión en agua a temperatura de ebullición desnaturaliza el colágeno de la matriz orgánica y puede modificar el peso y el volumen del hueso y, por consiguiente, la densidad y los índices calculados a partir de ellos. Por esa razón, los valores absolutos aquí informados no son directamente comparables con los de estudios que emplean limpieza manual o digestión enzimática en frío, y así se declara entre las limitaciones del estudio.

Posteriormente, las muestras se dejaron secar durante un período de 7 días en recipientes de plástico con orificios para prevenir la acumulación de humedad, y se procedió a iniciar la recopilación de datos de dichas muestras (19). El registro fotográfico del procedimiento experimental se presenta en los Anexos (Figuras 1 a 7). El secado se realizó a temperatura ambiente durante un tiempo fijo y no mediante

dsecación en estufa a 60–105 °C hasta alcanzar peso constante, que es el procedimiento recomendado para garantizar una materia seca uniforme. En consecuencia, el contenido de humedad residual de las muestras no puede considerarse constante, lo que añade una fuente de variación al peso y, por derivación, a la densidad y a los índices de calidad ósea. Al igual que en el caso anterior, el procedimiento fue idéntico para los cuatro tratamientos.

Peso de estructuras corporales

Para analizar esta variable se emplearon los siguientes instrumentos:

- Balanza digital
- Balanza analítica
- Cinta métrica
- Recipientes de plástico

Se llevó a cabo la evaluación del peso de estructuras corporales al día 34 de vida de las unidades experimentales. El peso vivo se determinó mediante el pesaje directo de los pollos justo antes del sacrificio, mientras que el peso de la pechuga con y sin quilla se expresó en gramos. Además, se llevó a cabo el pesaje y la toma de medidas de órganos, como el hígado, proventrículo, molleja y corazón, los cuales se expresaron en gramos y milímetros, respectivamente. Estas mediciones se realizaron al finalizar el proceso de beneficio. El peso de las estructuras óseas (fémur, tibia, tarso y quilla) se determinó con balanza analítica y se expresó en gramos; para el cálculo de la densidad y de los índices de Seedor y de Quetelet, dicho peso se convirtió a miligramos, de acuerdo con las fórmulas correspondientes.

Morfometría

Para analizar esta variable se emplearon los siguientes instrumentos:

- Vernier electrónico
- Balanza analítica
- Probeta

Largo

Se procedió a tomar las medidas de longitud de los fémures, tibias, tarsos y quilla de los pollos, donde se midió desde el extremo de la epífisis proximal hasta el extremo de la epífisis distal. Dichas mediciones se expresaron en milímetros (19).

Diámetro

Para determinar el diámetro de los huesos fémur, tibia y tarso, se midió el ancho de la diáfisis de forma latero-lateral (DLL) y cráneo-caudal (DCC), y de éstas se obtuvo un promedio (6).

$$DP = (DLL + DCC) / 2$$

DP: Diámetro promedio DLL: Diámetro latero lateral DCC: Diámetro cráneo caudal

Volumen

Para calcular el volumen de cada fémur, tibia, tarso y quilla, se empleó una probeta que se llenó con agua hasta alcanzar los 150 mililitros. Posteriormente, se sumergió cada hueso por completo en la probeta y se registró el volumen resultante, expresado en centímetros cúbicos (cm³).

Densidad de los huesos

Se calculó la densidad de los huesos fémur, tibia y tarso de manera directa con la siguiente fórmula (38):

$$\text{Densidad (mg/cm}^3\text{)} = \text{Peso (mg)} / \text{Volumen (cm}^3\text{)}$$

Índice modificado de Seedor

El índice de Seedor se calculó dividiendo el peso del hueso entre su longitud, según la propuesta de este autor en el año de 1993. Este indicador se empleó como estimador indirecto de la densidad ósea, donde un valor más alto sugería una mayor densidad (6). Se expresó en mg/mm. Para realizar esta evaluación, se midió la longitud más extensa del hueso utilizando un vernier electrónico, y el peso se determinó con una balanza analítica.

$$\text{Índice modificado de Seedor} = \text{Peso (mg)} / \text{Largo (mm)}$$

Índice Quetelet

El índice de Quetelet, también conocido como índice de masa corporal, fue propuesto por Adolphe Quetelet alrededor de 1832. Aunque su unidad estándar es kg/m², los valores informados en mg/mm² son numéricamente equivalentes (38). Un índice de Quetelet mayor indica que el hueso tiende a ser relativamente más pesado, pero, al

mismo tiempo, más corto. En contraste, un índice menor sugiere lo opuesto: el hueso es más liviano, pero más largo en relación (39).

$$\text{Índice Quetelet (mg/mm}^2\text{)} = \text{Peso (mg)} / \text{Largo (mm)}^2$$

Índice de robusticidad

Alphonse Riesenfeld propuso este índice en 1972. Se interpretó que, a medida que el índice disminuía, la fortaleza de la estructura del hueso aumentaba (38). Este índice se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Índice de robusticidad} = \text{Largo (cm)} / \text{Peso (g)}^{1/3}$$

Capacidad para caminar

Este método evaluó la prevalencia de enfermedades en las patas mediante la capacidad de caminar de los pollos de engorde, dividida en seis categorías (del 0 al 5), que iban desde caminar normalmente hasta la inmovilidad (32). La evaluación se llevó a cabo justo antes del sacrificio, tomando en cuenta el puntaje mencionado anteriormente. Se determinó el índice del total de huesos evaluados al detener a los pollos y estimularlos suavemente para que caminaran.

Puntaje:

0: Normal.

1: Defectos leves.

2: Anormalidad definida al caminar.

3: Lesión evidente, como cojera o inestabilidad. En estos casos, las aves suelen permanecer postradas.

4: Grave daño y dificultad para caminar.

5: Incapacidad para sostenerse sobre sus patas; requieren el apoyo de las alas y se apoyan sobre los corvejones para su traslado.

Necrosis femoral

La degeneración femoral es la principal anormalidad vinculada a la afección popularmente conocida como “debilidad en las patas”. Después de sacrificar a las aves, las epífisis femorales serán evaluadas macroscópicamente para determinar la presencia o ausencia de necrosis (36). Esta evaluación se hará según la siguiente escala:

1: Hueso sin lesiones.



- 2: Ausencia de cartílago en la cabeza femoral, con el hueso intacto.
- 3: Falta de cartílago en la cabeza femoral, parcialmente rota.
- 4: Considerable daño en la cabeza femoral, pero con el contorno aún visible.
- 5: Rotura completa de la cabeza femoral, sin posibilidad de reconocer su contorno (lesión conocida como epifisiólisis femoral proximal).

4.7 Análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con cuatro tratamientos y cinco repeticiones por tratamiento, en el que la unidad experimental fue el ave individual sacrificada al día 34 ($n = 5$ por tratamiento; 20 unidades experimentales en total). El modelo estadístico lineal aditivo fue (40):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde y_{ij} es la respuesta observada de la j -ésima repetición del i -ésimo tratamiento; μ , la media general del experimento; τ_i , el efecto del i -ésimo tratamiento; y ϵ_{ij} , el término de error aleatorio, con distribución normal, idéntica e independiente.

La normalidad se comprobó con la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la de Levene (ver anexos). Cada variable se analizó con ANOVA de una vía cuando cumplió ambos supuestos y con Kruskal-Wallis cuando no; si el ANOVA resultó significativo, las medias se compararon con Tukey ($\alpha = 0,05$). En todas se calculó el tamaño del efecto (eta cuadrado) con su intervalo de confianza al 95 %. Los análisis se realizaron en SPSS y se resumieron en tablas. Las variables ordinales (capacidad para caminar y necrosis femoral) no admiten prueba de normalidad y se analizaron con Kruskal-Wallis; además de la media y la desviación estándar, se describen mediante la mediana y el rango intercuartílico (RIC), medidas apropiadas para datos medidos en escala ordinal. Debe señalarse que, con cinco repeticiones por tratamiento, los intervalos de confianza del tamaño del efecto resultan necesariamente amplios, por lo que se interpretan como una indicación de la magnitud del efecto y no como una estimación precisa.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

