

Diagénesis en los niveles de organización más bajos del hueso: estado de la cuestión y vías de abordaje en estudios zooarqueológicos

Diagenesis at the Bone's Lowest Levels of Organization: State of the Art and Approaches in Zooarchaeology

Diagênese nos níveis mais baixos de organização óssea: estado da arte e abordagens em estudos zooarqueológicos

Recibido: 28/05/2024 • Aprobado: 30/01/2025 • Publicado: 01/05/2025



Natalia Soledad Morales

División Antropología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, La Plata, Argentina
moralesnatalia@fcnym.unlp.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-6649-7043>

Paula Galligani

División Antropología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, La Plata, Argentina
paulagalligani@gsuite.fcnym.unlp.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-3949-5333>

Gustavo Barrientos

División Antropología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, La Plata, Argentina
barrient@museo.fcnym.unlp.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-1875-6792>

Resumen

Las alteraciones diagenéticas comprenden aquellos cambios físicos y químicos que experimentan los restos orgánicos (*v. g.*, los tejidos duros) bajo condiciones de enterramiento. En zooarqueología, las investigaciones orientadas a evaluar los efectos

de los procesos diagenéticos que operan en los niveles de organización más bajos del hueso —determinantes de su probabilidad de supervivencia en los depósitos arqueológicos— han tenido, hasta el presente, un escaso desarrollo. Con el objetivo de promover e incentivar la práctica de la investigación diagenética, particularmente en el ámbito latinoamericano, este trabajo presenta una síntesis actualizada de los estudios sobre diagénesis ósea en ambientes terrestres. Se resumen los fundamentos de la diagénesis ósea y se describen los parámetros diseñados para su medición. Por último, se propone una estrategia de abordaje del problema útil en contextos de acceso limitado a recursos, como aquellos que caracterizan a nuestra región.

Palabras clave: zooarqueología, registro óseo, tafonomía, diagénesis, parámetros

Abstract

Diagenetic alterations include the physical and chemical changes experienced by organic remains (e.g., hard tissues) under burial conditions. In zooarchaeology, research aimed at evaluating the effects of diagenetic processes operating at the lowest levels of bone organization—which determine the probability of survival in archaeological deposits—has, to date, seen little development. With the aim of promoting and encouraging the practice of diagenetic research, particularly in Latin America, this paper presents an updated overview of studies on bone diagenesis in terrestrial environments. The fundamentals of bone diagenesis are reviewed, and the parameters used to measure it are described. Finally, a strategy is proposed for approaching this issue particularly useful in contexts with limited access to resources, such as that characteristic of our region.

Keywords: zooarchaeology, bone record, taphonomy, diagenesis, parameters.

Resumo

As alterações diagenéticas incluem aquelas mudanças físicas e químicas que os restos orgânicos (por exemplo, tecidos duros) sofrem sob condições de sepultamento. Na zooarqueologia, a pesquisa que visa avaliar os efeitos dos processos diagenéticos que operam nos níveis mais baixos da organização óssea — determinantes de sua probabilidade de sobrevivência em depósitos arqueológicos — teve, até o momento, pouco desenvolvimento. Com o objetivo de promover e incentivar a pesquisa diagenética, particularmente na América Latina, este trabalho apresenta uma síntese atualizada de estudos sobre diagênese óssea em ambientes terrestres. Os fundamentos da diagênese óssea são resumidos e os parâmetros para sua medição são descritos. Por fim, é proposta uma estratégia de abordagem do problema útil em contextos de acesso limitado a recursos, como os que caracterizam nossa região.

Palavras-chave: zooarqueologia, registro ósseo, tafonomia, diagênese, parâmetros

Introducción

En la segunda mitad del siglo XX, el paleontólogo alemán A. H. Müller (1951 y 1963) diferenció dos grandes campos de estudio: la bioestratigrafía, orientada

a generar conocimiento acerca de los procesos que ocurren entre la muerte de un organismo y el entierro o la incorporación a la litosfera de sus restos, y la diagénesis (*Fossildiagenese* en el original en alemán), dedicada a la comprensión de los procesos que ocurren después del entierro de los restos orgánicos¹. Posteriormente, ambos campos se integraron en uno más amplio, la tafonomía (Lawrence 1968), entendida como el estudio de los procesos de conservación o destrucción de los restos orgánicos y de cómo dichos procesos afectan la información contenida en el registro fósil (Behrensmeyer y Kidwell 1985, 105; cf. Efremov 1940).

A partir de la década de 1970, la tafonomía comenzó a incorporarse activamente en las investigaciones zooarqueológicas, mediante estudios enfocados en procesos tanto bioestratinómicos como diagenéticos (Behrensmeyer y Kidwell 1985; Gifford 1981; Lyman 1994). La razón de ello es que se reconoció su importancia para distinguir los rastros de la acción humana de la de otros organismos y también para identificar los procesos naturales que pueden afectar la conservación, a largo plazo, de los tejidos animales (Gifford-Gonzalez 2018). En el caso de la diagénesis, entendida como el conjunto de los cambios físicos y químicos que experimentan los huesos² de los vertebrados en su contexto de enterramiento (Hedges 2002; Hedges *et al.* 1995; Kendall *et al.* 2018; Marden *et al.* 2013; Trueman y Tuross 2002), los estudios zooarqueológicos han abordado principalmente el análisis de marcas, grabados, tinciones, fisuras, descamaciones o fracturas observables a ojo desnudo o con bajos aumentos (*v. g.*, Fisher 1995). El análisis de las modificaciones que se manifiestan en los niveles más bajos dentro de la jerarquía estructural del hueso (micro, submicro, nano y subnano) es aún minoritario dentro del campo. Esto es así a pesar de que se ha demostrado que son los cambios en esos niveles los responsables de la capacidad de respuesta del hueso a los diferentes factores ambientales y, por tanto, los que determinan su probabilidad de supervivencia a mediano y largo plazo (Kendall *et al.* 2018; Smith 2002), así como la conservación de sus propiedades físicas —*v. g.* mecánicas (Turner-Walker y Parry 1995) y químicas, *v. g.* relaciones isotópicas y minerales biogénicos (Trueman *et al.* 2008)—.

Aunque las observaciones y los estudios de interés diagenético tienen una larga historia, que se remonta por lo menos a la segunda mitad del siglo XIX

1 Para una posición crítica acerca de la correspondencia estricta entre diagénesis ósea y procesos posentierro, véase Bell (2012).

2 Con el fin de simplificar el discurso, en este trabajo utilizaremos —siguiendo a Lyman (1987, 251)— *hueso* como un término genérico para connotar hueso, asta y diente. En este sentido, el término englobaría todos los tejidos duros presentes en los vertebrados.

(v. g. Roux 1887; Schaffer 1895; Wedl 1864), fue recién a partir de la década de 1990 que se llevaron a cabo investigaciones sistemáticas destinadas a establecer las causas, los modos y la secuencia de destrucción de los huesos en ambientes sedimentarios (v. g. Child 1995a; Collins *et al.* 2002; Hedges 2002; Hedges y Millard 1995; Hedges *et al.* 1995; Jans *et al.* 2004; Kars y Kars 2002; Nielsen-Marsh y Hedges 2000). En este marco, se han estudiado las condiciones que promueven o inhiben los diferentes mecanismos de alteración diagenética y modulan su tasa de progresión, como la historia bioestratinómica —v. g., prácticas antrópicas, como el hervido de los huesos—, las propiedades texturales, químicas e hidrológicas de los suelos, y la actividad microbiana (v. g. Gallo *et al.* 2021; Kendall *et al.* 2018; Roberts *et al.* 2002), al tiempo que se han desarrollado y probado diferentes indicadores o parámetros diagenéticos que miden los efectos de uno o más de estos mecanismos (v. g. DeNiro 1985; Hedges *et al.* 1995; Smith *et al.* 2007; Weiner y Bar-Yosef 1990). Algunas de estas contribuciones han conducido a la definición de un nuevo campo de estudio, la histotafonomía, *i. e.* tafonomía a escala microestructural o inferior (*cf.* Bell 2012), que hace uso, entre otras, de técnicas de análisis por imágenes, como micrografías obtenidas con microscopía óptica y electrónica, microtomografías computarizadas (v. g. Brönnimann *et al.* 2018; Duffett Carlson *et al.* 2022), espectrometría de energía dispersiva (EDX, por su sigla en inglés) (v. g. Hollund *et al.* 2018) y análisis proteómico (v. g. Procopio *et al.* 2021).

