

El significado funcional de los cíngulos anterior y posterior en el rinoceronte *Alicornops simorreense* (Lartet, 1851) mediante el análisis de elementos finitos

Functional significance of the anterior and posterior cingula in the rhinoceros *Alicornops simorreense* (Lartet, 1851) by means of finite element analysis

Oscar Sanisidro Morant¹, Beatriz Soriano Estivalis² & Adolfo Alonso Durá²

¹Museo Nacional de Ciencias Naturales – CSIC. C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006. Madrid. E-mail: osanisidro@mncn.csic.es

²Mecánica de los Medios Continuos. ETSAV. Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Vera, 14. 46022.

Resumen

El análisis de elementos finitos (AEF) es un método numérico desarrollado originalmente para simular la respuesta mecánica de fuerzas discretas aplicadas sobre estructuras complejas. Se pretende analizar el papel de los cíngulos anterior y posterior en el proceso de masticación en rinocerontes. Se ha utilizado un modelo 3D simplificado de un molar genérico de rinoceronte obtenido a partir de un M1 superior del rinoceronte *Alicornops simorreense* procedente de Nombrevilla (Zaragoza). Los resultados muestran una mayor concentración de tensiones alrededor del valle central y, en menor medida, una disminución de las mismas en el ectolofa del modelo con cíngulos. El molar con cíngulos también muestra una mayor resistencia a la deformación producida por las fuerzas de masticación.

Palabras clave: AEF, Rhinocerotidae, Perissodactyla, Mioceno, distribución de tensiones, biomecánica.

Abstract

Finite element analysis (FEA) is a numerical method originally developed for simulate the mechanical response of complex structures to discrete forces. Our work pretends to analyze the significance of the anterior and posterior cingula in the rhinoceros masticatory process. We have used a simplified 3D model of an upper M1 from the rhinoceros *Alicornops simorreense* from Nombrevilla (Zaragoza). Results show that most strains are concentrated around the central valley and, to a lesser extent, a decreasing in the strains supported by the anterior and posterior walls of the model with cingula. The molar with cingula also offers a better resistance to deformation caused by biting forces.

Keywords: FEA, Rhinocerotidae, Perissodactyla, Miocene, stress distribution, biomechanics.

INTRODUCCIÓN

El análisis de elementos finitos (AEF) es una herramienta inicialmente diseñada para resolver problemas complejos de ingeniería. Una forma natural de proceder a la hora de afrontar un sistema complejo es separarlo en sus componentes individuales o "elementos" cuyo comportamiento pueda reproducirse sin dificultad (Zienkiewicz, 1980). Estos sistemas complejos implican la creación de una réplica del objeto de estudio, que puede ser una copia física (Qasim, *et al.*, 2005) o virtual (Anderson, *et al.*, 2011). Dada la naturaleza de los fósiles, el AEF se muestra de gran utilidad para simular condiciones de estrés mecánico en modelos virtuales que de otro modo serían extremadamente complicadas de reproducir.

El cíngulo se puede definir como la plataforma de esmalte que rodea total o parcialmente la base de la corona dental (Anderson, *et al.*, 2011). Su función original está relacionada con la protección gingival en mamíferos primitivos (Kermack, *et al.*, 1968). En mamíferos más derivados su uso se amplía, proporcionando un refuerzo estructural a la arquitectura dentaria o ejerciendo como superficie adicional de abrasión. La presencia de cíngulos en rinocerontes ha sido ampliamente empleada como carácter filogenético (Antoine, 2002; Cerdeño, 1995). Sin embargo, su extensión y potencia varía incluso dentro de una población, especialmente en el caso de los cíngulos labial y lingual en rinocerontes (Cerdeño, 1995).

La superficie oclusal de los molares en la familia Rhinocerotidae tiene forma de letra "p" y queda dividida en dos planos de orientación, correspondientes a las dos fases principales de masticación. Éstas últimas fueron descritas en primer lugar en primates (Hiemäe, 1978), generalizándose al resto de mamíferos posteriormente (Fortelius, 1985). Las fuerzas oclusivas y de rozamiento de la fase I de masticación se distribuyen principalmente por el ectolofa, mientras que las fuerzas de rozamiento, que se distribuyen por el resto de la superficie oclusal, serían las principales fuerzas de la fase II.