5.1.1 Características morfométricas de los órganos

Tabla 5. Morfometría de órganos internos (peso, ancho y largo) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1 ($\bar{x} \pm DS$)	T2 ($\bar{x} \pm DS$) Grupo control	T3 ($\bar{x} \pm DS$)	T4 ($\bar{x} \pm DS$)	p-Valor	Tamaño del efecto	IC (95 %)
Peso de hígado, g	51,73 $\pm$ 10,54 ^b	62,29 $\pm$ 7,29 ^{ab}	68,40 $\pm$ 5,17 ^a	63,65 $\pm$ 8,49 ^{ab}	0,032	0,41	0,02 – 1,00
Peso de proventrículo, g	7,10 $\pm$ 1,69 ^b	8,48 $\pm$ 1,48 ^{ab}	9,34 $\pm$ 1,96 ^{ab}	10,34 $\pm$ 1,41 ^a	0,041	0,40	0,01 – 1,00
Peso de molleja, g	24,16 $\pm$ 7,88	30,32 $\pm$ 3,86	32,18 $\pm$ 3,60	29,59 $\pm$ 5,50	0,179	0,27	0,00 – 1,00
Peso de corazón, g	15,52 $\pm$ 3,66	18,56 $\pm$ 3,15	19,91 $\pm$ 1,22	15,94 $\pm$ 3,13	0,092	0,32	0,00 – 1,00
Ancho de hígado, mm	70,70 $\pm$ 8,79 ^b	83,59 $\pm$ 6,74 ^{ab}	83,68 $\pm$ 6,08 ^a	83,86 $\pm$ 6,65 ^a	0,024	0,44	0,04 – 1,00
Ancho de proventrículo, mm	19,21 $\pm$ 3,43	19,95 $\pm$ 1,81	20,25 $\pm$ 2,42	20,87 $\pm$ 0,37	0,719	0,08	0,00 – 1,00
Ancho de molleja, mm	43,88 $\pm$ 4,03 ^b	51,65 $\pm$ 3,65 ^a	49,05 $\pm$ 4,20 ^{ab}	45,53 $\pm$ 3,57 ^{ab}	0,025	0,43	0,04 – 1,00
Ancho de corazón, mm	28,11 $\pm$ 6,14	31,20 $\pm$ 1,98	33,02 $\pm$ 2,79	31,33 $\pm$ 2,37	0,434	0,22	0,00 – 1,00
Largo de hígado, mm	79,58 $\pm$ 8,63	86,57 $\pm$ 4,44	88,54 $\pm$ 5,56	91,75 $\pm$ 1,49	0,066	0,44	0,04 – 1,00
Largo de proventrículo, mm	44,57 $\pm$ 3,92	46,41 $\pm$ 4,43	44,36 $\pm$ 6,45	45,52 $\pm$ 3,62	0,896	0,04	0,00 – 1,00
Largo de molleja, mm	57,29 $\pm$ 3,66	55,50 $\pm$ 3,08	62,79 $\pm$ 4,72	57,66 $\pm$ 4,59	0,064	0,36	0,00 – 1,00
Largo de corazón, mm	50,04 $\pm$ 3,87	51,79 $\pm$ 4,91	52,59 $\pm$ 0,86	50,36 $\pm$ 3,77	0,665	0,09	0,00 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

^{a-b} Letras distintas indican diferencias significativas.

En la Tabla 5, cuatro de las doce variables presentaron diferencias significativas: el peso del hígado ($p = 0,032$), mayor en T3 ($68,40 \pm 5,17$ g) que en T1 ($51,73 \pm 10,54$ g); el peso del proventrículo ($p = 0,041$), mayor en T4 ($10,34 \pm 1,41$ g) que en T1 ($7,10 \pm 1,69$ g); el ancho del hígado ($p = 0,024$), menor en T1 ($70,70 \pm 8,79$ mm) que en T3 ($83,68 \pm 6,08$ mm) y T4 ($83,86 \pm 6,65$ mm); y el ancho de la molleja ($p = 0,025$), mayor en T2 ($51,65 \pm 3,65$ mm) que en T1 ($43,88 \pm 4,03$ mm). En las cuatro, T1 registró el valor más bajo. Las ocho variables restantes no difirieron entre tratamientos ($p > 0,05$). El tamaño del efecto de las variables significativas fue grande (entre 0,40 y 0,44), aunque el límite superior de su intervalo de confianza llegó a 1,00 en todos los casos.



5.1.2 Integridad ósea

Tabla 6. Morfometría ósea (peso, largo y diámetro) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1 ($\bar{x} \pm DS$)	T2 ($\bar{x} \pm DS$) Grupo control	T3 ($\bar{x} \pm DS$)	T4 ($\bar{x} \pm DS$)	p-Valor	Tamaño del efecto	IC (95 %)
Peso de fémur, g	4,95 $\pm$ 1,84	5,87 $\pm$ 0,90	6,29 $\pm$ 0,81	5,75 $\pm$ 0,97	0,381	0,17	0,00 – 1,00
Peso de tibia, g	6,89 $\pm$ 2,16	8,29 $\pm$ 1,07	9,24 $\pm$ 1,01	7,92 $\pm$ 1,53	0,146	0,28	0,00 – 1,00
Peso de tarso, g	3,94 $\pm$ 1,16	4,97 $\pm$ 1,12	5,20 $\pm$ 0,71	4,86 $\pm$ 0,64	0,197	0,25	0,00 – 1,00
Peso de quilla, g	4,53 $\pm$ 0,99 ^b	6,54 $\pm$ 0,79 ^a	6,06 $\pm$ 1,04 ^{ab}	5,34 $\pm$ 0,70 ^{ab}	0,014	0,48	0,08 – 1,00
Largo de fémur, mm	67,68 $\pm$ 5,15	68,27 $\pm$ 1,40	70,97 $\pm$ 1,24	68,77 $\pm$ 3,81	0,450	0,15	0,00 – 1,00
Largo de tibia, mm	90,15 $\pm$ 5,58	92,29 $\pm$ 2,68	96,86 $\pm$ 2,75	93,29 $\pm$ 4,39	0,105	0,31	0,00 – 1,00
Largo de tarso, mm	66,73 $\pm$ 5,19	68,72 $\pm$ 1,85	71,66 $\pm$ 2,03	68,57 $\pm$ 3,26	0,180	0,26	0,00 – 1,00
Largo de quilla, mm	50,77 $\pm$ 5,92	49,91 $\pm$ 5,38	51,76 $\pm$ 5,11	49,12 $\pm$ 1,49	0,839	0,05	0,00 – 1,00
Diámetro de fémur, mm	8,86 $\pm$ 1,24	9,71 $\pm$ 0,78	9,49 $\pm$ 0,40	9,90 $\pm$ 0,83	0,286	0,20	0,00 – 1,00
Diámetro de tibia, mm	8,01 $\pm$ 1,11	8,81 $\pm$ 0,80	9,04 $\pm$ 0,40	8,80 $\pm$ 0,47	0,186	0,25	0,00 – 1,00
Diámetro de tarso, mm	9,80 $\pm$ 1,20	10,47 $\pm$ 0,43	11,11 $\pm$ 0,18	10,61 $\pm$ 0,52	0,061	0,36	0,00 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

^{a-b} Letras distintas indican diferencias significativas.

En la Tabla 6, de las once variables de morfometría ósea solo el peso de la quilla difirió entre tratamientos ($p = 0,014$), con el valor más alto en T2 (6,54 $\pm$ 0,79 g) y el más bajo en T1 (4,53 $\pm$ 0,99 g); es además la variable con mayor tamaño del efecto de la tabla (0,48; IC 95 %: 0,08 – 1,00). El peso, el largo y el diámetro del fémur, la tibia y el tarso, así como el largo de la quilla, no mostraron diferencias ($p > 0,05$). Los valores más próximos a la significancia fueron los del diámetro del tarso ($p = 0,061$) y el largo de la tibia ($p = 0,105$).

Tabla 7. Calidad ósea (volumen y densidad) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1 ($\bar{x} \pm DS$)	T2 ($\bar{x} \pm DS$) Grupo control	T3 ($\bar{x} \pm DS$)	T4 ($\bar{x} \pm DS$)	p-Valor	Tamaño o del efecto	IC (95 %)
Volumen de fémur, cm ³	2,91 ± 0,78	3,30 ± 0,42	3,25 ± 0,44	2,87 ± 0,31	0,447	0,15	0,00 – 1,00
Volumen de tibia, cm ³	3,79 ± 1,36	4,44 ± 0,73	5,04 ± 0,49	4,10 ± 0,55	0,162	0,27	0,00 – 1,00
Volumen de tarso, cm ³	2,02 ± 0,59	2,56 ± 0,49	2,72 ± 0,30	2,27 ± 0,23	0,085	0,33	0,00 – 1,00
Volumen de quilla, cm ³	2,32 ± 0,66	2,52 ± 0,43	3,02 ± 0,48	2,70 ± 0,46	0,216	0,24	0,00 – 1,00
Densidad de fémur izquierdo, mg/cm ³	1652,6 ± 235,1 ^a	1770,9 ± 102,6 ^a	2020,0 ± 349,2 ^a	2143,5 ± 341,8 ^a	0,047	0,38	0,00 – 1,00
Densidad de fémur derecho, mg/cm ³	1695,9 ± 218,0	1802,1 ± 229,4	1894,5 ± 293,2	1885,6 ± 139,8	0,497	0,13	0,00 – 1,00
Densidad de tibia izquierda, mg/cm ³	1847,2 ± 261,5	1787,8 ± 155,2	1740,4 ± 126,0	1839,5 ± 263,4	0,840	0,05	0,00 – 1,00
Densidad de tibia derecha, mg/cm ³	1842,5 ± 204,7	1992,8 ± 309,6	1935,6 ± 238,5	2017,9 ± 154,7	0,653	0,09	0,00 – 1,00
Densidad de tarso izquierdo, mg/cm ³	2075,1 ± 406,7	2006,4 ± 145,0	1858,1 ± 260,7	2178,4 ± 395,2	0,676	0,14	0,00 – 1,00
Densidad de tarso derecho, mg/cm ³	1905,2 ± 413,1	1860,0 ± 110,7	2021,0 ± 424,0	2137,7 ± 199,3	0,527	0,13	0,00 – 1,00
Densidad de quilla, mg/cm ³	1986,5 ± 173,8 ^b	2626,7 ± 315,6 ^a	2020,5 ± 325,5 ^b	2024,9 ± 408,4 ^b	0,015	0,47	0,07 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