Sin embargo, por razones que aún son difíciles de dilucidar, estos avances no han tenido hasta el presente un impacto significativo en la práctica zooarqueológica a escala global³. América Latina comparte esta tendencia, a pesar de que existen antecedentes relevantes de estudios sobre diagénesis en los niveles más bajos de organización del hueso, algunos de los cuales se remontan a la segunda mitad de la década de 1990 (v. g. Barrientos *et al.* 2018; Forancelli Pacheco *et al.* 2012; Galligani 2020; Galligani *et al.* 2019; Gutiérrez 1998, 2001 y 2007; Gutiérrez *et al.* 2001; Legoupil 2009; Morales *et al.* 2018; Morales *et al.* 2021; Rodríguez 2023; Rodríguez *et al.* 2024; Rodríguez Suárez 1995 y 2010; Urquiza 2016; Yrarrázaval *et al.* 2023).

Ante la situación descrita anteriormente, consideramos importante y apropiado presentar una síntesis del estado actual de los estudios sobre diagénesis ósea en ambientes terrestres que discuta, particularmente, aquellos aspectos que

.....

3 La falta de una conciencia clara sobre el problema de la diagénesis en los niveles más bajos de la organización del hueso por parte de la mayoría de los/as zooarqueólogos/as ya fue señalada, hace casi treinta años, por O'Connor (1996). Lamentablemente, esta situación no ha cambiado de manera sustancial en las décadas siguientes, como permite comprobarlo una rápida revisión de la literatura especializada.

son más críticos para la mejora de las interpretaciones zooarqueológicas. Para ello, se explicarán los fundamentos de la diagénesis ósea y se describirán las vías que conducen a modos diagenéticos bien diferenciados, así como las alteraciones que se producen en las fracciones orgánica (principalmente colágeno) e inorgánica (bioapatita) del hueso. En cada caso se detallarán los parámetros que los describen y también las técnicas que se implementan para abordar su estudio. Por último, sobre la base de nuestra experiencia con muestras óseas de ungulados procedentes de la región pampeana argentina, se formulará una serie de recomendaciones orientadas a promover e incentivar la práctica de la investigación diagenética en contextos de acceso limitado a recursos, como son los de la mayor parte de los países de América Latina y de otras regiones semiperiféricas y periféricas del mundo.

Fundamentos de diagénesis en los niveles de organización más bajos del hueso

El hueso es un material compuesto, heterogéneo y poroso, que consta, en orden decreciente, de a) una fracción mineral, la hidroxiapatita o bioapatita (fosfato de calcio) —un biocristal análogo a la “hidroxiapatita” de origen geológico (presente en rocas sedimentarias y metamórficas)—, formada por átomos de calcio, fósforo e hidrógeno de acuerdo con la fórmula $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ (García-Garduño y Reyes-Gasga 2006); y b) una fracción orgánica que en peso tiene un ~90 % de colágeno tipo I, un ~5 % de proteínas no colágenas (PNC) y un ~2 % de lípidos y agua (Boskey 2013). En términos estructurales, se distingue entre la estructura macroscópica (macroestructura) y la estructura microscópica, que se resuelve en diferentes niveles escalares: micro, submicro, nano y subnano (Rho *et al.* 1998). En cada nivel es posible reconocer diferentes rasgos estructurales característicos, tal como se describe en la figura 1.

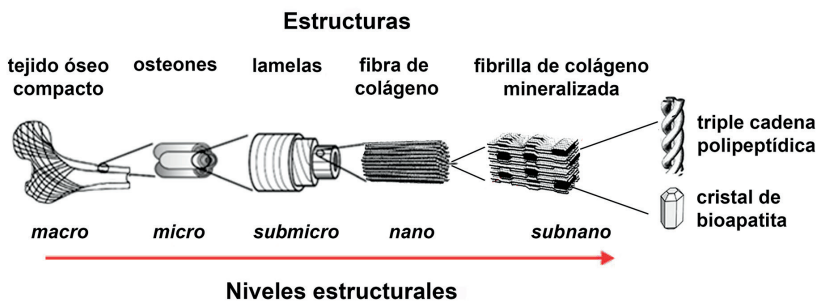


Figura 1. Niveles estructurales del hueso y estructuras características observables en cada nivel

Fuente: elaborado por los autores a partir de Morales (2022).

El hueso esponjoso o trabecular posee una porosidad que varía entre el 50 % y el 90 % de su volumen, mientras que, en el hueso compacto o cortical, esta es menor al 10 % (Zhang *et al.* 2018). Una mayor porosidad cortical puede ser consecuencia de un mayor número de canales, un mayor tamaño del canal o de ambas cosas a la vez (Cai *et al.* 2019). Cowin (1999) clasifica la porosidad del hueso en cuatro categorías, de mayor a menor: a) porosidad intertrabecular (PIT), b) porosidad vascular (PV), c) porosidad lagunar-canalicular (PLC) y d) porosidad colágeno-apatita (PCA). La PIT comprende los espacios entre trabéculas (radio > 1 mm); la PV es el conjunto de los canales de Havers y Volkmann (radio ~ 20 μm); la PLC está compuesta por lagunas osteocíticas y canalículos (radio $\sim 0,1$ μm), y la PCA, finalmente, está constituida por espacios vacíos situados entre las fibras de colágeno y los cristales de apatita (radio $< 0,01$ μm) (Cardoso *et al.* 2016).

Los “huesos” de sitios arqueológicos son el resultado de una serie de transformaciones que cambian su apariencia y sus propiedades. Por ello, en un sentido técnico basado en sus características físicas y químicas, el material recuperado en contextos arqueológicos no es propiamente hueso. Es un objeto compuesto que se encuentra en algún lugar del espectro desde el hueso conservado en el permafrost, muy similar al hueso “fresco”, hasta un compuesto mineralizado y profundamente modificado, o uno ausente debido a la pérdida de su integridad como objeto macroscópico y microscópico reconocible (Smith 2002). Para facilitar tanto el discurso como la lectura, a lo largo de este trabajo nos referiremos al *hueso arqueológico* simplemente como *hueso*, evitando las comillas, pero siempre teniendo en cuenta la atinada advertencia de Smith (2002) antes referida.

Diagénesis de la fracción orgánica del hueso

De todos los componentes de la fracción orgánica del hueso arriba mencionados, el colágeno es el mejor conocido en cuanto a sus patrones de alteración diagenética. Las PNC, por el contrario, han sido menos estudiadas desde una perspectiva diagenética, principalmente debido a su escasez, lo que hace poco práctico su uso como blanco de análisis químicos de importancia arqueológica (Smith 2002); por este motivo no serán abordadas en este trabajo —para un tratamiento actualizado de este tema, remitimos al lector a Procopio *et al.* (2021) y a Wadsworth *et al.* (2017)—.

Colágeno

A medida que el hueso se degrada, la cantidad de colágeno se reduce (Hedges y Law 1989), pero el propio colágeno también se degrada, de modo que ya no se encuentra bien definido desde un punto de vista químico (Hedges *et al.* 1995). El colágeno se puede degradar a través de dos mecanismos principales: a) hidrólisis enzimática a partir de las colagenasas y proteasas bacterianas, y b) hidrólisis química de los enlaces peptídicos (Child 1995a). Los principales factores que controlan la tasa de hidrólisis del colágeno son la temperatura de la reacción, la disponibilidad de agua y el pH de la solución (Smith 2002).