Este estudio, de carácter preliminar, pretende esclarecer el papel de los cíngulos en la mecánica del diente durante la masticación. Para ello se han aplicado fuerzas idénticas a dos molares, uno sin cíngulos y otro con ellos empleando el análisis de elementos finitos. Ante esto se plantean dos alternativas:

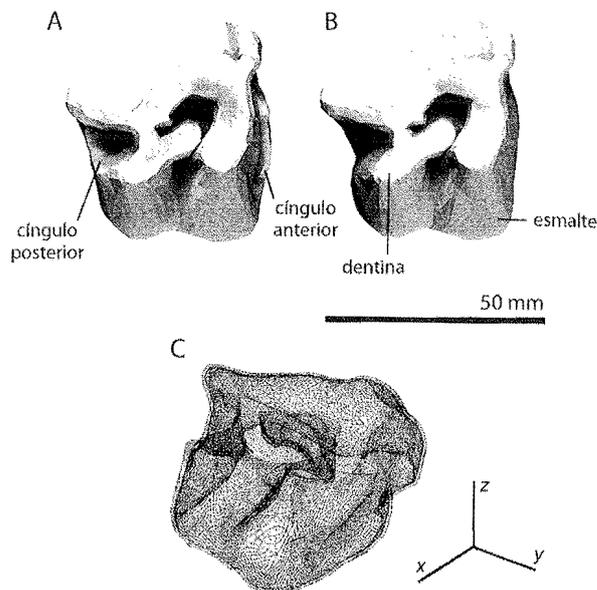


Figura 1. Modelos tridimensionales del primer molar superior derecho de *Alicornops simorreense* MNCN 57141. A, modelo original en vista oclusal. B, modelo sin cíngulos anterior y posterior en vista oclusal. C, mallado del modelo original con cíngulos. Escala: 50 mm.

Si los cíngulos aportan alguna ventaja mecánica, se observará una dispersión de las tensiones mecánicas desde la superficie oclusal hacia las regiones adyacentes, así como una concentración de tensión en ambos cíngulos en el molar con cíngulos. También debería apreciarse una disminución de las deformaciones laterales.

En el caso contrario, podemos inferir que no existen diferencias observables en la disipación del estrés mecánico entre ellos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha escogido como modelo de estudio el molar superior de *Alicornops simorreense* MNCN 57141 procedente de Nombrevilla (Zaragoza) debido a que esta especie presenta cíngulos anterior y posterior bien desarrollados, relativamente pocos pliegues secundarios del esmalte (que podrían enmascarar el papel de los cíngulos) y se dispone de material en buen estado de conservación. Para más información acerca de la localidad de Nombrevilla y el aceraterino *A. simorreense* aconsejamos

consultar los trabajos de Hernández-Pacheco, Santafé y Cerdeño (Cerdeño & Sánchez, 2000; Hernández-Pacheco, 1926; Santafé, *et al.*, 1982).

En términos generales se ha seguido la metodología propuesta por DeMiguel (2009). Se ha digitalizado la superficie del diente con un escáner 3D de superficie NextEngine 2020i. Una vez obtenido el modelo en bruto se ha simplificado y refinado el mallado (figura 1A). A continuación se ha creado un nuevo diente sin cíngulos modificado a partir del primero para que actúe como control (figura 1B). Para el análisis AEF se ha utilizado el programa AV-Cid (Alonso Durá, 2011). Al tratarse de una digitalización tridimensional de superficie ha sido necesario diferenciar dos capas: una más externa de 2 mm de espesor que representa el esmalte (aproximación tomada a partir de diferentes medidas a lo largo del borde oclusal de la pieza) y otra interna que representa la dentina (figura 1C). A cada capa se le han aplicado sus correspondientes propiedades constitutivas obtenidas de la bibliografía (Lüpke, *et al.*, 2010), quedando representadas en la tabla 1. Se ha asumido un modelo de comportamiento lineal e isotrópico para ambos materiales y un anclaje perfecto para toda la base del diente. La orientación de las fuerzas ha sido estimada en base al vector resultante de cada uno de los tres principales músculos responsables de la masticación (masetero, temporal y pterigoideo interno por orden de importancia en perisodáctilos). Para reconstruir la orientación muscular se han empleado el cráneo MNCN 30768 y la mandíbula MNCN 31856, procedentes de Moraleja de Enmedio y Toril respectivamente (figura 2). La mandíbula ha sido escalada hasta coincidir con la dentición superior y la articulación mandibular.

