

Artículo de investigación

Análisis mecánico y morfométrico del hueso carpo III del caballo mestizo Criollo Argentino

Mechanical and morphometric analysis of the carpal III bone of the Argentine Creole horse

Matías Varela¹, Rosana Moine¹, Rita Cecilia Fioretti¹, Pablo Gerardo Varela³, Rodrigo de Prada³, Leandro Giorgetti³, Romina Bellingeri^{2,4}, Cesar Barbero⁵

¹Departamento de Anatomía Animal. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Ruta Nacional 36, Km 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

²Laboratorio de Biotecnología Animal. Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC.

³Laboratorio de Ensayo de Materiales. Facultad de Ingeniería. UNRC.

⁴Grupo de Biomateriales. Instituto de Investigación en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (IITEMA-UNRC). Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

⁵Grupo de Nanomateriales. Instituto de Investigación en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (IITEMA-UNRC). Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

e-mail: mvarela@ayv.unrc.edu.ar

(Recibido: 3 de mayo 2021; aceptado 19 julio 2021)

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue estudiar las propiedades mecánicas y morfométricas del hueso carpo III (C3) del caballo mestizo criollo. Para ello se obtuvieron piezas óseas de 10 especímenes de un frigorífico de la región. Los huesos de la mano izquierda se pesaron y analizaron por técnicas de escaneo óptico 3D que generaron archivos estereolitográficos. A partir de ellos se obtuvieron datos morfométricos tales como el diámetro latero-medial y dorso-palmar, el volumen total, la superficie de articulación total y el diámetro próximo-distal. Por otra parte, los huesos de la mano derecha fueron sometidos a una prueba de compresión con orientación próximo-distal. Los datos fueron analizados estadísticamente y se encontró una relación lineal entre la superficie del C3 y el volumen ($R^2=0,95$; $p < 0,0001$), así como también, entre la densidad y el volumen, que están linealmente relacionados ($R^2= 0,62$; $p < 0,0001$). La densidad ósea es una variable para tener en cuenta para determinar resistencia ($R^2=0,34$; $p < 0,0001$), sin embargo, otros factores también deben considerarse en la absorción de energía al momento del ensayo mecánico de compresión. No hubo diferencias significativas en la resistencia ante una prueba de compresión entre animales hembras y machos. Estos resultados pueden contribuir a estudios clínicos y fisiológicos de las extremidades en equinos.

Palabras clave: carpo III; equino; morfología; biomecánica; ensayo de compresión.

ABSTRACT

The aim of the present work was to study the mechanical and morphometric properties of the carpal III bone (C3) of the Creole horse. For this, bone pieces were obtained from 10 specimens from a slaughterhouse in the region. The bones of the left hand were weighed and analyzed by 3D optical scanning techniques that generated stereolithographic files. Morphometric data such as the lateral-medial and dorso-palmar diameter, the total volume, the total joint surface and the proximal-distal diameter were obtained from them. On the other hand, the bones of the right hand were subjected to a compression test with proximal-distal orientation. The data were statistically analyzed and a linear relationship was found between the surface of the C3 and the volume ($R^2 = 0.95$, $p < 0.0001$), as well as between the density and the volume, which are linearly related ($R^2 = 0.62$, $p < 0.0001$). Bone density is a variable to take into account to determine resistance ($R^2 = 0.34$, $p < 0.0001$), however, other factors also must be considered in the absorption of energy at the time of the mechanical compression test. There were no significant differences in resistance to a compression test between female and male animals. These results may contribute to clinical and physiological studies of the extremities in equines.