La degradación por hidrólisis del colágeno normalmente es lenta (Dobberstein *et al.* 2009). Esto es particularmente cierto en el colágeno mineralizado, ya que el mineral mantiene unidos los componentes de la matriz (complejo colágeno-apatita), dándole estabilidad y previniendo la expansión de la triple hélice del colágeno, que es un requisito previo para el colapso de las fibrillas (Buckley *et al.* 2008). Sin embargo, la tasa de degradación puede aumentar mediante incrementos de temperatura o mediante catálisis ácida o alcalina (Rudakova y Zaikov 1987). La velocidad de hidrólisis del colágeno también puede ser catalizada por actividad enzimática. Se estima que la hidrólisis producida por este mecanismo, a temperatura ambiente, es mucho más rápida que la hidrólisis química de los enlaces peptídicos (Smith 2002). Se ha propuesto que, mientras la asociación colágeno-apatita esté intacta, las colagenasas y proteasas específicas con actividad colagenasa producidas por microorganismos no pueden funcionar adecuadamente, es decir, solo lo harían una vez que el hueso esté parcialmente desmineralizado (Child 1995a y 1995b). Debido al gran tamaño de las bacterias y de las colagenasas en relación con la porosidad existente entre el colágeno y la apatita, primero debería eliminarse el mineral para exponer la triple hélice del colágeno (Hedges 2002; Nielsen-Marsh *et al.* 2000), tal cual ocurre durante la reabsorción ósea (Kendall *et al.* 2018).

El resultado de la hidrólisis, tanto enzimática como química, es la transformación de la estructura rígida e insoluble del colágeno en una gelatina amorfa soluble en agua que posteriormente se lixivia del hueso (Pfretzschner 2006; Smith *et al.* 2002). Esto provoca una reducción del contenido de colágeno, un aumento de la porosidad (Nielsen-Marsh y Hedges 1999) y una pérdida de resistencia mecánica del hueso (Turner-Walker y Parry 1995). Las condiciones del suelo, como la acidez o alcalinidad extrema, pueden exacerbar los efectos de la hidrólisis, lo que

provoca que el colágeno se pierda mucho más rápida y eficazmente (Collins *et al.* 1995; Smith *et al.* 2002).

Pfretzschner (2006) sostiene que la cantidad de proteína eliminada por la actividad microbiana durante la fase inicial de la diagénesis ósea (véanse Jans *et al.* 2004; Kendall *et al.* 2018, y Turner-Walker 2012) es sorprendentemente baja en los huesos largos grandes, ya que equivale al 5%-10% del contenido total de colágeno de un hueso fresco. Esto significaría que la mayor parte del colágeno óseo se elimina mediante degradación química y lixiviación (Pfretzschner 2006). La destrucción química del colágeno, por otra parte, está influenciada por aumentos repentinos de la temperatura media (Von Endt y Ortner 1984), como se infiere en el caso de los huesos de la localidad italiana de Apigliano, emblemáticos de la vía diagenética denominada *hidrólisis acelerada del colágeno* (Smith *et al.* 2002)⁴. Lo mismo ocurre en huesos sometidos a procesos de cocción, en los que las altas temperaturas producen una pérdida importante de colágeno (Roberts *et al.* 2002; Solari *et al.* 2013)⁵. Otro factor es el daño a la estructura ósea a nivel macroscópico. En este sentido, se ha demostrado que las áreas alrededor de las superficies óseas agrietadas, ya sea por el mascado o roído o por meteorización subaérea, pierden colágeno mucho más rápidamente que las regiones no agrietadas (Boaks *et al.* 2014; Trueman *et al.* 2004).

Los parámetros diseñados para medir la diagénesis del colágeno óseo en muestras arqueológicas evalúan la cantidad remanente en el hueso y su calidad. En cuanto a la cantidad, se mide en términos porcentuales respecto al contenido original (en peso). Una muestra se considera aceptable para datación por radiocarbono o análisis isotópico siempre que tenga una cantidad de colágeno mayor que ~2%-5% de la cantidad original (Ambrose 1990; Hedges y Van Klinken 1992). Sin embargo, la mayoría de los laboratorios de análisis isotópicos establecen un límite de rechazo inferior al 1% (Vitale *et al.* 2019). En cuanto a la calidad del colágeno, el parámetro más utilizado (aunque no el único, ya que también se utilizan el %C y el %N) es la relación atómica C/N ($C/N_{\text{atómica}}$), que es útil como indicador de contaminación y/o degradación de la proteína.

DeNiro (1985) encontró que, en hueso fresco, la $C/N_{\text{atómica}}$ variaba entre 2,9 y 3,6. A partir de entonces, se adoptó este rango como el adecuado para considerar una muestra de colágeno como aceptable para datación radiocarbónica y, sobre todo, estudios paleodietarios. Sin embargo, Van Klinken (1999) considera

4 Al respecto, véase la sección “Vías diagenéticas” más abajo, en este mismo artículo.

5 Sobre cambios inducidos por las temperaturas de cocción, véase Gourrier *et al.* (2017).

que este rango es demasiado amplio y propone —también sobre bases empíricas, pero con un número mucho mayor de casos— uno más restringido, situado entre 3,1 y 3,5. Más recientemente, Guiry y Szpak (2021) plantearon, basándose en modelos de simulación, un límite superior de aceptabilidad variable, dependiendo del taxón y del valor de $\delta^{13}\text{C}$ medido en la muestra de colágeno. Finalmente, un estudio teórico de Schwarcz y Nahal (2021) sostiene que 3,243 sería el valor de la $\text{C}/\text{N}_{\text{atómica}}$ genéticamente determinada (calculada a partir de la suma de la $\text{C}/\text{N}_{\text{atómica}}$ de cada uno de los aminoácidos que componen cada una de las tres cadenas polipeptídicas que forman la triple hélice del colágeno). Valores por debajo del límite inferior establecido por DeNiro (1985) se deberían a una pérdida selectiva de aminoácidos distintos de la glicina (que ocupa una posición más interna dentro de la estructura tridimensional de la proteína y, por tanto, está menos expuesta a los factores del suelo), mientras que valores por encima del límite superior indicado por DeNiro (1985) se deberían a contaminación con sustancias húmicas, que generalmente tienen un bajo contenido de N (Schwarcz y Nahal 2021) (figura 2).

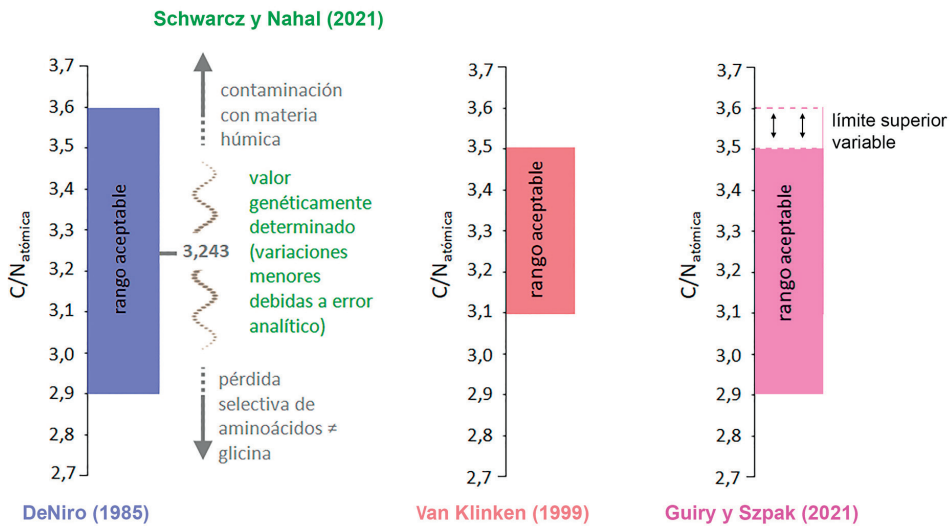


Figura 2. Criterios e interpretaciones de la relación atómica C/N ($\text{C}/\text{N}_{\text{atómica}}$)

Fuente: elaboración propia.