Ante la falta de estudios acerca de la fuerza de mordida en rinocerontes, se ha aplicado una fuerza de 248 N durante la primera fase de oclusión y 875 N durante la segunda fase, en la que predomina el rozamiento (Staszyk, *et al.*, 2006). Ambas medidas, procedentes de estudios en caballos domésticos (*Equus caballus* Linnaeus, 1758) deben ser tenidas en cuenta como aproximadas. Cabe señalar que en el caso que nos ocupa, el valor de la fuerza no es determinante ya que la finalidad del estudio es observar la diferencia de tensiones entre ambos modelos de forma cualitativa.

En total se han planteado seis combinaciones de fuerzas y modelos, correspondientes a las dos fases de masticación y una tercera fase hipotética (fruto de la combinación de las dos anteriores) aplicadas a un molar con cíngulo y otro sin él.

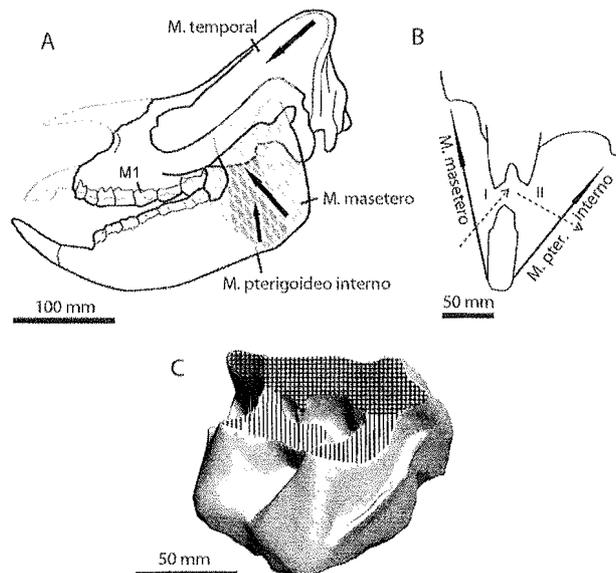


Figura 2. A, representación esquemática de un individuo genérico de *Alicornops simorrense* (Lartet, 1856) en base al cráneo MNCN 30768 procedente de Moraleja de Enmedio y MNCN 31856 procedente de Toril en vista lateral. Las partes no conservadas están representadas en un tono más claro. B, esquema de los ángulos resultantes de las fuerzas en vista anterior. C, modelo con cíngulo donde se muestran las zonas de distribución de las fuerzas. En líneas verticales se representa la fase I de masticación y en líneas horizontales la fase II. Escala: A, 100 mm; B, 50 mm.

RESULTADOS

Al aplicar las fuerzas correspondientes a cada una de las fases de masticación por separado no se han alcanzado tensiones críticas, por lo que únicamente se ha representado la combinación de ambas fuerzas en cada uno de los modelos a modo de síntesis (figuras 3A y 3B). Como se aprecia en ambos, las tensiones de Von Mises se distribuyen fundamentalmente alrededor de las superficies oclusales más próximas a protocono e hipocono, propagándose en profundidad por el valle medio hasta las bases de protolofo y metalofo. En el caso del modelo sin cíngulos anterior y posterior, las cargas quedarían concentradas en los puntos de contacto oclusal

próximos a la región lingual del valle central y en los conos de la región lingual del diente. En el caso del molar con cíngulos las tensiones aumentan en el protocono mientras que disminuyen en el hipocono. Además, las regiones anterior y posterior sufren una disminución considerable de las tensiones, quedando concentradas en las crestas de los cíngulos. Los valores de tensión en estas zonas son de $0,5 \text{ N/mm}^2$ para el molar con cíngulos y de $1,9 \text{ N/mm}^2$ para el molar sin cíngulos (Fig. 3A y B).

En segundo lugar, los resultados de las deformaciones obtenidas muestran que el modelo con cíngulos sufre un menor desplazamiento frente a los movimientos laterales, más evidente en protocono e hipocono (Fig. 3C y D).

DISCUSIÓN

Para valorar el papel mecánico de los cíngulos en la masticación entre ambos modelos se han tenido en cuenta dos aspectos: la variación en las tensiones superficiales y las diferencias en los patrones de deformación.