Keywords: equine; carpus III; morphology; biomechanics; compression test

INTRODUCCIÓN

Las patologías de la región palmar constituyen una situación clínica prevalente en el equino. Los miembros

torácicos soportan la mayor parte del peso corporal debido a la posición del cuello y la cabeza, y son los principales amortiguadores durante marchas rápidas^{1,2}. El carpo representa la articulación lesionada con más

frecuencia, en especial en caballos de carrera que son sometidos a un manejo y entrenamiento intenso a diferencia del resto de equinos³⁻⁶. El estudio de la biomecánica de la flexión y compresión refleja que todo el proceso ocurre principalmente en las articulaciones radiocarpal e internocarpal; superficies articulares que durante el movimiento están ampliamente separadas dorsalmente y que permanecen en contacto en la zona palmar⁷. En los caballos de carreras, las articulaciones están sometidas a un esfuerzo físico repetitivo a los que se ven sometidos durante los entrenamientos y principalmente a las hiperextensiones que derivan a un estrés mecánico de los huesos y ligamentos que componen la articulación^{8,9}. Se ha reportado en caballos de carreras jóvenes un cambio en la placa ósea subcondral, que se espesa debido al modelado adaptativo dentro de los dos meses posteriores al inicio del entrenamiento⁹. Esta respuesta fisiológica permite que el hueso resista la carga cíclica del entrenamiento y las carreras, mostrando una correlación positiva entre fracción de volumen óseo y vida por fatiga compresiva en hueso esponjoso.

La densidad ósea de carpo III (C3) aumenta como resultado del ejercicio, reduciendo el cumplimiento del hueso y predisponiéndolo a la lesión¹⁰. El aumento de la densidad ósea o la esclerosis de C3, evidenciado por una opacidad radiográfica del mismo y un incremento de la proporción de hueso esponjoso, pueden ser el primer indicador de enfermedad dentro de este hueso junto a las fracturas completas^{10,11}. Las variaciones en la forma y estructura del hueso carpiano pueden depender de las fuerzas mecánicas recibidas en el historial de vida del caballo. Estudios previos han revelado que las fracturas completas del C3 son más comunes en el miembro torácico derecho que en el izquierdo^{11,12}. El entrenamiento también influye en la densidad y mineralización del hueso subcondral y esponjoso¹³.

El comportamiento mecánico de una estructura ósea entera es complejo de predecir, ya que es el resultado de las propiedades materiales de cada uno de sus componentes y de su distribución geométrica en el espacio. Estudios previos han señalado que la resistencia ósea depende básicamente de la integración entre dos variables: la cantidad y la calidad ósea. La cantidad está directamente relacionada con la densidad mineral del tejido óseo, la calidad depende de variables tales como la composición química de los materiales orgánicos e inorgánicos que

componen su matriz (propiedades materiales) y de cómo se produce la estructuración espacial de dichos materiales (propiedades estructurales), estos factores son dependientes en mayor o menor medida del remodelado óseo¹⁴.

Si bien hay muchos estudios realizados en equinos de carrera, son pocos los trabajos sobre las características biomecánicas del C3 sometido a prueba de flexión y su relación con las propiedades estructurales en caballos mestizos criollos de ambos sexos. El objetivo de este trabajo fue determinar las propiedades mecánicas y morfométricas en caballos mestizos criollos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron huesos C3 derechos e izquierdos. Las piezas anatómicas se obtuvieron de 10 animales del frigorífico General Pico (Las Higueras). Se registraron el sexo y la edad aproximada (calculada por cronología dentaria) para cada animal. Una vez extraídos los huesos C3 del miembro torácico, los mismos se liberaron de los tejidos blandos por disección convencional. Los huesos fueron preservados en gasa humedecida en solución fisiológica y conservados en freezer a -20°C hasta la adquisición de imágenes y los ensayos de resistencia mecánica para los cuales se descongelaron a temperatura ambiente¹⁵⁻¹⁷.

Los huesos se separaron en derechos e izquierdos. Los huesos izquierdos se pesaron con balanza electrónica (Systel Clipse 5 V2[®]) y luego se escanearon utilizando un escáner óptico 3D (Matter and Form[®]). Se realizaron diferentes vistas y se generaron archivos estereolitográficos. A partir de estos archivos se obtuvieron datos morfométricos tales como diámetro latero-medial y dorso-palmar, volumen total, superficie de articulación total y diámetro próximo-distal. Los huesos derechos se pesaron con balanza electrónica y luego fueron sometidos a una prueba de compresión con orientación próximo-distal. Este ensayo consiste en producir fuerzas hasta romper al hueso en un punto determinado. Previo al ensayo de compresión los huesos C3 fueron descongelados de forma natural a temperatura ambiente. Luego fueron cubiertos, en la superficie articular proximal, por una masilla epoxi (Poxilina[®]) (Figura 1A). Para el ensayo se utilizó un equipo servohidráulico de ensayos estáticos y dinámicos AMSLER 6PZD 1406[®] (Figura 1B).