^{a-b} Letras distintas indican diferencias significativas. En la densidad de fémur izquierdo los cuatro tratamientos comparten la misma letra: el ANOVA resultó significativo, pero la prueba de Tukey no separó ningún par de medias.

En la Tabla 7, ninguna de las cuatro variables de volumen difirió entre tratamientos ($p > 0,05$). En densidad, el fémur izquierdo alcanzó significancia ($p = 0,047$), con el valor más alto en T4 ($2143,5 \pm 341,8$ mg/cm³) y el más bajo en T1 ($1652,6 \pm 235,1$ mg/cm³), si bien la prueba de Tukey no llegó a separar ningún par de tratamientos, motivo por el cual los cuatro comparten la misma letra. La densidad de la quilla también difirió ($p = 0,015$): T2 ($2626,7 \pm 315,6$ mg/cm³) superó a T1, T3 y T4. En ambos casos el tamaño del efecto fue grande (0,38 y 0,47), con intervalos de confianza amplios.

Tabla 8. Calidad ósea (índice modificado de Seedor de fémur, tibia, tarso y quilla) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1 ($\bar{x} \pm DS$)	T2 ($\bar{x} \pm DS$) Grupo control	T3 ($\bar{x} \pm DS$)	T4 ($\bar{x} \pm DS$)	p-Valor	Tamaño o del efecto	IC (95 %)
Índice modificado de Seedor de fémur izquierdo	72,08 $\pm$ 25,99	88,86 $\pm$ 12,37	88,14 $\pm$ 12,78	82,64 $\pm$ 11,94	0,394	0,17	0,00 – 1,00
Índice modificado de Seedor de fémur derecho	71,86 $\pm$ 16,67	83,01 $\pm$ 13,96	88,93 $\pm$ 10,86	84,11 $\pm$ 9,64	0,246	0,22	0,00 – 1,00
Índice modificado de Seedor de tibia izquierda	77,69 $\pm$ 22,31	88,55 $\pm$ 11,35	90,29 $\pm$ 3,81	84,66 $\pm$ 14,69	0,549	0,12	0,00 – 1,00
Índice modificado de Seedor de tibia derecha	73,46 $\pm$ 15,86 ^b	90,92 $\pm$ 10,64 ^{ab}	100,18 $\pm$ 14,03 ^a	84,11 $\pm$ 13,13 ^{ab}	0,041	0,39	0,01 – 1,00
Índice modificado de Seedor de tarso izquierdo	56,21 $\pm$ 13,43	75,74 $\pm$ 17,58	73,32 $\pm$ 8,88	70,96 $\pm$ 8,11	0,102	0,31	0,00 – 1,00
Índice modificado de Seedor de tarso derecho	60,73 $\pm$ 15,76	68,58 $\pm$ 12,49	71,59 $\pm$ 9,20	70,41 $\pm$ 5,65	0,454	0,15	0,00 – 1,00
Índice modificado de Seedor de quilla	89,51 $\pm$ 19,01 ^b	132,27 $\pm$ 20,32 ^a	116,34 $\pm$ 9,57 ^{ab}	108,79 $\pm$ 13,78 ^{ab}	0,006	0,53	0,13 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

^{a-b} Letras distintas indican diferencias significativas.

En la Tabla 8, el índice modificado de Seedor difirió entre tratamientos en dos de los siete huesos: la tibia derecha ($p = 0,041$), con el mayor valor en T3 (100,18 $\pm$ 14,03 mg/mm) y el menor en T1 (73,46 $\pm$ 15,86 mg/mm), y la quilla ($p = 0,006$), donde T2 (132,27 $\pm$ 20,32 mg/mm) superó a T1 (89,51 $\pm$ 19,01 mg/mm). La quilla presentó el mayor tamaño del efecto de la tabla (0,53; IC 95 %: 0,13 – 1,00). En ambos huesos T1 registró el valor más bajo, lo que indica huesos proporcionalmente más livianos respecto de su longitud.

Tabla 9. Calidad ósea (Índice de Quetelet de fémur, tibia, tarso y quilla) de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1 ($\bar{x} \pm DS$)	T2 ($\bar{x} \pm DS$) Grupo control	T3 ($\bar{x} \pm DS$)	T4 ($\bar{x} \pm DS$)	<i>p</i> -valor	Tamaño o del efecto	IC (95 %)
Índice de Quetelet de fémur izquierdo	1,05 ± 0,30	1,30 ± 0,16	1,24 ± 0,16	1,20 ± 0,15	0,304	0,20	0,00 – 1,00
Índice de Quetelet de fémur derecho	1,05 ± 0,17	1,22 ± 0,21	1,25 ± 0,13	1,22 ± 0,12	0,245	0,22	0,00 – 1,00
Índice de Quetelet de tibia izquierda	0,85 ± 0,19	0,96 ± 0,11	0,93 ± 0,03	0,90 ± 0,12	0,585	0,11	0,00 – 1,00
Índice de Quetelet de tibia derecha	0,81 ± 0,14 ^b	0,98 ± 0,10 ^{ab}	1,03 ± 0,12 ^a	0,90 ± 0,11 ^{ab}	0,041	0,40	0,01 – 1,00
Índice de Quetelet de tarso izquierdo	0,83 ± 0,16	1,10 ± 0,24	1,02 ± 0,10	1,03 ± 0,08	0,089	0,33	0,00 – 1,00
Índice de Quetelet de tarso derecho	0,91 ± 0,20	0,99 ± 0,16	1,00 ± 0,11	1,03 ± 0,07	0,616	0,10	0,00 – 1,00
Índice de Quetelet de quilla	1,79 ± 0,47	2,71 ± 0,73	2,25 ± 0,10	2,22 ± 0,29	0,068	0,38	0,00 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

^{a-b} Letras distintas indican diferencias significativas.

En la Tabla 9, el índice de Quetelet solo difirió en la tibia derecha ($p = 0,041$), mayor en T3 ($1,03 \pm 0,12$ mg/mm²) que en T1 ($0,81 \pm 0,14$ mg/mm²), con un tamaño del efecto grande (0,40). Los seis huesos restantes no mostraron diferencias ($p > 0,05$); el valor más próximo a la significancia fue el de la quilla ($p = 0,068$). El resultado de la tibia derecha coincide con el observado en el índice modificado de Seedor para ese mismo hueso (Tabla 8).

Tabla 10. Índice de robusticidad de huesos de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1 ($\bar{x} \pm DS$)	T2 ($\bar{x} \pm DS$) Grupo control	T3 ($\bar{x} \pm DS$)	T4 ($\bar{x} \pm DS$)	<i>p</i> - Valor	Tamaño o del efecto	IC (95 %)
Índice de robusticidad de fémur izquierdo	4,05 ± 0,31	3,76 ± 0,15	3,86 ± 0,16	3,87 ± 0,17	0,194	0,25	0,00 – 1,00
Índice de robusticidad de fémur derecho	4,02 ± 0,16	3,84 ± 0,21	3,86 ± 0,13	3,83 ± 0,13	0,248	0,22	0,00 – 1,00
Índice de robusticidad de tibia izquierda	4,75 ± 0,25	4,59 ± 0,19	4,70 ± 0,06	4,70 ± 0,14	0,502	0,13	0,00 – 1,00
Índice de robusticidad de tibia derecha	4,84 ± 0,22	4,56 ± 0,15	4,55 ± 0,14	4,71 ± 0,16	0,161	0,37	0,00 – 1,00
Índice de robusticidad de tarso izquierdo	4,35 ± 0,26	4,00 ± 0,30	4,13 ± 0,11	4,06 ± 0,09	0,081	0,34	0,00 – 1,00
Índice de robusticidad de tarso derecho	4,20 ± 0,27	4,13 ± 0,20	4,16 ± 0,15	4,05 ± 0,11	0,643	0,10	0,00 – 1,00
Índice de robusticidad de quilla	3,09 ± 0,34	2,67 ± 0,29	2,84 ± 0,13	2,82 ± 0,13	0,094	0,32	0,00 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media ± desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

^{a-b} Letras distintas indican diferencias significativas.