Las alternativas a los análisis de abundancia elemental para evaluar la calidad del colágeno en huesos arqueológicos y paleontológicos se basan en el uso de técnicas de espectroscopia vibratoria. Estas consisten en el análisis de propiedades

moleculares a partir de la captura de vibraciones a nivel molecular. La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por su sigla en inglés) y la espectroscopia Raman son los dos tipos de espectroscopia vibratoria adecuados para caracterizar la composición del tejido óseo. Ambas técnicas miden, para generar espectros, cambios en las energías vibratorias de los enlaces intramoleculares excitados por la luz incidente. Son técnicas complementarias, en el sentido de que excitan diferentes vibraciones de una misma molécula (Taylor y Donnelly 2020). Se ha planteado su uso como herramientas mínimamente invasivas, rápidas y eficientes para hacer un filtrado o selección a relativamente bajo costo de las muestras, antes de la realización de procedimientos de extracción de colágeno (Hollund 2013; Vitale *et al.* 2019).

Diagénesis de la fracción mineral del hueso

Los cristales de bioapatita son termodinámicamente inestables y se mantienen mediante el proceso homeostático del cuerpo; una vez que este cesa, los cristales pueden cambiar. Su pequeño tamaño (16-50 nm × 8-20 nm × 2 nm [Glimcher 2006]) implica que tienen una superficie muy grande en relación con su volumen, propiedad que los hace muy reactivos, lo que determina el tipo de modificaciones diagenéticas que pueden experimentar en entornos de depositación o enterramiento (Kendall *et al.* 2018; Smith 2002).

En el individuo vivo, el tamaño, la forma y la composición de los cristales de bioapatita se ven afectados por varios factores intrínsecos y extrínsecos, incluidas las propiedades del colágeno y la distribución de PNC (*v. g.*, la osteocalcina) —que intervienen en el nucleamiento y en el crecimiento de los cristales—, la dieta, las enfermedades, la viabilidad celular y el recambio óseo (Boskey 2007). En los huesos arqueológicos, los cambios más significativos en el mineral son tres: a) disolución preferencial de las fases más inestables, b) aumento de la cristalinidad a través de la recristalización de las fases inestables y/o el crecimiento de nuevas fases autigénicas (modificadas químicamente), y c) absorción de iones exógenos (cationes metálicos) (Smith 2002; Trueman 2013). Estos cambios se producen como consecuencia de su interacción con factores ambientales, principalmente el agua. Los efectos del agua sobre el hueso dependen de su química (pH, iones disueltos) y del régimen hidrológico que prevalece en el sitio (Hedges y Millard 1995). De hecho, los cambios minerales requieren una hidrología activa (recarga con aguas meteóricas) o una reducción del pH (Hedges 2002; Hedges y Millard 1995; Nielsen-Marsh *et al.* 2000). La hidroxiapatita tiende a ser más estable bajo

valores de pH de ~7,5-8; en ambientes ligeramente alcalinos o casi neutros, tiene baja solubilidad, y se disuelve o se recristaliza en entornos con un pH inferior a 6 o superior a 9 (Berna *et al.* 2004; Keenan y Engel 2017).

La recristalización ósea aumenta la cristalinidad, es decir, el tamaño del cristal y la perfección de la red cristalina, y promueve la formación de una fase mineral más estable y autigénica, caracterizada por un menor contenido de carbonato, ya que los cristales iniciales —más desordenados— son menos estables energéticamente (Nielsen-Marsh y Hedges 2000; Stathopoulou *et al.* 2008; Trueman 2013). Un factor que altera la cristalinidad, además de producir la disolución y recristalización de los minerales, es la bioerosión microbiana, principalmente bacteriana (Turner-Walker *et al.* 2002). Para acceder al colágeno, las bacterias primero deben alterar el mineral óseo (Nielsen-Marsh *et al.* 2000), por lo que su actividad puede conducir a la disolución del mineral, seguida de una redistribución del fosfato, necesaria para el crecimiento de nuevos cristales (Trueman *et al.* 2004). La pérdida de proteínas debido a los procesos mencionados en el apartado anterior también puede influir en la cristalinidad (Nielsen-Marsh y Hedges 2000; Smith *et al.* 2007), ya que la pérdida de matriz orgánica en los tejidos mineralizados puede exponer algunas fracciones minerales poco cristalinas al agua que fluye por el hueso. Esto permite la lixiviación y reprecipitación sobre los cristales preexistentes y dentro de los poros. Esta interacción del agua subterránea con la capa hidratada de cristales de bioapatita permite la incorporación de diversos iones lábiles y reactivos —*v. g.*, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} — (Stathopoulou *et al.* 2008; White y Hannus 1983).

Los cambios en la cristalinidad se han analizado, en muestras de hueso en polvo, mediante el estudio del patrón de difracción de rayos X (DRX), ya sea a través de difractogramas (*v. g.* Urquiza 2016) o del cálculo de un índice de cristalinidad (IC) (*v. g.* Hedges *et al.* 1995). Asimismo, se ha utilizado espectroscopia Raman (*v. g.* Colonese *et al.* 2014). Sin embargo, la técnica más empleada es el cálculo del factor de desdoblamiento infrarrojo (IRSF, por su sigla en inglés), una medida indirecta del largo medio de los cristales. Este factor se deriva de espectros FTIR (Weiner y Bar-Yosef 1990). La ventaja de esta técnica es que permite la identificación de otras fases minerales, como la calcita diagenética, y también la evaluación semicuantitativa de la relación carbonato/fosfato (Smith 2002); además, es rápida y se puede implementar en el terreno utilizando pequeños tamaños de muestra (Trueman *et al.* 2008). Aunque en general los espectros FTIR proporcionan una buena indicación del contenido orgánico y de la recristalización de la apatita del hueso, existen evidencias de que no son indicadores confiables del grado de conservación

de elementos traza biogénicos o de las relaciones de isótopos estables originales, sobre todo en huesos muy antiguos (Trueman *et al.* 2008).

Porosidad ósea y diagénesis

Después de la muerte de un organismo, la porosidad del hueso puede aumentar o disminuir. Si disminuye, la probabilidad de supervivencia del hueso se incrementa con la permineralización (*i. e.* precipitación de minerales —sulfatos, sulfuros, silicatos, óxidos de hierro, fosfatos y carbonatos— en los poros y oquedades del hueso [Fernández López 2000]), que conduce gradualmente a la fosilización y conservación del espécimen en un depósito arqueológico. Si, por el contrario, la porosidad aumenta, las perspectivas de supervivencia del espécimen disminuyen sensiblemente a medida que el agua fluye cada vez más libremente a través del hueso, de modo que puede hacerlo desaparecer por completo (Kendall *et al.* 2019; Smith 2002; Smith *et al.* 2007). La modulación de la tasa de destrucción del hueso a través del aumento de la porosidad depende de factores ambientales, tanto físicos (*v. g.*, nivel de aireación del suelo, temperatura, pH, hidrología local) como biológicos (*v. g.*, actividad microbiana).

Diversos estudios comparativos efectuados sobre huesos arqueológicos y modernos han demostrado que las variaciones en el tamaño de los poros pueden asociarse con procesos diagenéticos específicos⁶. De este modo, se han definido tres tipos de porosidad: a) porosidad grande o macroporosidad (> 8,5 μm), vinculada con una pérdida considerable de mineral óseo; b) porosidad media o mesoporosidad (entre 0,1 μm y 8,5 μm), relacionada con el ataque microbiano, y c) porosidad pequeña o microporosidad (< 0,1 μm), atribuida a la degradación química de las fibrillas de colágeno a través de mecanismos como la hidrólisis acelerada del colágeno inducida, ya sea por el calor ambiental (Smith *et al.* 2007; Turner-Walker *et al.* 2002) o por el hervido de los huesos previo a su depositación (Roberts *et al.* 2002) (figura 3). Por este motivo, la distribución por tamaño de la porosidad, medida mediante la técnica denominada porosimetría por intrusión de mercurio, se considera el mejor indicador del estado general de preservación del hueso (Nielsen-Marsh 1997; Nielsen-Marsh *et al.* 2000) y, por ello, un adecuado predictor de su capacidad de supervivencia en su respectivo ambiente de enterramiento. Antes de que esta técnica fuera utilizada, la distribución por tamaño de la porosidad se medía mediante porosimetría por adsorción de vapor

6 Véase al respecto la sección “Vías diagenéticas”, más abajo en este mismo artículo.

de agua, una metodología similar a la que se emplea para medir la porosidad en suelos (Marshall y Holmes 1988)⁷. Esta técnica no permite evaluar la porosidad mediana o mesoporosidad (Nielsen-Marsh y Hedges 1999), por lo que ha sido prácticamente abandonada en estudios sobre diagénesis ósea, aunque existen ejemplos de aplicación reciente (v. g. Rodríguez *et al.* 2024).