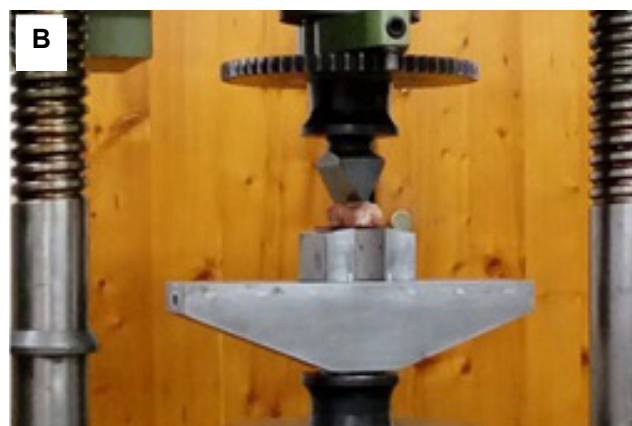


Figura 1. (A) Hueso carpo III con masilla previo al ensayo de compresión. (B) Ensayo de compresión con equipo servohidráulico AMSLER 6PZD 1406[®]

Se obtuvieron curvas de esfuerzo-deformación con 16 datos por segundo (8 datos de fuerza y 8 datos de deformación) indicando el esfuerzo máximo, deformación máxima y módulo de Young. Este último parámetro permite caracterizar el comportamiento de un material elástico según la dirección en la que se aplica la fuerza. Los datos fueron analizados mediante el uso de la técnica de correlación y regresión lineal simple, análisis de la varianza y comparaciones múltiples de Tukey usando el software estadístico Infostat® (versión 2018)¹⁸ con un nivel de significación de 0,05. Para las variables cuantitativas peso, longitud, diámetros y espesor, se realizó una tabla con los valores muestrales de tendencia central y de dispersión.

RESULTADOS

El análisis morfométrico realizado con el scanner 3D permitió obtener imágenes de los huesos estudiados y medidas exactas de los mismos (Figura 2).

Las medidas de tendencia central de cada variable morfométrica tomada en el hueso carpo III (C3) puede observarse en la Tabla 1.

Luego de comparar los diámetros latero-medial (LM), dorso-palmar (DP) y próximo-distal (PD) se encontró que el diámetro PD ($p < 0,0001$) fue significativamente menor a los dos restantes (Figura 3). Esto indicó que, a pesar de su pequeño tamaño con una media de superficie total de 5625,3 mm², el C3 podría considerarse morfológicamente

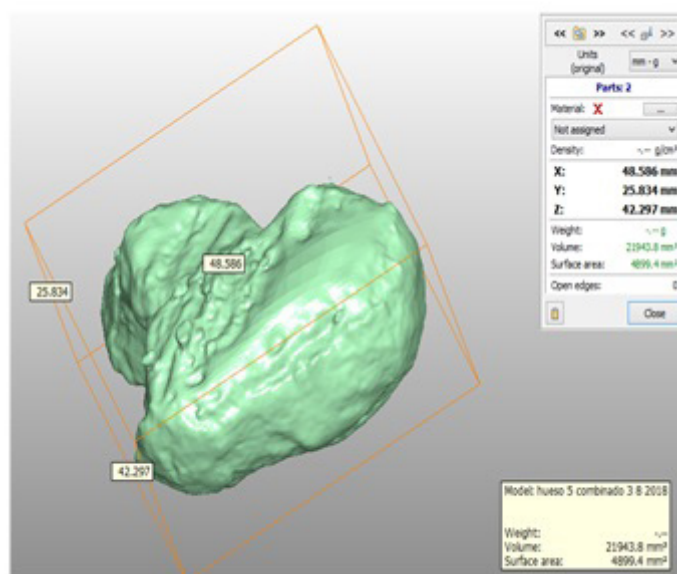


Figura 2. Imagen del hueso C3 adquirida por el escáner óptico 3D (Matter and Form).