En la Tabla 10, el índice de robusticidad no difirió entre tratamientos en ninguno de los siete huesos ($p > 0,05$); los valores más próximos a la significancia fueron los del tarso izquierdo ($p = 0,081$) y la quilla ($p = 0,094$). Aunque los tamaños del efecto alcanzaron hasta 0,37, el límite inferior de su intervalo de confianza fue 0,00 en todos los casos. Dado que un menor índice de robusticidad se asocia con una estructura ósea más resistente, los niveles de fósforo disponible evaluados no modificaron la resistencia estructural relativa de los huesos.

5.1.3 Evaluación de funcionalidad locomotora

Tabla 11. Capacidad para caminar de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1	T2 Grupo control	T3	T4	p- Valor	Tamaño o del efecto	IC (95 %)
Capacidad para caminar	2,2 ± 0,45 2 (2 – 2)	2,6 ± 0,55 3 (2 – 3)	2,0 ± 1,00 2 (1 – 3)	2,6 ± 1,14 3 (2 – 3)	0,587	0,11	0,00 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

Escala: 0 = normal; 5 = incapacidad total para caminar.

En cada celda de tratamiento, la primera línea corresponde a la media $\pm$ desviación estándar y la segunda, a la mediana con su rango intercuartílico (RIC).

En la Tabla 11, la capacidad para caminar no difirió entre tratamientos ($p = 0,587$). Por tratarse de una variable ordinal, la descripción pertinente es la mediana: T1 y T3 registraron 2 puntos y T2 y T4, 3 puntos, con rangos intercuartílicos que se sobreponen por completo entre los cuatro grupos. El tamaño del efecto fue moderado (0,11) y su intervalo de confianza (0,00 – 1,00) no permite atribuirlo a un efecto real del fósforo disponible.

5.1.4 Evaluación de condición patológica

Tabla 12. Índice de necrosis femoral de pollos de engorde Cobb 500 alimentados con diferentes niveles de fósforo disponible

Variables	T1	T2 Grupo control	T3	T4	p- valor	Tamaño o del efecto	IC (95 %)
Necrosis femoral	1,6 ± 1,34 1 (1 – 1)	1,2 ± 0,45 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	1,0 ± 0,00 1 (1 – 1)	0,549	0,13	0,00 – 1,00

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

$\bar{x} \pm DS$: media $\pm$ desviación estándar, IC: intervalo de confianza.

Escala: 1 = sin lesiones; 5 = epifisiólisis femoral proximal (rotura completa).

En cada celda de tratamiento, la primera línea corresponde a la media $\pm$ desviación estándar y la segunda, a la mediana con su rango intercuartílico (RIC).

En la Tabla 12, el índice de necrosis femoral tampoco difirió entre tratamientos ($p = 0,549$). La mediana fue de 1 punto (hueso sin lesiones) en los cuatro tratamientos, con un rango intercuartílico de 1 a 1 en todos ellos: la media algo más alta de T1 (1,6 $\pm$ 1,34) procede de una sola ave con grado 4, mientras que las otras cuatro no presentaron lesión alguna. El tamaño del efecto fue moderado (0,13) y su intervalo de confianza (0,00 – 1,00) no ofrece precisión suficiente para respaldar un efecto



real.

5.2 Discusión

Los diferentes niveles de fósforo disponible influyeron sobre algunas características morfológicas de los órganos: el peso del hígado, el peso del proventrículo, el ancho del hígado y el ancho de la molleja difirieron entre tratamientos ($p < 0,05$), mientras que el largo del hígado, el peso del corazón y el peso de la molleja no lo hicieron. El efecto se concentró, por tanto, en los órganos que intervienen en la digestión y en el aprovechamiento del alimento.

El tamaño de los órganos depende sobre todo de las hormonas que regulan el crecimiento y no del fósforo de manera directa; lo que aporta este mineral es el soporte que esas hormonas necesitan para actuar, pues participa en la obtención de energía y en la formación de las proteínas con las que se construyen los tejidos. En ese sentido, Parmer et al. (28) demostraron que la deficiencia de fósforo en pollos de engorde reduce la hormona de crecimiento en sangre y altera el peso de órganos como el corazón y los riñones, lo que respalda que el mayor desarrollo observado con los niveles más altos responda a una mejor disponibilidad de ese soporte y no a una acción hormonal del propio mineral.

El aumento progresivo del peso y de las dimensiones del hígado conforme subió el nivel de fósforo disponible se explica por esa misma función: el mineral interviene en la producción de energía, en el aprovechamiento de las proteínas y los carbohidratos, en la formación del material genético y en el equilibrio entre el calcio y el fósforo del organismo, mediante la activación de la vitamina D. En la misma línea, Cowieson et al. (2020) (16) demostraron que aumentar el fósforo disponible en dietas de pollos de engorde mejoró la conversión alimenticia y el aprovechamiento de los nutrientes, lo que coincide con el mayor peso del hígado y del proventrículo obtenido en esta investigación. Omotoso et al. (2023) (12), por su parte, encontraron que las aves alimentadas con dietas deficientes en fósforo pesaron menos, comieron menos y crecieron peor; aunque evaluaron sobre todo parámetros productivos y óseos, sus resultados respaldan la importancia del mineral en el desarrollo del ave, del que el crecimiento de los órganos forma parte. Debe precisarse, no obstante, que el cloruro de colina al 60 % disminuyó de forma paralela al aumento del fósforo disponible, de 0,356 % en T1 a 0,162 % en T4 (Tabla 2). Al tratarse de un compuesto lipotrópico que interviene directamente en el metabolismo de la grasa hepática, el efecto observado sobre el peso del hígado ($p = 0,032$) y sobre su ancho no puede atribuirse de

manera exclusiva al fósforo disponible: ambos nutrientes variaron simultáneamente entre tratamientos y sus efectos quedan, por tanto, confundidos. Esta limitación se desarrolla en el apartado correspondiente y obliga a interpretar con cautela la respuesta morfométrica hepática.

En la molleja no se hallaron diferencias en el peso, pero sí en el ancho. Catalan et al. (2016) (10) reportaron un mayor peso relativo de la molleja con dietas altas en fósforo fitato y, además, un mayor peso del hígado con dietas bajas en ese fósforo, resultado contrario al de esta investigación, donde los hígados más pesados se registraron con 0,36 % de fósforo disponible. La diferencia se explica porque dichos autores evaluaron el fósforo ligado al fitato junto con la suplementación de fitasa, mientras que aquí se modificó el nivel de fósforo disponible manteniendo constantes la energía metabolizable y la proteína cruda de la dieta, de modo que el hígado respondió a la cantidad de fósforo que el ave podía absorber directamente. Li X.K. et al. (2016) (11) observaron asimismo que tanto la falta como el exceso del mineral modifican la grasa acumulada en el hígado, lo que confirma que este órgano responde a las variaciones del fósforo de la dieta.

En cuanto a la integridad ósea, el peso, el largo y el diámetro del fémur, la tibia y el tarso, así como el largo de la quilla, no presentaron diferencias entre tratamientos ($p > 0,05$); únicamente el peso de la quilla difirió ($p = 0,014$), con el valor más alto en T2 (0,31 % de fósforo disponible) y el más bajo en T1 (0,26 %). Esto sugiere que los niveles evaluados fueron suficientes para sostener el desarrollo del esqueleto. Cabe precisar que el nivel recomendado para el pollo Cobb 500 en la fase de acabado es 0,36 % (1), de manera que solo T3 y T4 lo alcanzaron o superaron; aun así, T1 y T2 no mostraron un esqueleto deteriorado, lo que indica que el ave conservó su equilibrio mineral mediante los mecanismos hormonales descritos en el marco teórico, que ajustan cuánto fósforo se absorbe en el intestino y cuánto se moviliza desde el hueso.

Cowieson et al. (2020) (16) y Li T. et al. (2020) (14) coinciden en que, una vez cubierta la necesidad del ave, aumentar el fósforo aporta poco: el crecimiento se mantiene sin alteraciones importantes y los incrementos adicionales no siempre se traducen en mejoras de las medidas del hueso. Estos antecedentes concuerdan con lo observado, ya que los niveles evaluados, incluidos los dos que quedaron por debajo de la referencia, no representaron una carencia lo bastante severa o prolongada como para comprometer la integridad ósea.