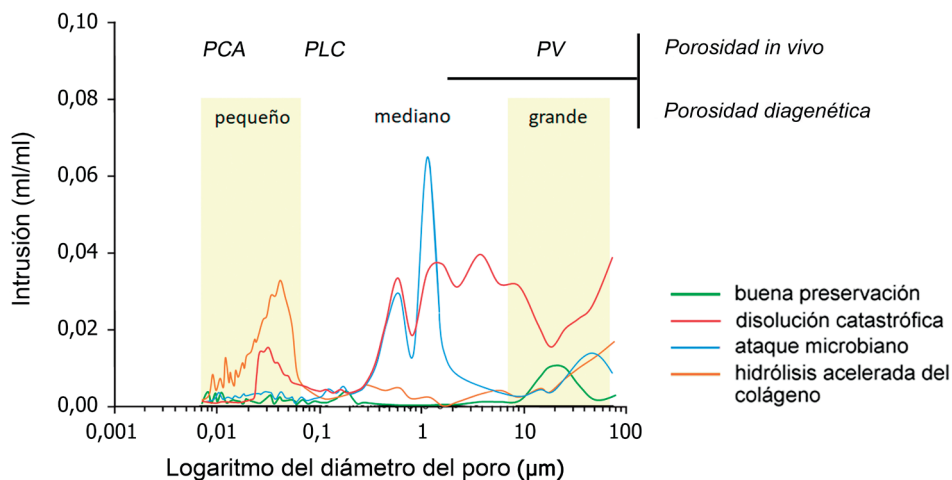


Figura 3. Distribución por tamaño de la porosidad ósea en relación con cada una de las cuatro vías diagenéticas identificadas por Smith *et al.* (2007)*

Fuente: modificado por los autores a partir de Galligani (2020).

* Como referencia, se indica la distribución de la porosidad en un hueso *in vivo*: PV, PLC y PCA (Cardoso *et al.* 2016).

Vías diagenéticas

Estudios realizados en Europa indican que la cantidad de vías diagenéticas es notoriamente reducida, no específica de ningún sitio en particular, y solo cuatro de ellas pueden identificarse claramente: a) buena conservación: huesos tipo 1; b) hidrólisis acelerada del colágeno: huesos tipo 2; c) ataque microbiano: huesos tipo 3, y d) disolución catastrófica: huesos tipo 4 (Hedges *et al.* 1995, 208; Smith *et al.* 2007, 1489) (figura 4).

7 Para ejemplos de aplicación, véanse Gutiérrez (1998), Hedges *et al.* (1995) y Pike (1993).

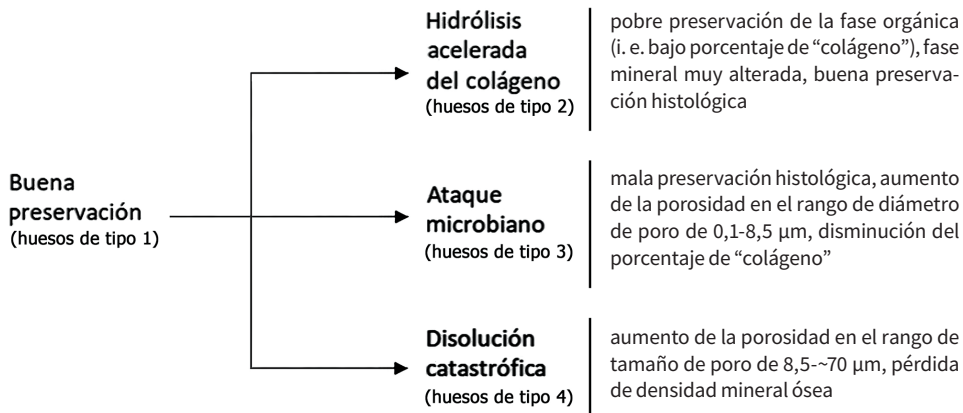


Figura 4. Vías diagenéticas y tipos de hueso resultantes definidos por Smith *et al.* (2007)

Fuente: esquema elaborado por los autores.

Con la excepción de la hidrólisis acelerada del colágeno, que se debe a circunstancias muy particulares —i. e. eventos de alta temperatura, suelos alcalinos y ciclos extremos de humectación y secado de los huesos— (Smith *et al.* 2002), la disolución catastrófica y el ataque microbiano son fenómenos relativamente frecuentes que, de manera eventual, pueden vincularse entre sí (Smith *et al.* 2007). El principal aspecto en común entre estas dos formas de diagénesis es el aumento de la mesoporosidad (Turner-Walker *et al.* 2002). En el caso de los huesos atacados por microorganismos en ambientes terrestres —particularmente bacterias (Turner-Waker 2012 y 2019; Turner-Walker *et al.* 2023)⁸—, este aumento de la porosidad intermedia permite una mayor interacción con el agua del suelo —principalmente bajo regímenes hidrológicos de recarga y flujo (*sensu* Hedges y Millard 1995)— y, por tanto, una aceleración de la disolución mineral. A su vez, la disolución aumenta la porosidad del hueso y, cuanto mayor es esta, mayor es la velocidad de disolución, lo que lleva a una pérdida catastrófica del mineral (Pike *et al.* 2001).

La química del suelo, por su parte, afectaría de manera significativa solo a la pérdida mineral o disolución mineral catastrófica (Nielsen-Marsh *et al.* 2007), mientras que su textura y permeabilidad afectarían los niveles de actividad de la

8 Si bien tradicionalmente se ha creído que la bioerosión ósea se debe a la acción de hongos y bacterias (Hackett 1981; Jans *et al.* 2004; Marchiafava *et al.* 1974), un examen exhaustivo y crítico de la literatura relevante muestra que no hay evidencia concluyente de que los hongos realmente tengan el potencial de destruir la microestructura ósea mediante el uso de sus materiales como fuente de nutrientes (Kendall *et al.* 2018; Turner-Walker 2012).

microflora bacteriana aeróbica, que es mayor en suelos bien drenados y aireados y menor, o inexistente, en condiciones de encharcamiento permanente o semi-permanente —con alta probabilidad, las bacterias capaces de producir bioerosión en el hueso, bajo condiciones naturales, son solo aeróbicas (Kendall *et al.* 2018; Schotsmans *et al.* 2024; Turner-Walker 2012 y 2019; Turner-Walker *et al.* 2023)—. Las interacciones entre los diferentes factores mencionados, así como los tipos de hueso resultantes, se pueden visualizar en la figura 5.

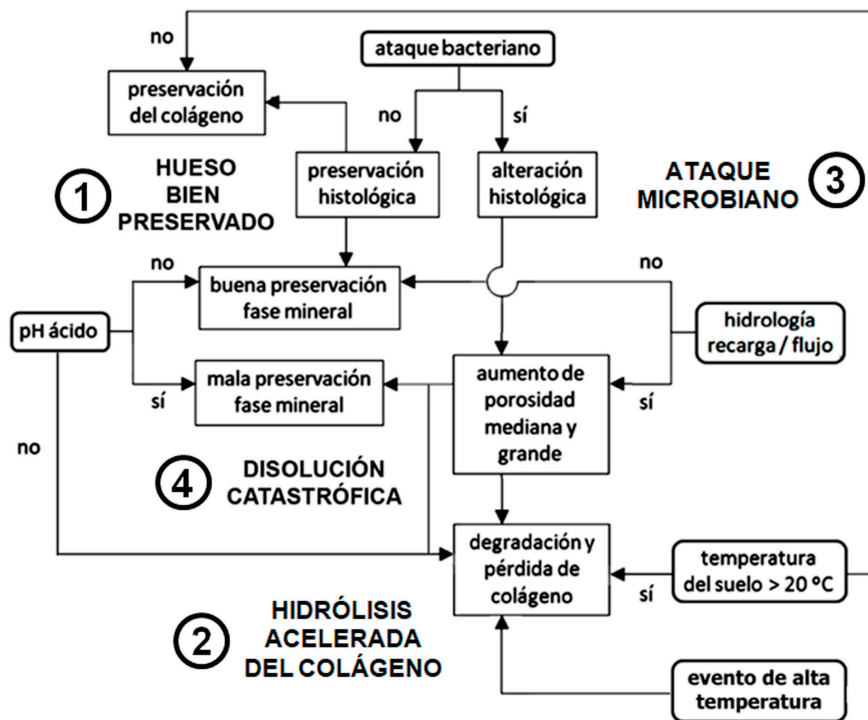


Figura 5. Factores y efectos diagenéticos conducentes a los cuatro tipos de huesos definidos por Smith *et al.* (2007)

Fuente: elaborado por los autores a partir de Galligani (2020) y Morales (2022).