Tabla 1. Resumen de los parámetros morfométricos del hueso carpo III (C3).

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
Peso C3 izquierdo (g)	37,75	5,31	26,00	44,00
Peso C3 derecho (g)	39,38	5,53	30,00	48,00
Volumen (mm ³)	27012,73	5231,95	21491,80	36641,80
Superficie total (mm ²)	5625,35	695,33	4899,40	6734,10
Diámetro latero-medial (mm)	50,17	5,22	43,29	59,09
Diámetro dorso-palmar (mm)	46,18	3,96	42,30	54,79
Diámetro próximo-distal (mm)	29,06	5,02	24,17	39,40
Densidad ósea (mg/mm ³)	1,44	0,35	0,82	1,77

Infostat (2018). La tabla muestra los valores correspondientes al análisis estadístico descriptivo (n=10). D.E.: Desvío estándar

como un hueso plano.

En el análisis de correlación para las variables superficie total y volumen se encontró que existe una correlación significativa entre ellas ($r = 0,98$; $p < 0,0001$). Posteriormente, se realizó un análisis de regresión lineal para estudiar la relación funcional entre la superficie (variable X) y el volumen (variable Y) que reveló una relación lineal directa entre ambas variables ($R^2 = 0,95$ y $p < 0,0001$) (Figura 4).

Se encontró una relación estadísticamente significativa entre el peso y la densidad del C3 (Figura 5). Un mayor peso del C3 se correspondió con una mayor densidad del mismo ($R^2 = 0,62$ y $p < 0,0001$).

A fin de comprender de una mejor manera los efectos que produce la aplicación de una determinada carga sobre C3 se desarrollaron curvas características como la ya conocida "Esfuerzo vs. Deformación" que permite obtener información sobre el comportamiento mecánico. En la Figura 6, se muestra una gráfica representativa

correspondiente a la curva de deformación observada en el C3 luego del ensayo de compresión axial. Como puede observarse, el hueso es sometido a una fuerza progresiva y experimenta una serie de cambios dimensionales que llevan a su deformación. Una vez superado el límite de proporcionalidad (pérdida de la linealidad en la curva esfuerzo-deformación), se obtuvo la carga máxima que produjo la fractura. A partir de la curva, se puede calcular el módulo de elasticidad o de Young, que representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación que experimentó el hueso.

Luego del estudio de compresión se encontró que el hueso C3 soportó una fuerza promedio de $41,20 \pm 5,49$ KN antes de producirse la falla (fractura) y experimentó una deformación promedio de $7,05 \pm 0,77$ mm (Tabla 2).

No se encontraron diferencias significativas entre las piezas óseas pertenecientes a hembras ($n=5$) y a machos ($n=5$) en cuanto a la resistencia que presentaron durante el ensayo de compresión axial (Figura 7). Mientras que

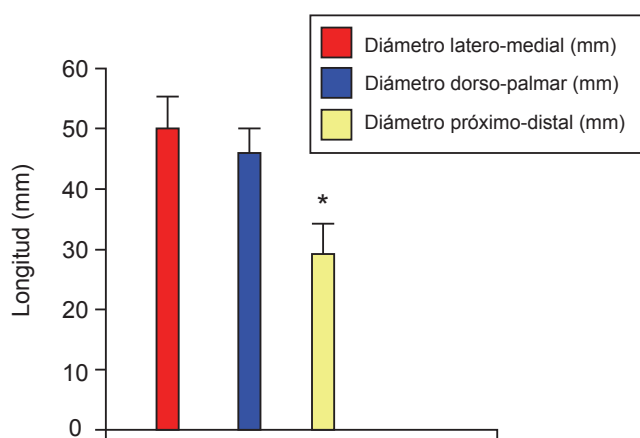


Figura 3. Diagrama de barras para los diámetros: latero medial, dorso palmar y próximo distal en el hueso carpo III ($n = 10$).