La quilla fue la única estructura ósea con un peso distinto entre tratamientos, superior con 0,31 % de fósforo disponible. Durante el crecimiento, esta pieza conserva una porción de cartílago que después se endurece y se mineraliza, por lo que el nivel intermedio pudo favorecer ese proceso; como el largo de la quilla no varió, el mayor peso se relaciona más con un cambio en la composición del tejido que con un cambio de tamaño. Omotoso et al. (2023) (12) también señalan que una adecuada disponibilidad de fósforo favorece la mineralización del esqueleto, aunque en esta investigación no se observaron diferencias en el fémur, la tibia ni el tarso, discrepancia que podría atribuirse a las condiciones climáticas de la ciudad de Abancay. Wei et al. (15) añaden que la respuesta del hueso no depende solo de la cantidad de fósforo, sino también de su relación con el calcio, de la edad del ave y de la velocidad de crecimiento; bajo esa premisa, el fémur, la tibia y el tarso se mantuvieron sin cambios, mientras que la quilla, por estar en pleno desarrollo, respondió con mayor claridad.

El volumen del fémur, la tibia, el tarso y la quilla no difirió entre tratamientos ($p > 0,05$), es decir que los niveles evaluados (0,26 a 0,41 %) no modificaron el tamaño de los huesos. En cambio, el ANOVA detectó diferencias en la densidad del fémur izquierdo ($p = 0,047$), con el valor más alto en T4 y el más bajo en T1; sin embargo, la prueba de Tukey no separó ningún par de tratamientos, por lo que ese resultado no permite afirmar formalmente un efecto del fósforo disponible sobre dicha variable. La densidad de la quilla sí difirió ($p = 0,015$), con el valor más alto en T2 y separación confirmada por Tukey frente a T1, T3 y T4. El fósforo disponible influyó, entonces, más sobre la mineralización que sobre el crecimiento del hueso, porque forma parte del mineral que le da dureza. Estos hallazgos coinciden en parte con Li et al. (2020) (14), quienes reportaron menor densidad y menor resistencia de la tibia con dietas deficientes en fósforo, y con Uculmana et al. (2018) (19), quienes tampoco encontraron diferencias de volumen, pero sí de densidad al modificar la relación calcio:fósforo.

El índice modificado de Seedor, que estima de forma indirecta cuán mineralizado está el hueso, difirió en la tibia derecha ($p = 0,041$) y en la quilla ($p = 0,006$), con los valores más bajos en T1; es decir, con el menor nivel de fósforo disponible los huesos resultaron proporcionalmente más livianos respecto de su longitud. El índice de Quetelet, que expresa la misma idea, difirió solo en la tibia derecha ($p = 0,041$), donde T3 superó a T1. En los demás huesos no hubo diferencias ($p > 0,05$), lo que sugiere que el efecto se concentró en



las estructuras de mayor crecimiento. Li et al. (2020) (14) y Omotoso et al. (2023) (12) describen igualmente menor mineralización y peor calidad del hueso, sobre todo de la tibia, cuando el fósforo es insuficiente, mientras que Uculmana et al. (2018) (19) no hallaron cambios cuando los niveles minerales fueron adecuados; ambos resultados son coherentes con lo observado, porque los tratamientos evaluados no representaron una deficiencia severa, aunque los dos más bajos sí se situaron por debajo de la referencia.

Merece atención el hecho de que las diferencias se concentraran en una sola de las dos estructuras pares: el índice modificado de Seedor y el índice de Quetelet difirieron en la tibia derecha ($p = 0,041$ en ambos casos) pero no en la izquierda ($p = 0,549$ y $p = 0,585$, respectivamente), y algo equivalente ocurrió con la densidad del fémur. No existe un mecanismo fisiológico que justifique una respuesta lateralizada al fósforo de la dieta, puesto que el mineral se distribuye por vía sistémica y actúa por igual sobre ambos lados del esqueleto. La explicación más plausible es de orden biomecánico y muestral: los pollos de engorde desarrollan asimetrías de carga asociadas a la postura y al desplazamiento, que se acentúan con el elevado peso corporal de la línea, y con cinco aves por tratamiento la variabilidad individual basta para que una diferencia alcance significancia en un hueso y no en su homólogo contralateral. Este resultado debe interpretarse, por tanto, como una diferencia puntual y no como evidencia de un efecto lateralizado del fósforo disponible.

El índice de robusticidad no presentó diferencias en ninguno de los huesos evaluados ($p > 0,05$), si bien T1 registró siempre los valores más altos. Dado que un índice más bajo corresponde a un hueso estructuralmente más resistente, esa tendencia sugiere que el menor nivel de fósforo disponible se asoció con huesos comparativamente más esbeltos, sin que la diferencia llegara a ser significativa. El resultado no coincide con Li et al. (2020) (14) ni con Omotoso et al. (2023) (12), quienes describen pérdida de resistencia y cambios en el diámetro del hueso cuando el aporte de fósforo es insuficiente, y sí concuerda con Uculmana et al. (2018) (19), quienes no hallaron efectos sobre la integridad esquelética con relaciones adecuadas de calcio y fósforo. En conjunto, los niveles evaluados fueron suficientes para mantener la resistencia de los huesos durante el periodo experimental.

Un aspecto que condiciona la comparación con la literatura es la relación calcio:fósforo. En esta investigación el calcio total se mantuvo fijo en 0,661 % en los cuatro tratamientos y solo se modificó el fósforo disponible, de modo que dicha relación varió de forma inversa entre tratamientos: 2,54 en T1, 2,13 en T2, 1,84 en T3 y 1,61 en T4. En consecuencia, las



diferencias observadas no responden únicamente al nivel de fósforo, sino también al desplazamiento simultáneo de la relación calcio:fósforo, lo que constituye una precisión necesaria al contrastar los resultados con Uculmana et al. (2018) (19), quienes manipularon deliberadamente esa relación (1,13, 1,55 y 1,98) modificando ambos minerales. En la misma línea, David et al. (2023) (30) demostraron que el requerimiento de calcio digestible depende de la concentración de fósforo digestible de la dieta y que la respuesta ósea se optimiza en combinaciones concretas de ambos minerales, y no ante el aumento aislado de uno de ellos. Los tratamientos intermedios de esta investigación son los que más se aproximan a la relación recomendada para la fase de acabado, lo que resulta coherente con que los mejores indicadores de calidad ósea de la quilla se hayan registrado en T2.

La capacidad para caminar no difirió entre tratamientos ($p = 0,587$): aunque T3 obtuvo el mejor puntaje promedio ($2,0 \pm 1,00$), la diferencia no fue significativa, por lo que ninguno de los niveles evaluados comprometió la locomoción de los pollos Cobb 500. Tampoco difirió la puntuación de necrosis femoral ($p = 0,549$), con valores bajos en todos los tratamientos y sin lesiones severas en la cabeza del fémur. Estos resultados coinciden con Uculmana et al. (2018) (19), quienes solo observaron alteraciones de la locomoción cuando la relación calcio:fósforo fue muy baja y tampoco registraron casos severos de necrosis, y con Powell et al. (2008) (17), quienes señalan que las variaciones moderadas del fósforo no repercuten directamente sobre el desempeño físico del ave, aunque sí modifiquen algunos parámetros óseos. Omotoso et al. (2023) (12) apuntan en el mismo sentido: cuando los requerimientos minerales están cubiertos, la locomoción no presenta deterioro.

5.3 Limitaciones del estudio

El diseño presenta limitaciones que conviene explicitar para delimitar el alcance de los resultados. En primer lugar, el porcentaje de cloruro de colina al 60 % descendió de 0,356 % en T1 a 0,162 % en T4 como consecuencia del reajuste de la fórmula. Al ser la colina un compuesto lipotrópico que actúa sobre el metabolismo de la grasa hepática, sus efectos y los del fósforo disponible sobre la morfometría del hígado quedan confundidos, por lo que las diferencias halladas en ese órgano no pueden atribuirse en exclusiva al fósforo.

En segundo lugar, el procesamiento de las estructuras óseas se realizó mediante inmersión en agua en ebullición durante 15 minutos y secado a temperatura ambiente durante siete días. El primer procedimiento desnaturaliza el colágeno de la matriz orgánica y el segundo no garantiza una materia seca constante, de manera que el peso, el volumen, la densidad y



los índices derivados pueden diferir de los obtenidos con limpieza en frío y desecación en estufa hasta peso constante. Ambos procedimientos se aplicaron de forma idéntica a los cuatro tratamientos, por lo que la comparación entre grupos se mantiene válida; lo que no resulta procedente es comparar los valores absolutos con los de estudios que emplearon protocolos distintos.