Las tensiones se concentran principalmente alrededor de la zona oclusal próxima a protocono e hipocono y en la desembocadura del valle central (figura 3A y 3B). Las diferencias de tensiones entre los conos linguales de ambos modelos son considerables. Mientras que la reducción de tensión en el hipocono del molar con cíngulos puede ser debida a la dispersión de tensiones proporcionada por el cíngulo posterior, el caso del protocono es de difícil interpretación, ya que, aunque el cíngulo anterior concentra tensiones, estas también aumentan en el protocono. Posteriores análisis incluyendo un cíngulo lingual podría ayudar a determinar el mecanismo de dispersión de fuerzas en esta estructura.

Los pliegues secundarios en el valle central (como cristas, ganchos y antiganchos) de especies más hipsoodontas podrían estar relacionados con su refuerzo, como sugieren estudios previos con artiodáctilos (DeMiguel, *et al.*, 2009). Esto podría indicar que se trata de un patrón de comportamiento mecánico general a ungulados. La presencia de cemento en rinocerontes también actuaría del mismo modo, aumentando la resistencia de dicha cavidad, ya que cuando está presente rellena en primer lugar el valle central. La función del cemento sería doble, aportando un cierto refuerzo estructural y generando

más resistencia a la abrasión. En cuanto a las tensiones de las caras anterior y posterior del diente, observamos una reducción general en la tensión superficial del molar con cíngulos y una concentración de tensión en las crestas de los mismos (figura 3B), lo que indica cierta participación de los mismos a la hora de disipar las fuerzas.

La diferencia de tensiones en las caras anterior y posterior entre ambos modelos es baja, lo que sugiere una función complementaria para los cíngulos. El análisis de deformación muestra el importante papel de los cíngulos anterior y posterior a la hora de restringir el movimiento lateral durante las fases I y II de la mordida. La presencia de los cíngulos ayudaría por tanto a evitar la posibilidad de fractura del diente mediante la resistencia a deformaciones laterales, claramente observables a lo largo del ectolofo (figura 3C). La resistencia a la deformación en el molar con cíngulos confirmaría la importancia de estos ante las fuerzas de masticación (figura 3D).

La función más intuitiva de un cíngulo es la de actuar a modo de refuerzo estructural, a modo de "contrafuertes" del propio diente, absorbiendo las cargas desde puntos menos resistentes de la pieza. La propia estructura del cíngulo, formado por un plegamiento y engrosamiento del esmalte y la menor tensión registrada en las caras anterior y posterior del ejemplar con cíngulos parece apoyar esta posibilidad. Sin embargo, nuestros resultados parecen indicar que los pliegues del valle central en rinocerontes tienen un papel más relevante en la dispersión mecánica que los cíngulos anterior y posterior. Para obtener resultados más concluyentes sería necesario un cálculo directo de la fuerza de mordida en rinocerontes así como un aumento en el detalle de los modelos.

CONCLUSIONES

El análisis de elementos finitos se muestra como un método muy útil para valorar la respuesta biomecánica de la dentición en mamíferos. La posibilidad de realizar modificaciones en los modelos originales ante las mismas fuerzas externas para testar las hipótesis de trabajo permite aislar los efectos de estructuras aisladas y determinar su eficiencia mecánica. Este trabajo preliminar muestra el papel de los cíngulos como elementos que proporcionan estabilidad estructural en rinocerontes, y en menor