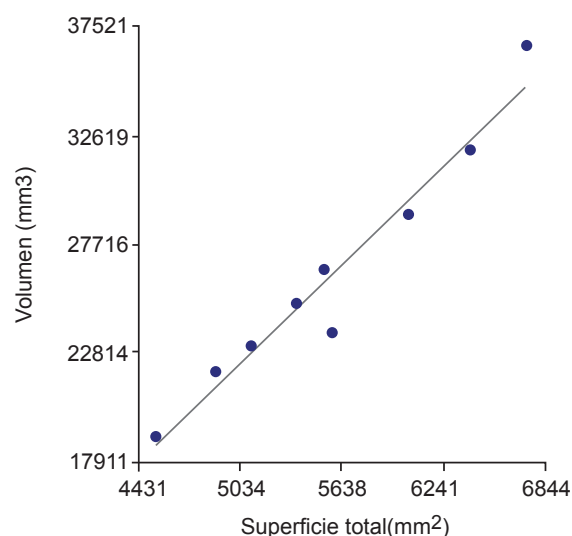


Figura 4. Regresión lineal simple para las variables volumen óseo (mm^3) vs. superficie total (mm^2). $n = 10$, $R=0,95$ y $p < 0,0001$; Infostat (2018).

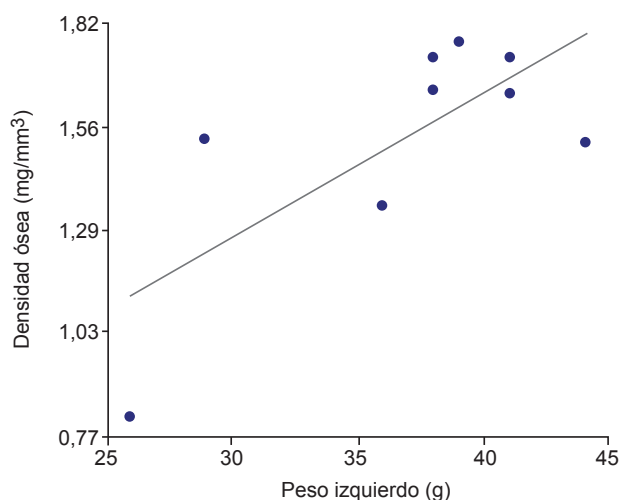


Figura 5. Regresión lineal simple para las variables densidad ósea (mg/mm^3) vs. Peso (g). $n = 10$, $R^2 = 0,62$ y $p < 0,0001$. Infostat (2018).

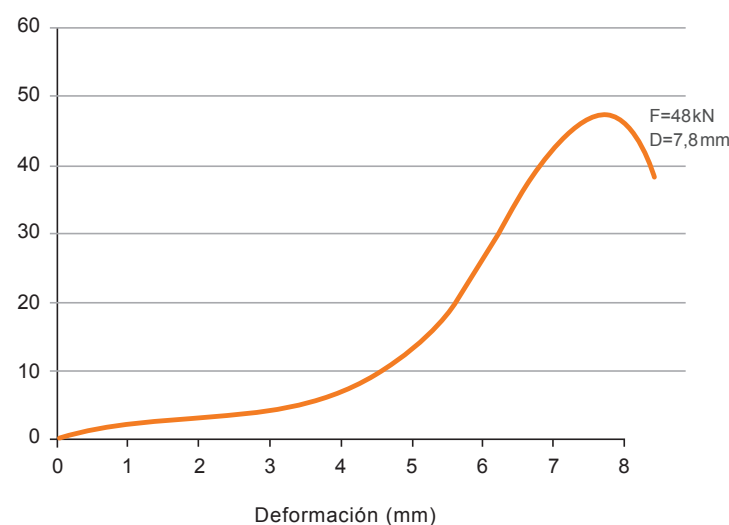


Figura 6. Representación gráfica de la curva de fuerza (carga) y deformación generada ante la compresión axial. F = fuerza; D = deformación. * Escala de F: 12 KN; Escala de L: 50 mm; Tiempo: 80 min.