En tercer lugar, con cinco repeticiones por tratamiento la potencia estadística es reducida. Ello explica que los intervalos de confianza del tamaño del efecto abarquen casi todo el rango posible (0,00 – 1,00) en la mayoría de las variables y que algunas diferencias detectadas por el ANOVA no se confirmen en la comparación múltiple, como ocurrió con la densidad del fémur izquierdo. Los tamaños del efecto deben leerse, por tanto, como una orientación sobre la magnitud del fenómeno y no como estimaciones precisas.

Por último, al mantenerse fijo el calcio total en 0,661 % y modificarse únicamente el fósforo disponible, la relación calcio:fósforo varió entre tratamientos de 2,54 a 1,61. Los resultados reflejan, en consecuencia, el efecto conjunto del nivel de fósforo y del desplazamiento de esa relación, y no el del fósforo considerado de forma aislada.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Los diferentes niveles de fósforo disponible influyeron sobre algunas características morfométricas de los órganos de los pollos de engorde Cobb 500, favoreciendo principalmente el desarrollo del hígado y del proventrículo. Se evidenció un incremento en el peso del hígado y del proventrículo, así como en el ancho del hígado y en el ancho de la molleja. En contraste, las demás características morfométricas de los órganos evaluados no fueron afectadas por los tratamientos.

Los niveles de fósforo disponible evaluados mantuvieron una adecuada integridad ósea en los pollos de engorde Cobb 500. La mayoría de las variables morfométricas óseas, el índice de robusticidad, la capacidad para caminar y la puntuación de necrosis femoral no presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Sí las presentaron el peso y la densidad de la quilla, el índice modificado de Seedor de la tibia derecha y de la quilla, y el índice de Quetelet de la tibia derecha. En la densidad del fémur izquierdo el ANOVA resultó significativo ($p = 0,047$), pero la prueba de Tukey no separó ningún par de tratamientos, por lo que no se considera un efecto demostrado. Lo anterior indica que la quilla y la tibia fueron las estructuras más sensibles a las variaciones en los niveles de fósforo disponible.

Los niveles de fósforo disponible utilizados en la investigación permitieron un adecuado desarrollo de los órganos y conservaron la integridad ósea de los pollos de engorde Cobb 500. Los niveles más altos favorecieron el desarrollo del hígado y del proventrículo, mientras que los indicadores de calidad ósea de la quilla alcanzaron sus mayores valores con el nivel intermedio de 0,31 %, sin que ninguno de los tratamientos afectara negativamente la locomoción ni incrementara la incidencia de necrosis femoral, lo que evidencia que las concentraciones evaluadas fueron suficientes para mantener el crecimiento y el desarrollo fisiológico normal de las aves durante el periodo experimental.



En cuanto a la hipótesis general, que planteaba que la dieta con el nivel más elevado de fósforo disponible mejoraría las características morfométricas de los órganos y la integridad ósea, los resultados obligan a aceptarla solo de forma parcial. Se acepta la hipótesis específica referida a las características morfométricas de los órganos, puesto que el hígado y el proventrículo alcanzaron sus mayores valores con los niveles más altos de fósforo disponible. Se rechaza, en cambio, la hipótesis específica referida a la integridad ósea: los mejores indicadores de calidad ósea de la quilla se registraron con el nivel intermedio de 0,31 % (T2) y no con el máximo de 0,41 % (T4), de modo que la relación entre el fósforo disponible y la calidad del hueso no resultó creciente en todo el rango evaluado.

6.2 Recomendaciones

Realizar investigaciones utilizando niveles de fósforo disponible inferiores y superiores a los evaluados en el presente estudio, con la finalidad de establecer el nivel óptimo que favorezca el desarrollo de los órganos y la integridad ósea en pollos de engorde Cobb 500.

Complementar la evaluación de la integridad ósea mediante pruebas de resistencia mecánica a la rotura y la determinación del porcentaje de cenizas en los huesos, con el propósito de obtener una valoración más completa de la calidad ósea y de la respuesta del tejido óseo a los diferentes niveles de fósforo disponible.

Evaluar la interacción entre los niveles de fósforo disponible, la relación calcio:fósforo y la suplementación con fitasa en pollos de engorde Cobb 500, con el fin de optimizar el aprovechamiento del fósforo y mejorar el desarrollo esquelético de las aves.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cobb-Vantress. Cobb500 broiler performance and nutrition supplement [Internet]. Siloam Springs (AR): Cobb-Vantress; 2022 [citado 3 ago 2026]. Disponible en: <https://www.cobbgenetics.com/assets/Cobb-Files/2022-Cobb500-Broiler-Performance-Nutrition-Supplement.pdf>
2. Li X, Zhang D, Yang TY, Bryden WL. Phosphorus bioavailability: a key aspect for conserving this critical animal feed resource with reference to broiler nutrition. *Agriculture*. 2016;6(2):25. doi: 10.3390/agriculture6020025
3. National Research Council (US), Subcommittee on Poultry Nutrition. Nutrient requirements of poultry. 9.^a ed. rev. Washington (DC): National Academy Press; 1994.
4. Sommerfeld V, Schollenberger M, Kühn I, Rodehutsord M. Interactive effects of phosphorus, calcium, and phytase supplements on products of phytate degradation in the digestive tract of broiler chickens. *Poult Sci*. 2018;97(4):1177-88. doi: 10.3382/ps/pex404
5. Whitehead CC. Factores nutricionales que influyen en los problemas óseos actuales de los broilers. En: 46º Symposium Científico de Avicultura; 2009 sep 30-oct 2; Zaragoza, España. Barcelona: WPSA-AECA; 2009.
6. Knowles TG, Kestin SC, Haslam SM, Brown SN, Green LE, Butterworth A, et al. Leg disorders in broiler chickens: prevalence, risk factors and prevention. *PLoS One*. 2008;3(2):e1545. doi: 10.1371/journal.pone.0001545
7. Oviedo-Rondón EO. Aspectos nutricionales que influyen sobre la incidencia de problemas de patas en pollos de engorde. En: XXV Curso de Especialización FEDNA: Avances en Nutrición y Alimentación Animal; 2009 nov 5-6; Madrid, España. Madrid: FEDNA; 2009. p. 79-106.
8. Shastak Y, Rodehutsord M. Determination and estimation of phosphorus availability in growing poultry and their historical development. *Worlds Poult Sci J*. 2013;69(3):569-85. doi: 10.1017/S0043933913000585
9. Liu KL, He YF, Xu BW, Lin LX, Chen P, Iqbal MK, et al. Leg disorders in broiler chickens: a review of current knowledge. *Anim Biotechnol*. 2023;34(9):5124-38. doi: 10.1080/10495398.2023.2270000
10. Catalan AAS, Krabbe EL, Avila VS, Lopes LS, Nunes AP, Morés MAZ, et al. Phytate-phosphorus and phytase contents on the relative weight of organs, intestinal morphometry and performance of broilers. *Cienc Rural*. 2016;46(10):1858-64. doi: 10.1590/0103-8478cr20150892
11. Li XK, Wang JZ, Wang CQ, Zhang CH, Li X, Tang CH, et al. Effect of dietary phosphorus levels on meat quality and lipid metabolism in broiler chickens. *Food Chem*. 2016;205:289-96. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.02.133
12. Omotoso AO, Reyer H, Oster M, Maak S, Ponsuksili S, Wimmers K. Broiler physiological response to low phosphorus diets at different stages of production. *Poult Sci*. 2023;102(2):102351. doi: 10.1016/j.psj.2022.102351