La evaluación diagenética en la práctica zooarqueológica: estrategia de abordaje

Lo presentado en los apartados anteriores muestra la gran complejidad del problema de la diagénesis que opera en los niveles más bajos de organización del hueso, así como la multiplicidad de las vías analíticas actualmente disponibles

para su estudio. Ante esto y dada la importancia del conocimiento acerca del tipo y grado de alteración diagenética de cada conjunto arqueofaunístico para diferentes aspectos de la inferencia zooarqueológica (v. g. causas de la representación diferencial de partes esqueléticas, retención de la señal isotópica biogénica, confiabilidad de las dataciones radiocarbónicas, grado de conservación del ADN), resulta relevante preguntarse cuál es el indicador más apropiado y asequible a la mayoría de los equipos de investigación.

Como ya lo mencionamos, la distribución por tamaño de la porosidad, medida por intrusión de mercurio, es quizás el mejor indicador del estado general de conservación del hueso (Hedges 2002; Kendall *et al.* 2018; Nielsen-Marsh 1997; Nielsen-Marsh *et al.* 2000). Sin embargo, la aplicación de esta técnica difícilmente está al alcance de la mayoría de los/as zooarqueólogos/as, tanto por los costos que implica como por la disponibilidad de las facilidades requeridas. Una alternativa viable es centrarse, al menos en una primera instancia, en un único parámetro diagenético cuya implementación sea relativamente sencilla y, a la vez, altamente informativa. Sobre la base de nuestra experiencia en el estudio de la diagénesis ósea en muestras de ungulados (camélidos y cérvidos) de la región pampeana argentina (Galligani *et al.* 2025) y de la correlación entre parámetros diagenéticos documentada en la literatura (v. g. Hedges 2002; Hedges *et al.* 1995), el indicador que reúne las condiciones antedichas es el índice histológico de Oxford (IHO) (Hedges *et al.* 1995) o su versión modificada (Millard 2001). Este parámetro mide el impacto de la bioerosión microbiana sobre la base de una progresión de estadios (de 5 a 0) de daño microestructural. El IHO describe, en términos porcentuales, la cantidad de hueso bien conservado que no se encuentra afectado por la bioerosión (Millard 2001). Su uso puede ser complementado con el registro de otras alteraciones diagenéticas microestructurales que también pueden dañar la microestructura ósea —v. g. fisuración, tinción, grado de integridad de los bordes de los canales de Havers, presencia de porosidad esponjiforme submicrónica con borde hipermineralizado, etc. (Hollund *et al.* 2012; Jans 2005; Morales *et al.* 2018; Pfretzschner y Tütken 2011; Turner-Walker *et al.* 2002)— (figura 6). Hollund *et al.* (2012) integran algunas de estas variables en un único índice, el índice histológico general (IHG).

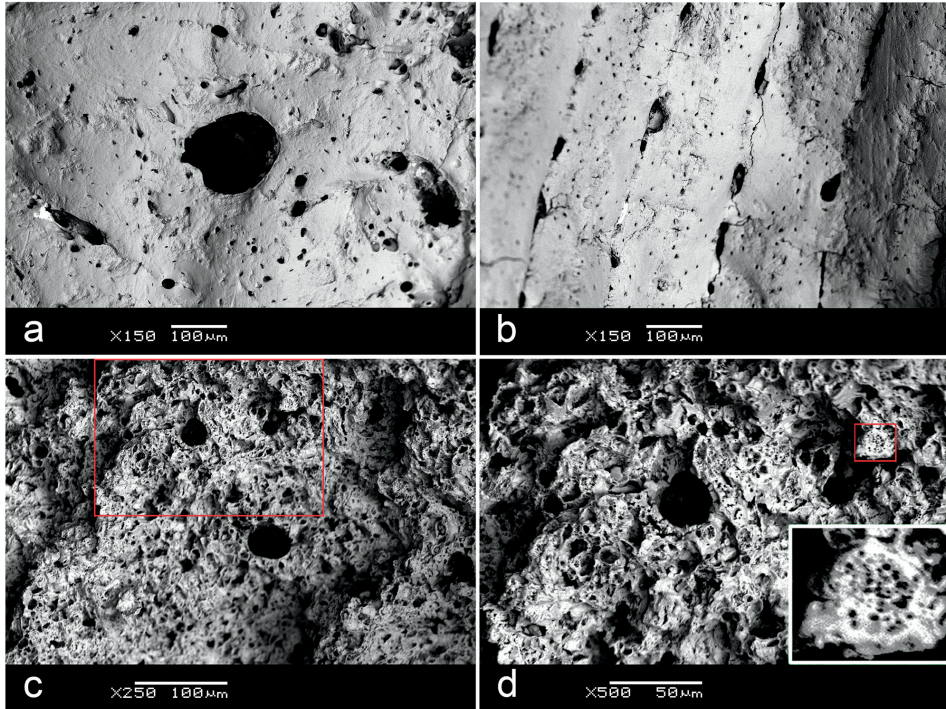


Figura 6. Preservación histológica en huesos de guanaco (*Lama guanicoe*) de la región pampeana argentina*

Fuente: elaboración propia.

* Evaluada mediante imágenes obtenidas con MEB: a) buena preservación en hueso haversiano denso (IHO=5); b) buena preservación en hueso plexiforme (IHO=5); c) mala preservación en hueso haversiano denso (IHO=0), y d) detalle de la imagen anterior (rectángulo rojo), en la que se aprecia un canal de Havers rodeado de zonas con porosidad esponjiforme submicrónica enmarcadas por un anillo hipermineralizado (una de ellas ampliada en el ángulo inferior derecho), un rasgo diagnóstico de ataque bacteriano (Turner-Walker 2012 y 2019).

La bioerosión bacteriana es la causa de deterioro óseo más rápida y destructiva en ambientes terrestres (Turner-Walker *et al.* 2023). Se ha demostrado que ella a) provoca la pérdida de colágeno óseo y la alteración de la cristalinidad mineral (Child 1995a y 1995b; Collins *et al.* 2002; Dobberstein *et al.* 2009; Hedges 2002), y b) aumenta la porosidad ósea, lo que conduce a i) una tasa acelerada de descomposición del tejido (Hedges 2002; Hedges y Millard 1995; Hedges *et al.* 1995; Nielsen-Marsh y Hedges 2000), ii) un incremento en la vulnerabilidad del hueso a otros procesos diagenéticos (Jans *et al.* 2004; Smith *et al.* 2007), iii) una reducción de la resistencia ósea (Turner-Walker y Parry 1995), y iv) un aumento en la susceptibilidad

del hueso a contaminarse con materiales extraños (v. g. ácidos húmicos, ADN exógeno) que pueden causar problemas en la extracción de colágeno y ADN (Alaeddini *et al.* 2010; Colson *et al.* 1997; Gilbert *et al.* 2005; Van Klinken y Hedges 1995).