Tabla 2. Resumen de los parámetros mecánicos del hueso carpo III (C3).

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
Resistencia (kN)	41,20	5,49	32,99	47,54
Deformación (mm)	7,05	0,77	5,43	7,69
Módulo de Young (N.mm ²)	5,88	0,82	4,38	7,17

Infostat (2018). La tabla muestra los valores correspondientes al análisis estadístico descriptivo (n=10).
D.E.: Desvío estándar

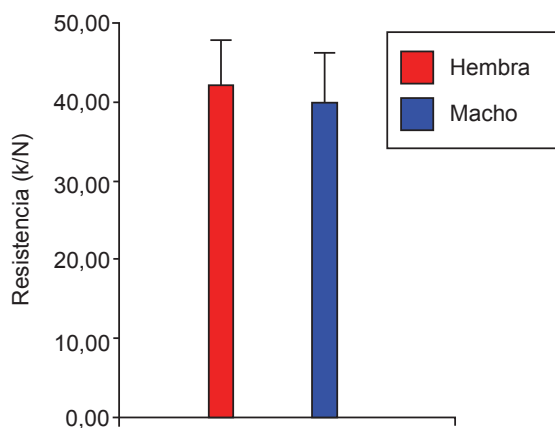


Figura 7. Resistencia al ensayo de compresión en los huesos carpo III de hembras (n=5) y machos (n=5).

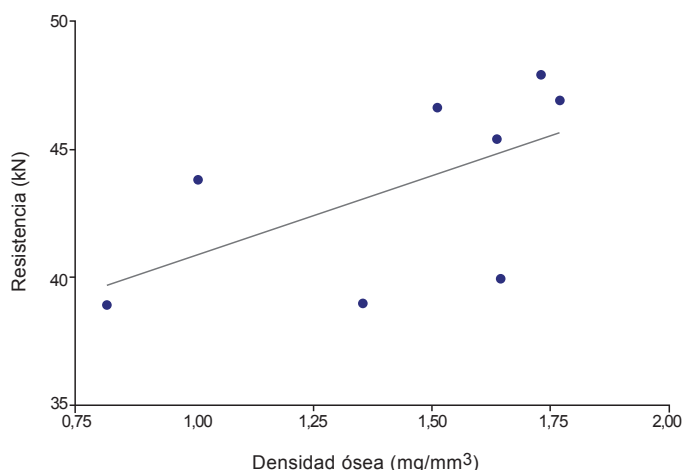


Figura 8. Correlación entre las variables resistencia (kN) y densidad del hueso (mg/mm³) ($R^2 = 0,34$; $p < 0,0006$).

en los huesos pertenecientes a hembras se encontró una resistencia máxima promedio de $42,10 \pm 5,80$ k/N, en los machos fue de $39,85 \pm 5,51$ k/N. La deformación soportada en las hembras fue de $7,19 \pm 0,87$ mm y en los machos de $6,84 \pm 0,65$ mm.

No se encontró una correlación entre la resistencia y la densidad del hueso, aunque puede observarse una tendencia lineal positiva entre estas dos variables ($R^2 = 0,34$; $p < 0,0006$) (Figura 8).

DISCUSIÓN

En equinos, la mayoría de los cuadros de afecciones locomotoras afectan al miembro anterior debido a su anatomía, su centro de balance y la distribución del peso. A su vez, hasta un 95% de las claudicaciones en miembro anterior se deben a afecciones ubicadas del carpo hacia distal¹⁹. En muchas ocasiones estas afecciones son subdiagnosticadas en la práctica clínica rutinaria debido al escaso dominio de la anatomía y biomecánica de esta región.

En los últimos 20 años se ha producido un extraordinario avance en los conocimientos relacionados con diferentes ramas biomédicas. Estudios previos utilizaron tomografía

computada para la adquirir imágenes que facilitaron el estudio de la patología tarsal en el equino²⁰. En el presente artículo se utilizaron imágenes obtenidas con un escáner óptico 3D. La posibilidad de utilizar el modelo en 3D digital ofrece muchas ventajas entre las que se encuentra la posibilidad de explorar la arquitectura del hueso y obtener información morfométrica a partir de la misma. En el presente estudio fueron analizadas piezas óseas pertenecientes a diez equinos mestizos criollos de ambos sexos y una edad promedio de 2,8 años.