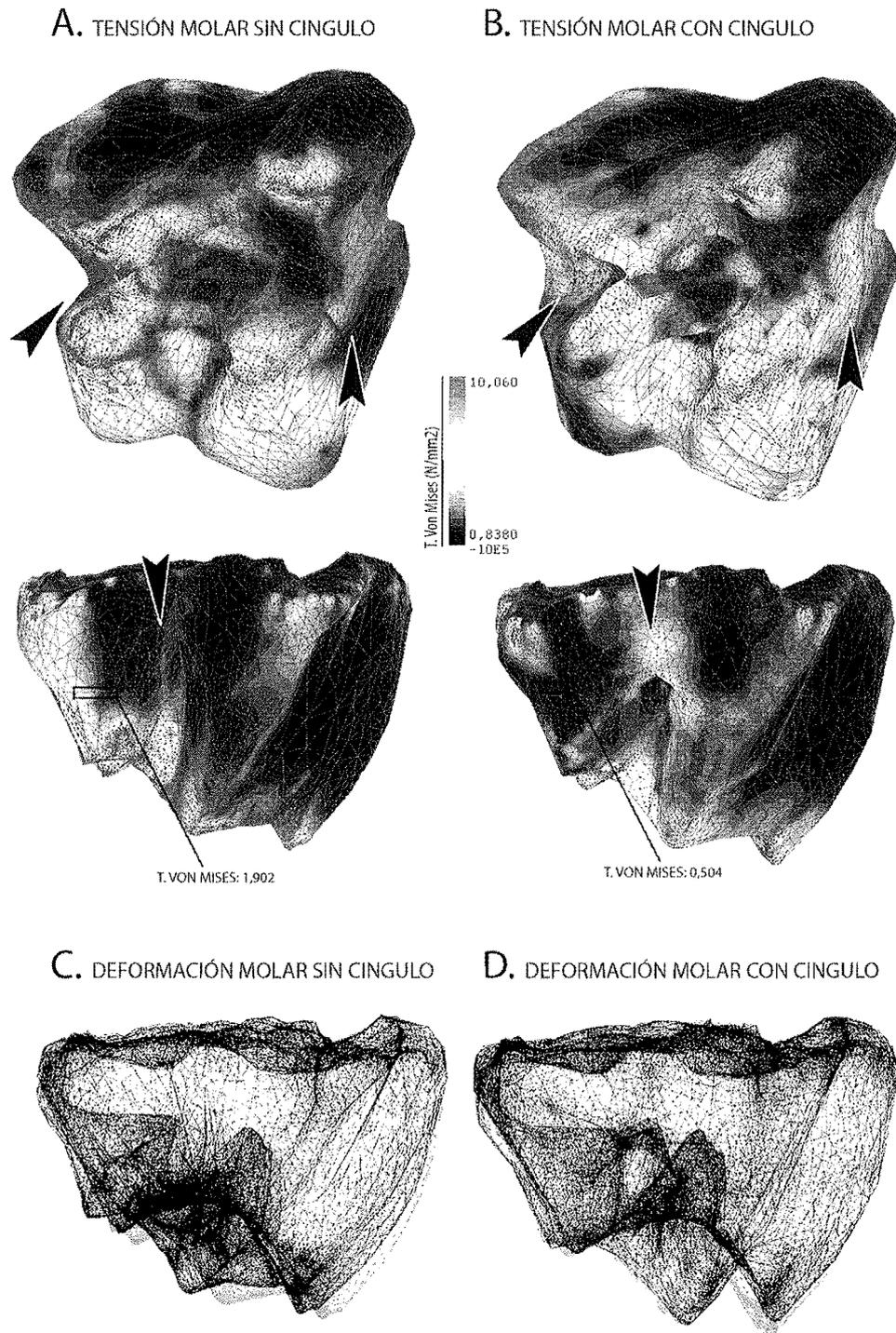


Figura 3. A, distribución de tensiones de Von Mises (MPa) en el modelo sin cingulos a partir de la combinación de carga oclusal simultánea de las dos fases de masticación 248 N y 875 N (a partir de los ángulos representados en la figura 2) en vistas oclusal y posterior. B, modelo con cingulos con la misma carga oclusal que el anterior en vistas oclusal y posterior. C-D, diagramas envolventes de deformación confeccionados a partir de la misma combinación de fuerzas para los modelos sin cingulos y con cingulos respectivamente en vista lateral.

medida, como estructuras de dispersión directa del estrés. Su presencia favorecería la eficiencia masticatoria en *Alicornops simorreense*. Futuros análisis teniendo en cuenta la interacción entre las distintas piezas de una serie dental o los cálculos de la fuerza de mordida en rinocerontes servirán para afinar con los resultados, permitiendo establecer la eficiencia biomecánica y relacionándola con la señal filogenética del grupo.

Modelo	Material	Modulo de Young (N/m ²)	Coefficiente de Poisson	Número de elementos	Número de nodos
Con cíngulo	esmalte	84100	0.2	53.378	26.542
	dentina	18600	0.31	64.483	
Sin cíngulo	esmalte	84100	0.2	90.742	39.313
	dentina	18600	0.31	83.828	

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los diferentes materiales empleados en el presente trabajo. Debido a la falta de información en tejidos de Rhinocerotidae, se ha asumido los valores publicados para équidos (Lüpke, et al., 2010).