Teniendo en cuenta la importancia de una adecuada y rápida evaluación de la bioerosión bacteriana, Barrientos *et al.* (2016) y Morales *et al.* (2018) han elaborado un protocolo de extracción, preparación y análisis —con microscopía electrónica de barrido o MEB— de muestras óseas de bajo costo y alta efectividad (figura 6), especialmente diseñado para ser implementado por cualquier equipo de investigación arqueológica con una mínima inversión de tiempo, dinero e infraestructura. Aplicaciones de este protocolo pueden consultarse en Galligani *et al.* (2019), Morales *et al.* (2017) y Morales *et al.* (2021).

En la medida en que la bioerosión bacteriana aumenta la mesoporosidad del hueso (Jans *et al.* 2004; Smith *et al.* 2007) e incrementa la cristalinidad de la fase mineral a través de la disolución y recristalización de minerales (Turner-Walker *et al.* 2002), el IHO tiende a correlacionarse con otros indicadores diagenéticos, como el IRSF o la distribución por tamaño de la porosidad (Hedges 2002; Hedges *et al.* 1995), por lo que la información aportada por ellos resulta, en cierta medida, redundante. La figura 7 ejemplifica esta asociación entre parámetros. En el panel superior se observa la distribución por tamaño de la porosidad de dos muestras óseas de guanaco (*Lama guanicoe*) de la región pampeana argentina (Galligani *et al.* 2025). La muestra 1, que presenta una severa bioerosión (IHO=1), exhibe un marcado pico de la variable volumétrica $dV/d\log(D)$ en la zona de mesoporosidad típica del ataque microbiano (bacteriano) (Smith *et al.* 2007), que no se observa en la muestra 2, sin signos histológicos de dicho ataque (IHO=5). En el panel inferior se muestran los difractogramas (DRX) de otras dos muestras de guanaco. Se observa que la muestra 3, con una muy severa bioerosión (IHO=0), carece de los picos de intensidad difractada característicos de las muestras no alteradas diagenéticamente, *i. e.* no presenta señal de difracción, probablemente por ser muy amorfa, mientras que la muestra 4, con escasa bioerosión (IHO=4), difracta razonablemente bien la región $2\theta=26$, lo que indica una cristalinidad conservada. Estos resultados apoyan la idea de que la bioerosión, medida por el IHO, constituye un indicador poderoso y, a la vez, muy asequible del estado general de alteración diagenética del hueso. Esto lo convierte en una excelente opción que debería ser explorada por los/as zooarqueólogos/as interesados/as en conocer, con mayor profundidad, el estado de preservación de sus muestras, información importante para la toma de decisiones acerca de diferentes aspectos de la investigación y de la conservación patrimonial.

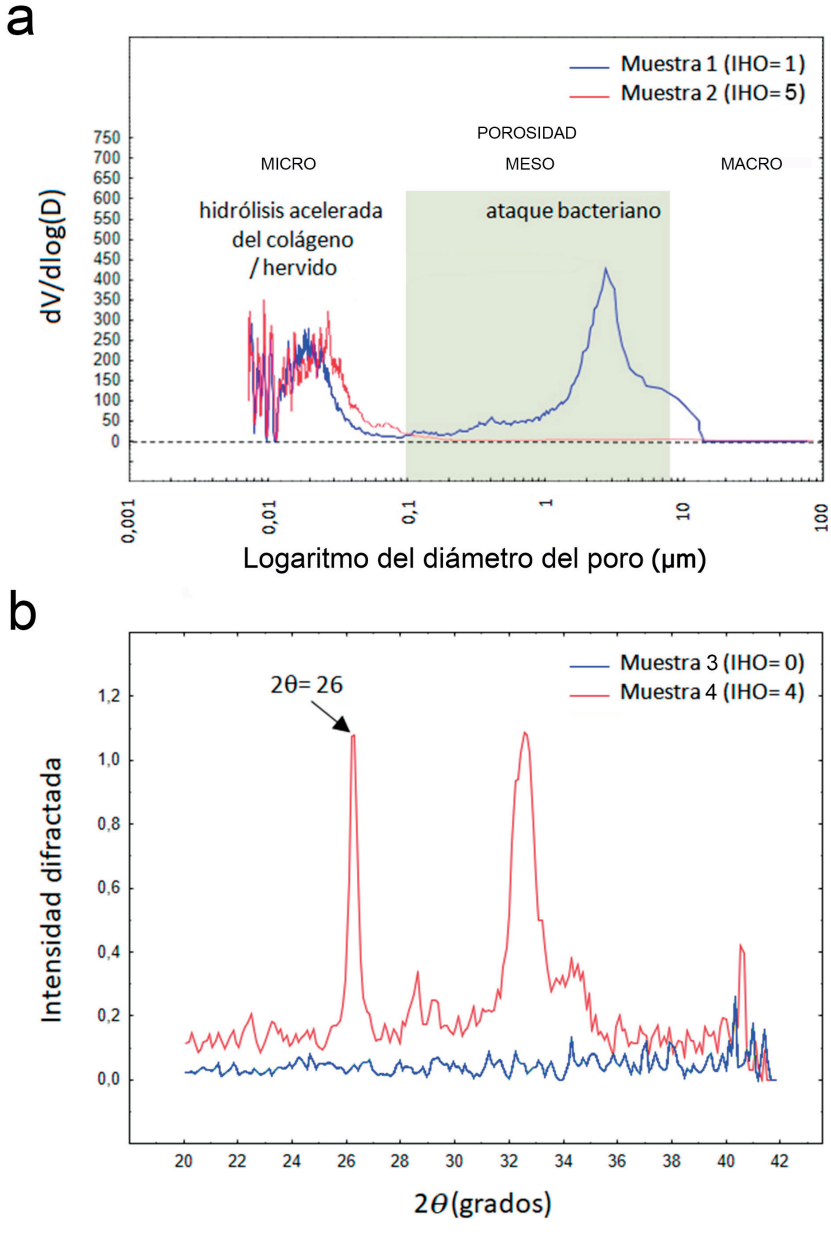


Figura 7. Parámetros diagenéticos correlacionados con el índice histológico de Oxford (IHO)*

Fuente: elaboración propia.

* Ejemplos de muestras procedentes de la región pampeana argentina (Galligani *et al.* 2025): a) distribución por tamaño de la porosidad medida por intrusión de mercurio y b) cristalinidad evaluada por el patrón de difracción de rayos X (DRX). En cada caso, se indica el valor del IHO de las muestras analizadas.

Consideraciones finales

La apretada síntesis de problemas y de aproximaciones metodológicas aplicadas a la evaluación de la diagénesis en los niveles más bajos de organización ósea presentada en este trabajo, aunque comprehensiva, dista de ser exhaustiva. Sin embargo, basta para exponer la complejidad de la cuestión y su importancia para un desarrollo más equilibrado de los estudios tafonómicos y zooarqueológicos. En este sentido, se espera que la presente contribución sirva de estímulo para un mayor número de investigaciones orientadas a generar conocimiento acerca de los procesos diagenéticos incidentes sobre las arqueofaunas de diversas regiones de Latinoamérica y del mundo.

Agradecimientos

La presente investigación se realizó en el marco de los proyectos UNLP-N971, PEICID-2021-068 y PICT-2020-SERIEA-01859, todos ellos desarrollados en el centro-este de la República Argentina.