Para lograr obtener el valor de resistencia de cada muestra se practicó el ensayo de compresión con orientación próximo-distal. Reportes previos utilizaron este ensayo y la ultrasonografía para comparar las propiedades biomecánicas del hueso C3 *ex vivo* e *in vivo* y reportaron una correlación entre la ultrasonografía y el módulo de Young obtenido en las pruebas de compresión *ex vivo*²¹. También se ha utilizado para comparar las características biomecánicas de la falange proximal de caballos mestizos criollos hembras y machos y reportado una mayor resistencia en animales machos¹⁷. En contraste con dicho estudio, en el presente trabajo no se encontraron diferencias significativas entre la resistencia de los huesos C3 pertenecientes a machos y

a hembras. Estos resultados coinciden con lo reportado en un trabajo sobre las propiedades biomecánicas del metacarpiano III de caballos mestizos criollos¹⁶.

Sorprendentemente, no se encontró una correlación significativa entre las variables de resistencia y densidad. La correlación entre densidad ósea y resistencia es un paradigma aceptado en anatomía humana y animal. Sin embargo, en los últimos años se ha comprobado que la resistencia ósea no depende solamente de su masa, sino también de sus propiedades geométricas, estructurales y materiales (mineralización y composición de la matriz), englobadas todas ellas en un concepto denominado calidad ósea²². Por otro lado, estudios en materiales porosos sintéticos han revelado que la resistencia mecánica del material puede aumentar con la porosidad y que esto depende de las variables utilizadas durante el proceso de síntesis²³. Una situación similar puede darse en estos casos y mostraría un modo de generar, a través de evolución biológica, estructuras óseas más resistentes y livianas. Tal proceso es probable que haya ocurrido en equinos, permitiendo el aumento de porte del animal durante su evolución. Debe notarse que la resistencia a la compresión (medida en este trabajo) no implica resistencia al impacto, que puede ser menor para materiales más porosos.

Es necesario mencionar que estudios posteriores

deberán considerar un mayor número de equinos para poder llegar a obtener un tipo de estandarización e inferencia del C3 de un equino criollo argentino. Además, es necesario considerar otros factores, tales como evaluar equinos de distintas edades, zonas del país, tipo de manejo nutricional, antecedentes de lesiones, etc.

CONCLUSIÓN

Este estudio reveló que a medida que aumenta el peso del hueso este posee mayor densidad y mayor capacidad de absorción de energía durante la prueba de compresión. No hubo diferencias significativas en la resistencia ante una prueba de impacto entre animales hembra y machos. Estos resultados pueden contribuir a estudios clínicos y fisiológicos de esta región anatómica.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por Secyt UNRC (Res.083/20). PPI 2020-2022.

Conflictos de interés

Los autores de este artículo declaran que no existen conflictos de interés asociados con su publicación.