13. Cardoso EF, Donzele JL, Donzele RFMO, Sufiate BL, Silva AD, Tizziani T. Non-phytate phosphorus requirement for broilers from 8 to 21 days of age under heat stress conditions. *Trop Anim Health Prod.* 2018;50(2):317-25. doi: 10.1007/s11250-017-1434-1
14. Li T, Xing G, Shao Y, Zhang L, Li S, Lu L, et al. Dietary calcium or phosphorus deficiency impairs the bone development by regulating related calcium or phosphorus metabolic utilization parameters of broilers. *Poult Sci.* 2020;99(6):3207-14. doi: 10.1016/j.psj.2020.01.028
15. Wei H, Bi Y, Li Y, Zhang H, Li J, Zhang R, et al. Low dietary phosphorus impairs keel bone health and quality in laying hens. *Br Poult Sci.* 2022;63(1):73-81. doi: 10.1080/00071668.2021.1960951
16. Cowieson AJ, Perez-Maldonado R, Kumar A, Toghyani M. Possible role of available phosphorus in potentiating the use of low-protein diets for broiler chicken production. *Poult Sci.* 2020;99(12):6954-63. doi: 10.1016/j.psj.2020.09.045
17. Powell S, Johnston S, Gaston L, Southern LL. The effect of dietary phosphorus level and phytase supplementation on growth performance, bone-breaking strength, and litter phosphorus concentration in broilers. *Poult Sci.* 2008;87(5):949-57. doi: 10.3382/ps.2007-00291
18. Murga CT, Virhuez JR, Vílchez CP, Nakandakari LA. Comportamiento productivo y características morfométricas y mineralización de tibias de pollos de engorde suplementados con fosfatos inorgánicos de cinco fuentes comerciales. *Rev Investig Vet Peru.* 2020;31(2):e17843. doi: 10.15381/rivep.v31i2.17843
19. Uculmana CM, Martínez-Patiño D, Zea OM, Vílchez CP. Efecto de la relación calcio y fósforo sobre las características óseas, porcentaje de cenizas e integridad esquelética en pollos de carne. *Rev Investig Vet Peru.* 2018;29(4):1268-77. doi: 10.15381/rivep.v29i4.15199
20. Lee SA, Lopez DA, Stein HH. Mineral composition and phosphorus digestibility in feed phosphates fed to pigs and poultry. *Anim Biosci.* 2023;36(2):167-74. doi: 10.5713/ab.22.0322
21. Serna J, Bergwitz C. Importance of dietary phosphorus for bone metabolism and healthy aging. *Nutrients.* 2020;12(10):3001. doi: 10.3390/nu12103001
22. Coma J. Aspectos nutricionales relacionados con la salud intestinal. En: 50º Symposium Científico de Avicultura; 2013 oct 2-4; Lleida, España. Barcelona: WPSA-AECA; 2013.
23. Lv X, Hao J, Wu L, Liu M, He L, Qiao Y, et al. Age quadratically affects intestinal calcium and phosphorus transporter gene expression in broiler chickens. *Anim Biosci.* 2022;35(12):1921-8. doi: 10.5713/ab.22.0058
24. Proszkowiec-Weglarz M, Angel R. Calcium and phosphorus metabolism in broilers: effect of homeostatic mechanism on calcium and phosphorus digestibility. *J Appl Poult Res.* 2013;22(3):609-27. doi: 10.3382/japr.2012-00743
25. Xu B, Xu T, Ding W, Huang S. Diagnosis of leg diseases in broiler chickens: a



- retrospective review. *J Integr Agric*. 2025;24(3):984-1000. doi: 10.1016/j.jia.2023.12.034
26. Razzaque MS. The FGF23-Klotho axis: endocrine regulation of phosphate homeostasis. *Nat Rev Endocrinol*. 2009;5(11):611-9. doi: 10.1038/nrendo.2009.196
27. Li XK, Wang JZ, Zhang CH, Li X, Tang CH. Content and distribution of different phosphorus forms in broiler chickens. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*. 2016;100(2):271-8. doi: 10.1111/jpn.12364
28. Parmer TG, Carew LB, Alster FA, Scanes CG. Thyroid function, growth hormone, and organ growth in broilers deficient in phosphorus. *Poult Sci*. 1987;66(12):1995-2004. doi: 10.3382/ps.0661995
29. Applegate TJ, Lilburn MS. Growth of the femur and tibia of a commercial broiler line. *Poult Sci*. 2002;81(9):1289-94. doi: 10.1093/ps/81.9.1289
30. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Requirement of digestible calcium at different dietary concentrations of digestible phosphorus for broiler chickens 3. Broiler finishers (d 25 to 35 post-hatch). *Poult Sci*. 2023;102(4):102492. doi: 10.1016/j.psj.2023.102492
31. Imari ZK, Hassanabadi A, Nassiri Moghaddam H. Response of broiler chickens to calcium and phosphorus restriction: effects on growth performance, carcass traits, tibia characteristics and total tract retention of nutrients. *Ital J Anim Sci*. 2020;19(1):929-39. doi: 10.1080/1828051X.2020.1808101
32. Kestin SC, Knowles TG, Tinch AE, Gregory NG. Prevalence of leg weakness in broiler chickens and its relationship with genotype. *Vet Rec*. 1992;131(9):190-4. doi: 10.1136/vr.131.9.190
33. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. Guía práctica para la formulación y ejecución de proyectos de investigación y desarrollo (I+D) [Internet]. Lima: CONCYTEC; 2020 [citado 3 ago 2026]. Disponible en: <https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2187>
34. Hernández-Sampieri R, Mendoza Torres CP. Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Ciudad de México: McGraw-Hill Education; 2018.
35. Bowes VA, Julian RJ. Organ weights of normal broiler chickens and those dying of sudden death syndrome. *Can Vet J*. 1988;29(2):153-6.
36. Almeida Paz ICL, Mendes AA, Balog A, Vulcano LC, Ballarin AW, Almeida ICL, et al. Study on the bone mineral density of broiler suffering femoral joint degenerative lesions. *Rev Bras Cienc Avic*. 2008;10(2):103-8. doi: 10.1590/S1516-635X2008000200005
37. Buckner GD, Insko WM Jr, Henry AH, Wachs EF. The comparative rates of growth and calcification of the femur, tibia and metatarsus bones of the male and female New Hampshire chicken having straight keel. *Poult Sci*. 1950;29(3):332-5. doi: 10.3382/ps.0290332
38. Martínez Patiño-Patroni DA. Evaluación de un producto a base de aceite esencial de orégano sobre la integridad intestinal, la capacidad de absorción de nutrientes y el



comportamiento productivo de pollos de carne [tesis de maestría]. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2012.

39. Rutten M, Leterrier C, Constantin P, Reiter K, Bessei W. Bone development and activity in chickens in response to reduced weight-load on legs. *Anim Res.* 2002;51(4):327-36. doi: 10.1051/animres:2002027
40. Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 10.^a ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2019.



ANEXOS





Figura 1. Fotografía de la recolección e identificación de muestras óseas



Figura 2. Fotografía del pesaje de muestras óseas en balanza analítica



Figura 3. Fotografía de la medición de muestras óseas con calibrador Vernier



Figura 4. Fotografía de la estimación del volumen de muestras óseas haciendo uso de probeta



Figura 5. Fotografía del pesaje de aves



Figura 6. Fotografía del galpón de tratamiento 1 y 2



Figura 7. Fotografía del galpón de tratamiento 3 y 4

Tabla 13. Prueba de normalidad de los datos

Variable	p-valor Shapiro-Wilk	¿Distribución normal?	Prueba estadística utilizada
Morfometría de órganos			
Peso de hígado (g)	0,062	Sí	ANOVA
Peso de proventrículo (g)	0,854	Sí	ANOVA
Peso de molleja (g)	0,045	No	Kruskal-Wallis
Peso de corazón (g)	0,412	Sí	ANOVA
Ancho de hígado (mm)	0,370	Sí	ANOVA
Ancho de proventrículo (mm)	0,134	Sí	ANOVA
Ancho de molleja (mm)	0,867	Sí	ANOVA
Ancho de corazón (mm)	0,002	No	Kruskal-Wallis
Largo de hígado (mm)	0,026	No	Kruskal-Wallis
Largo de proventrículo (mm)	0,315	Sí	ANOVA
Largo de molleja (mm)	0,782	Sí	ANOVA
Largo de corazón (mm)	0,057	Sí	ANOVA
Morfometría ósea			
Peso de fémur (g)	0,994	Sí	ANOVA
Peso de tibia (g)	0,851	Sí	ANOVA
Peso de tarso (g)	0,390	Sí	ANOVA
Peso de quilla (g)	0,506	Sí	ANOVA
Largo de fémur (mm)	0,746	Sí	ANOVA
Largo de tibia (mm)	0,632	Sí	ANOVA
Largo de tarso (mm)	0,951	Sí	ANOVA
Largo de quilla (mm)	0,872	Sí	ANOVA
Diámetro de fémur (mm)	0,509	Sí	ANOVA
Diámetro de tibia (mm)	0,464	Sí	ANOVA
Diámetro de tarso (mm)	0,164	Sí	ANOVA
Calidad ósea – Volumen			
Volumen de fémur (cm ³)	0,655	Sí	ANOVA
Volumen de tibia (cm ³)	0,638	Sí	ANOVA
Volumen de tarso (cm ³)	0,375	Sí	ANOVA
Volumen de quilla (cm ³)	0,062	Sí	ANOVA
Calidad ósea – Densidad			
Densidad de fémur izquierdo (mg/cm ³)	0,216	Sí	ANOVA
Densidad de fémur derecho (mg/cm ³)	0,927	Sí	ANOVA
Densidad de tibia izquierda (mg/cm ³)	0,080	Sí	ANOVA
Densidad de tibia derecha (mg/cm ³)	0,255	Sí	ANOVA
Densidad de tarso izquierdo (mg/cm ³)	0,012	No	Kruskal-Wallis
Densidad de tarso derecho (mg/cm ³)	0,895	Sí	ANOVA
Densidad de quilla (mg/cm ³)	0,138	Sí	ANOVA
Índice modificado de Seedor			