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha beneficiado de los útiles comentarios de Daniel De Miguel y un segundo revisor anónimo que han ayudado a mejorar en gran medida el manuscrito. Agradecemos a Juan López Cantalapiedra la ayuda prestada durante el escaneado de la pieza, a Israel García Paredes por sus útiles comentarios e ideas y a Adriana Oliver Pérez y Verónica Hernández Ballarín por sus sugerencias. Oscar Sanisidro se beneficia de una beca predoctoral FPU dependiente del Ministerio de Educación y Ciencia (MICINN) adscrita al proyecto CGL2008-05813-CO2-01 y al grupo de investigación BSCH-UCM 910607.

REFERENCIAS

- Alonso Durá, A. 2011. AVCid (Versión de investigación). Software desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Anderson, P.S.L., Gill, P.P. & Rayfield, E.J. 2011. Modeling the Effects of Cingula Structure on Strain Patterns and Potential Fracture in Tooth Enamel. *Journal of Morphology* **272**: 50-65.
- Antoine, P.O. 2002. Phylogénie et évolution des Elasmotheriina: (Mammalia, Rhinocerotidae). *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle* **188**: 5-350.
- Cerdeño, E. 1995. Cladistic analysis of the Family Rhinocerotidae (Perissodactyla). *American Museum Novitates* **3143**: 1-25.
- Cerdeño, E. & Sánchez, B. 2000. Intraspecific variation and evolutionary trends of *Alicornops simorreense* (Rhinocerotidae) in Spain. *Zoologica Scripta* **29(4)**: 275-305.
- DeMiguel, D. 2009. Morfología Funcional y Biomecánica de la Dentición en Rumiantes (Mammalia, Artiodactyla). Aplicación del Desgaste Dentario en la Reconstrucción Paleoambiental del Mioceno de la Cordillera Ibérica. *Departamento de Ciencias de la Tierra. Área de Paleontología. Facultad de Ciencias*, 378 pp.
- DeMiguel, D., Cegoñino, J., Azanza, B., Ruiz, I. & Morales, J. 2009. The chewing biomechanics of deer analyzed by Finite Element Method (FEM). *Journal of Vertebrate Paleontology* **29**: 113.
- Fortelius, M. 1985. Ungulate cheek teeth: developmental, functional and evolutionary interrelations. *Acta Zoologica Fennica* **180**: 1-76.
- Hernández-Pacheco, F. 1926. Nota sobre la estratigrafía y los mamíferos miocénicos de Nombrevilla (Zaragoza). *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España* **47**: 1-10.
- Hiiemäe, K.M. 1978. Mammalian mastication: a review of the activity of the jaw muscles and the movements they produce in chewing. in Butler, P.M. & Joysey, K.A. (Eds.), *Development, function and evolution of teeth*. Academic Press, London, 359-398.
- Kermack, D.M., Kermack, K.A. & Mussett, F. 1968. The Welsh pantothere *Kuehneotherium praecursoris* *Zoological Journal of the Linnean Society* **47**: 407-423.
- Lüpke, M., Gardemin, M., Kopke, S., Seifert, H. & Staszky, C. 2010. Finite element analysis of the equine periodontal ligament under masticatory loading. *Wien. Tierärztl. Mschr. - Vet. Med. Austria* **97**: 101-106.

- Qasim, T., Ford, C., Bush, M.B., Hu, X., Malament, K.A. & Lawn, B.R. 2005. Margin Failures in Brittle Dome Structures: Relevance to Failure of Dental Crowns. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* (73): 179-185.
- Santafé, J.V., Casanovas-Cladellas, M.L. & Alférez, F. 1982. Presencia de *Aceratherium tetradactylum* (Artet, 1837) y *A. (Alicornops) simorreense* (Larte 1851) (Mamm. Perissodactyla) en el Vallesiense Inferior de Nombrevilla. *Acta Geologica Hispanica* 17(1-2): 61-74.
- Staszyk, C., Lehmann, F., Bienert, A., Ludwing, K. & Gasse, H. 2006. Measurement of masticatory forces in the horses. *Pferdeheilkunde* 22: 12-16.
- Zienkiewicz, O.C. 1980. El método de los elementos finitos. Editorial Reverté, S. A., 700 pp.