REFERENCIAS

1. Sisson S, Grossman JD, Getty R. Anatomía de los animales domésticos. Tomo I. 2001. 5° edición. Barcelona Editorial Elsevier.
2. König HE, Liebich HG. Anatomía de los animales domésticos: órganos, sistema circulatorio y sistema nervioso. 2005. Editorial Médica Panamericana.
3. Stashak TS. El pie en Claudicación. 2004. En: Stashak TS, editor. Adams: Claudicación en el Caballo. 5th ed. Buenos Aires: Inter-médica pp. 910-923.
4. Watts EJ, Rose MT. Platelet-derived growth factor acts via both the Rho-kinase and p38 signaling enzymes to stimulate contraction in an in vitro model of equine wound healing. *Domest Anim Endocrinol*. 2010; 38(4): 253-259.
5. Lacopetti I, Perazzi A, Ferrari V, Busetto R. Application of Platelet-Rich Gel to Enhanced Wound Healing in the Horse: A Case Report. *J. Equine Vet Sci*. 2012; 32:123-128.
6. Hodgson DR, McGowan CM, McKeever K. The athletic horse: principles and practice of equine sports medicine. 2013. Elsevier Health Sciences.
7. Markel MD, Sielman E. Radiographic study of homotypic variation of long bones in dogs. *Am J Vet Res*. 1993; 54(12): 2000-2003.
8. Malekipour F, Whitton RC, Lee PVS. Distribution of mechanical strain in equine distal metacarpal subchondral bone: A microCT-based finite element model. *Medicine in Novel Technology and Devices* 2020; 6:100036.
9. Martig S, Hitchens PL, Lee PV, Whitton RC. The relationship between microstructure, stiffness and compressive fatigue life of equine subchondral bone. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2020; 101:103439.
10. Uhlhorn H, Eksell P, Sandgren B, Carlsten J. Sclerosis of the Third Carpal Bone. A Prospective Study of its Significance in a Group of Young Standardbred Trotters. *Acta Vet Scand*. 2000; 41:51-61.
11. Secombe CJ, Firth EC, Perkins NR, Anderson BH. Pathophysiology and diagnosis of third carpal bone disease in horses: a review. *N Z Vet J*. 2002; 50(1): 2-8.
12. Botero LG, Arango ER. Fractura completa del tercer hueso carpiano en un caballo de carreras psi. *Ces. Med. Vet. Zoote*. 2006; 1(2): 56-63.
13. Murray RIC, Dyson SJ. Cap 21: Equine Carpus. En: Thrall, D. E. Textbook of Veterinary Diagnostic Radiology-E-Book. 2017. Elsevier Health Sciences.
14. Caeiro Rey JR. Calidad ósea y ranelato de estroncio. *Rev Osteoporos Metab Miner* 2010; 2(1): S10-S15.
15. Wang M, Chen LJ, Ni J, Weng J, Yue CY. Manufacture and evaluation of bioactive and biodegradable materials and scaffolds for tissue engineering. *J Mater Sci Mater Med*. 2001;12(10):855-860.
16. Natali J, Osimani JN, Moine RM, Gigena MS, Fioretti C, Mouguelar H, y col. Resistencia del hueso metacarpiano III de equino mestizo criollo: prueba de impacto en el tercio proximal de la diáfisis. En Convención Internacional Virtual de Ciencias Morfológicas. 2016. [En línea] Disponible en: <http://www.morfovvirtual2016.sld.cu/index.php/Morfovvirtual/2016/paper/view/140> (consultado 07/03/2021)
17. Natali J, Fioretti R, Moine R, Gigena S, Mouguelar H, Varela M. y col. Morfología y comportamiento biomecánico de la falange proximal de la mano del caballo mestizo criollo. *Ab Intus* 2019; 3(2):56-62.
18. Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
19. Ross M. The Carpus. En: Ross M, S Dyson (eds). *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse*. 2nd ed. Elsevier, St. Louis, Missouri, USA. 2011: 426 – 449.
20. Raes E, Bergman HJ, Van Ryssen B, Vanderperren K, Stock E, Saunders JH. Computed tomographic features of lesions detected in horses with tarsal lameness. *Equine Vet J*. 2014; 46(2): 189-193.

21. Fradinho MJ, Vale AC, Bernardes N, Caldeira RM, Vaz MF, Ferreira-Dias G. Biomechanical properties of the equine third metacarpal bone: In vivo quantitative ultrasonography versus ex vivo compression and bending techniques. *J Equine Vet Sci.* 2015; 35(3):198-205.
22. Guede D, González P, Caeiro JR. Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. *Rev Osteoporos Metab Miner* 2013; 5(1): 43-50.
23. Rivero RE, Alustiza F, Rodríguez N, Bosch P, Miras MC, Rivarola CR, Barbero CA. Effect of functional groups on physicochemical and mechanical behavior of biocompatible macroporous hydrogels. *React Funct Polym* 2015; 97: 77-85.



Este artículo está bajo una Licencia Creative Commons.
Atribución-No Comercial-Sin Derivadas 4.0 Internacional
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>