Variable	<i>p</i> -valor Shapiro-Wilk	¿Distribución normal?	Prueba estadística utilizada
Seedor – fémur izquierdo (mg/mm)	0,903	Sí	ANOVA
Seedor – fémur derecho (mg/mm)	0,600	Sí	ANOVA
Seedor – tibia izquierda (mg/mm)	0,478	Sí	ANOVA
Seedor – tibia derecha (mg/mm)	0,682	Sí	ANOVA
Seedor – tarso izquierdo (mg/mm)	0,684	Sí	ANOVA
Seedor – tarso derecho (mg/mm)	0,090	Sí	ANOVA
Seedor – quilla (mg/mm)	0,937	Sí	ANOVA
Índice de Quetelet			
Quetelet – fémur izquierdo (mg/mm ²)	0,772	Sí	ANOVA
Quetelet – fémur derecho (mg/mm ²)	0,896	Sí	ANOVA
Quetelet – tibia izquierda (mg/mm ²)	0,476	Sí	ANOVA
Quetelet – tibia derecha (mg/mm ²)	0,401	Sí	ANOVA
Quetelet – tarso izquierdo (mg/mm ²)	0,863	Sí	ANOVA
Quetelet – tarso derecho (mg/mm ²)	0,625	Sí	ANOVA
Quetelet – quilla (mg/mm ²)	0,011	No	Kruskal-Wallis
Índice de robusticidad			
Robusticidad – fémur izquierdo (cm/g ^{1/3})	0,136	Sí	ANOVA
Robusticidad – fémur derecho (cm/g ^{1/3})	0,921	Sí	ANOVA
Robusticidad – tibia izquierda (cm/g ^{1/3})	0,962	Sí	ANOVA
Robusticidad – tibia derecha (cm/g ^{1/3})	0,039	No	Kruskal-Wallis
Robusticidad – tarso izquierdo (cm/g ^{1/3})	0,652	Sí	ANOVA
Robusticidad – tarso derecho (cm/g ^{1/3})	0,846	Sí	ANOVA
Robusticidad – quilla (cm/g ^{1/3})	0,088	Sí	ANOVA
Funcionalidad locomotora			
Capacidad para caminar (0-5)	— (ordinal)	No aplica	Kruskal-Wallis
Índice de necrosis femoral (1-5)	— (ordinal)	No aplica	Kruskal-Wallis

Prueba de Shapiro-Wilk aplicada sobre las 20 unidades experimentales (4 tratamientos x 5 repeticiones).
Se asume distribución normal cuando $p > 0,05$.

Las variables ordinales de funcionalidad locomotora no admiten prueba de normalidad y se analizaron con pruebas no paramétricas.

De las 55 variables cuantitativas evaluadas, 49 siguieron una distribución normal ($p > 0,05$) y se analizaron mediante ANOVA de una vía; las 6 restantes se analizaron con Kruskal-Wallis: peso de molleja, ancho de corazón, largo de hígado, densidad del tarso izquierdo, índice de Quetelet de la quilla e índice de robusticidad de la tibia derecha. Las dos variables ordinales de funcionalidad locomotora se evaluaron también con Kruskal-Wallis, al tratarse de escalas categóricas ordenadas para las que no procede la prueba de normalidad.

Tabla 14. Prueba de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene)

Variable	Estadístico de Levene (F)	p-valor	¿Varianzas homogéneas?
Morfometría de órganos			
Peso de hígado (g)	0,319	0,812	Sí
Peso de proventrículo (g)	0,108	0,954	Sí
Peso de corazón (g)	1,392	0,281	Sí
Ancho de hígado (mm)	0,338	0,798	Sí
Ancho de proventrículo (mm)	3,201	0,052	Sí
Ancho de molleja (mm)	0,213	0,886	Sí
Largo de proventrículo (mm)	1,486	0,256	Sí
Largo de molleja (mm)	0,198	0,896	Sí
Largo de corazón (mm)	4,949	0,013	No
Morfometría ósea			
Peso de fémur (g)	0,668	0,584	Sí
Peso de tibia (g)	0,626	0,608	Sí
Peso de tarso (g)	1,744	0,198	Sí
Peso de quilla (g)	1,154	0,358	Sí
Largo de fémur (mm)	1,313	0,305	Sí
Largo de tibia (mm)	0,482	0,699	Sí
Largo de tarso (mm)	1,149	0,359	Sí
Largo de quilla (mm)	2,566	0,091	Sí
Diámetro de fémur (mm)	1,147	0,360	Sí
Diámetro de tibia (mm)	1,815	0,185	Sí
Diámetro de tarso (mm)	4,107	0,024	No
Calidad ósea – Volumen			
Volumen de fémur (cm ³)	0,505	0,684	Sí
Volumen de tibia (cm ³)	1,789	0,190	Sí
Volumen de tarso (cm ³)	1,763	0,195	Sí
Volumen de quilla (cm ³)	0,813	0,505	Sí
Calidad ósea – Densidad			
Densidad de fémur izquierdo (mg/cm ³)	3,062	0,058	Sí
Densidad de fémur derecho (mg/cm ³)	0,509	0,682	Sí
Densidad de tibia izquierda (mg/cm ³)	0,316	0,814	Sí
Densidad de tibia derecha (mg/cm ³)	1,842	0,180	Sí
Densidad de tarso derecho (mg/cm ³)	2,293	0,117	Sí
Densidad de quilla (mg/cm ³)	1,431	0,271	Sí
Índice modificado de Seedor			
Seedor – fémur izquierdo (mg/mm)	0,794	0,515	Sí
Seedor – fémur derecho (mg/mm)	0,664	0,586	Sí
Seedor – tibia izquierda (mg/mm)	1,666	0,214	Sí
Seedor – tibia derecha (mg/mm)	0,453	0,719	Sí



Variable	Estadístico de Levene (F)	p-valor	¿Varianzas homogéneas?
Seedor – tarso izquierdo (mg/mm)	3,831	0,030	No
Seedor – tarso derecho (mg/mm)	3,749	0,033	No
Seedor – quilla (mg/mm)	0,906	0,460	Sí
Índice de Quetelet			
Quetelet – fémur izquierdo (mg/mm ²)	0,754	0,536	Sí
Quetelet – fémur derecho (mg/mm ²)	1,362	0,290	Sí
Quetelet – tibia izquierda (mg/mm ²)	1,757	0,196	Sí
Quetelet – tibia derecha (mg/mm ²)	0,614	0,616	Sí
Quetelet – tarso izquierdo (mg/mm ²)	6,461	0,005	No
Quetelet – tarso derecho (mg/mm ²)	2,021	0,152	Sí
Índice de robusticidad			
Robusticidad – fémur izquierdo (cm/g ^{1/3})	0,813	0,505	Sí
Robusticidad – fémur derecho (cm/g ^{1/3})	1,471	0,260	Sí
Robusticidad – tibia izquierda (cm/g ^{1/3})	1,543	0,242	Sí
Robusticidad – tarso izquierdo (cm/g ^{1/3})	5,813	0,007	No
Robusticidad – tarso derecho (cm/g ^{1/3})	1,102	0,377	Sí
Robusticidad – quilla (cm/g ^{1/3})	1,471	0,260	Sí

F: estadístico de Levene basado en la media; grados de libertad = 3 y 16 en todos los casos.

Se asume homogeneidad de varianzas cuando $p > 0,05$.

Se incluyen únicamente las variables con distribución normal analizadas mediante ANOVA (Tabla 13); las analizadas con Kruskal-Wallis no requieren este supuesto.

T1: 0,26 % de fósforo disponible, T2: 0,31 % de fósforo disponible, T3: 0,36 % de fósforo disponible, T4: 0,41 % de fósforo disponible.

De las 49 variables analizadas mediante ANOVA, 43 presentaron varianzas homogéneas entre los cuatro tratamientos ($p > 0,05$), lo que respalda el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad. Los 6 restantes mostraron varianzas heterogéneas: largo de corazón ($p = 0,013$), diámetro de tarso ($p = 0,024$), índice modificado de Seedor del tarso izquierdo ($p = 0,030$) y del tarso derecho ($p = 0,033$), índice de Quetelet del tarso izquierdo ($p = 0,005$) e índice de robusticidad del tarso izquierdo ($p = 0,007$). Ninguna de ellas mostró diferencias significativas entre tratamientos, por lo que el incumplimiento del supuesto no compromete ningún hallazgo del estudio.