Referencias

- Alaeddini, Reza, Simon Walsh y Ali Abbas.** 2010. “Forensic Implications of Genetic Analyses from Degraded DNA: A Review”. *Forensic Science International Genetics* 4: 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2009.09.007>
- Ambrose, Stanley.** 1990. “Preparation and Characterization of Bone and Tooth Collagen for Isotopic Analysis”. *Journal of Archaeological Science* 17: 431-451. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(90\)90007-R](https://doi.org/10.1016/0305-4403(90)90007-R)
- Barrientos, Gustavo, Paula Galligani y Natalia Morales.** 2018. “Gut or Soil?: Revisiting the Issue of the Sources of Bacterial Bioerosion in Archaeological Bone”. Ponencia presentada en el Simposio Taphos-Nomos, University of Central Lancashire, Preston, Reino Unido, 2-4 de noviembre.
- Barrientos, Gustavo, Patricia Sarmiento y Paula Galligani.** 2016. “Evaluación de la diagénesis ósea mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB): aproximaciones analíticas aplicables a muestras arqueológicas”. *Revista Argentina de Antropología Biológica* 18 (2): 1-13. <https://doi.org/10.17139/raab.2016.0018.02.03>
- Behrensmeyer, Anna y Susan Kidwell.** 1985. “Taphonomy’s Contributions to Paleobiology”. *Paleobiology* 11 (1): 105-119. <http://www.jstor.org/stable/2400427>

- Bell, Lynne.** 2012. "Histotaphonomy". En *Bone Histology: An Anthropological Perspective*, editado por Christian Crowder y Sam Stout, 241-254. CRC Press.
- Berna, Francesco, Alan Matthews y Stephen Weiner.** 2004. "Solubilities of Bone Mineral from Archaeological Sites: The Recrystallization Window". *Journal of Archaeological Science* 31 (7): 867-882. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.12.003>
- Boaks, Amelia, Donald Siwek y Farzad Mortazavi.** 2014. "The Temporal Degradation of Bone Collagen: A Histochemical Approach". *Forensic Science International* 240: 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.04.008>
- Boskey, Adele.** 2007. "Mineralization of Bones and Teeth". *Elements* 3: 385-391. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.3.6.385>
- Boskey, Adele.** 2013. "Bone Composition: Relationship to Bone Fragility and Antiosteoporotic Drug Effects". *Bonekey Reports* 4 (2): 447. <https://doi.org/10.1038/bonekey.2013.181>
- Brönnimann, David, Cordula Portmann, Sandra Pichler, Thomas Booth, Brigitte Röder et al.** 2018. "Contextualising the Dead: Combining Geoarchaeology and Osteoanthropology in a New Multi-Focus Approach in Bone Histotaphonomy". *Journal of Archaeological Science* 98: 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2018.08.005>
- Buckley, Mike, Angela Walker, Simon Ho, Yue Yang, Colin Smith et al.** 2008. "Comment on 'Protein Sequences from Mastodon and Tyrannosaurus Rex Revealed by Mass Spectrometry'". *Science* 319: 33. <https://doi.org/10.1126/science.1147046>
- Cai, Xiran, Hélène Follet, Laura Peralta, Marc Gardégaront, Delphine Farlay et al.** 2019. "Anisotropic Elastic Properties of Human Femoral Cortical Bone and Relationships with Composition and Microstructure in Elderly". *Acta Biomater* 90: 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.03.043>
- Cardoso, Antonio, Walisson Oliveira y G. J. O. Waz.** 2016. "Cortical Bone Porosity Visualization Using Mercury Porosimetry Intrusion Data". *Revista Matéria* 12 (4): 612-617. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000400010>
- Child, Angela.** 1995a. "Microbial Taphonomy of Archaeological Bone". *Studies in Conservation* 40 (1): 19-30. <https://doi.org/10.2307/1506608>
- Child, Angela.** 1995b. "Towards an Understanding of the Microbial Decomposition of Archaeological Bone in the Burial Environment". *Journal of Archaeological Science* 22: 165-174. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0018>
- Collins, Matthew, Christina Nielsen-Marsh, John Hiller, Colin Smith, Sam Roberts et al.** 2002. "The Survival of Organic Matter in Bone: A Review". *Archaeometry* 44 (3): 383-394. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.t01-1-00071>
- Collins, Matthew, Michael Riley, Angela Child y Gordon Turner-Walker.** 1995. "A Basic Mathematical Simulation of the Chemical Degradation of Ancient Collagen". *Journal of Archaeological Science* 22: 175-183. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0019>

- Colonese, André, Matthew Collins, Alexandre Lucquin, Michael Eustace, Yvette Hancock et al.** 2014. "Long-Term Resilience of Late Holocene Coastal Subsistence System in Southeastern South America". *PLoS ONE* 9 (4): e93854. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093854>
- Colson, Isabelle, Jillian Bailey, Martine Vercauteren, Bryan Sykes y Robert Hedges.** 1997. "The Preservation of Ancient DNA and Bone Diagenesis". *Ancient Biomolecules* 1 (2): 109-117.
- Cowin, Stephen.** 1999. "Bone Poroelasticity". *Journal of Biomechanics* 32 (3): 217-238. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(98\)00161-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(98)00161-4)
- DeNiro, Michael.** 1985. "Postmortem Preservation and Alteration of *in Vivo* Bone Collagen Isotope Ratios in Relation to Palaeodietary Reconstruction". *Nature* 317: 806-809. <https://doi.org/10.1038/317806a0>
- Dobberstein, Richard, Mathew Collins, Oliver Craig, Gillian Taylor, Kirsty Penkman y Stefanie Ritz-Timme.** 2009. "Archaeological Collagen: Why Worry about Collagen Diagenesis?". *Archaeological and Anthropological Sciences* 1: 31-42. <https://doi.org/10.1007/s12520-009-0002-7>
- Duffett Carlson, Kellie, Kirsten Mandl, Ashley McCall, David Brönnimann, Maria Teschler-Nicola et al.** 2022. "3D Visualization of Bioerosion in Archaeological Bone". *Journal of Archaeological Science* 145: 105646. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105646>
- Efremov, Ivan.** 1940. "Taphonomy: New Branch of Paleontology". *Pan-American Geologist* 74: 81-93.
- Fernández López, Sixto.** 2000. *Temas de tafonomía*. Departamento de Paleontología, Universidad Complutense de Madrid.
- Fisher, John.** 1995. "Bone Surface Modifications in Zooarchaeology". *Journal of Archaeological Method and Theory* 2 (1): 7-68. <https://doi.org/10.1007/BF02228434>
- Forancelli Pacheco, Mírian, Ximena Villagran y Gilson Martins.** 2012. "Macroscopic and Microbiological Alterations of Bird and Small Mammal Bones Buried in a Cerrado Biome (South Western Brazil)". *Journal of Archaeological Science* 39: 1394-1400. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.10.024>
- Galligani, Paula.** 2020. *Preservación ósea diferencial en un ambiente subtropical del centro-este de Argentina: tafonomía regional en perspectiva arqueológica*. Bar International Series 3003. Bar.
- Galligani, Paula, Natalia Morales y Gustavo Barrientos.** 2025. "Evaluación de la distribución por tamaño de la porosidad en muestras óseas humanas y faunísticas de la región pampeana: primera aproximación mediante el uso de porosimetría por intrusión de mercurio". Manuscrito no publicado. Archivo de Word.

- Galligani, Paula, Julieta Sartori y Gustavo Barrientos.** 2019. "Bacterial Bioerosion in Human and Animal Bones from Subtropical Environments (Northern Pampa / Middle Paraná River Basin, República Argentina)". *Journal of Archaeological Science: Reports* 25: 561-574. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.05.015>
- Gallo, Giulia, Matthew Fyhrie, Cleantha Paine, Sergey Ushakov, Masami Izuho et al.** 2021. "Characterization of Structural Changes in Modern and Archaeological Burnt-bone: Implications for Differential Preservation Bias". *PLoS ONE* 16 (7): e0254529. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254529>
- García-Garduño, Margarita y José Reyes-Gasga.** 2006. "La hidroxiapatita, su importancia en los tejidos mineralizados y su aplicación biomédica". *Tip: Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 9 (2): 90-95. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43211937005>
- Gifford-González, Diane.** 1981. "Taphonomy and Paleoecology: A Critical Review of Archaeology's Sister Disciplines". *Advances in Archaeological Method and Theory* 4: 365-438. <https://www.jstor.org/stable/20170172>
- Gifford-González, Diane.** 2018. *An Introduction to Zooarchaeology*. Springer International Publishing.
- Gilbert, Thomas, Lars Rudbeck, Eske Willerslev, Anders Hansen, Colin Smith et al.** 2005. "Biochemical and Physical Correlates of DNA Contamination in Archaeological Human Bones and Teeth Excavated at Matera, Italy". *Journal of Archaeological Science* 32: 785-793. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.12.008>
- Glimcher, Melvin.** 2006. "Bone: Nature of the Calcium Phosphate Crystals and Cellular, Structural, and Physical Chemical Mechanisms in Their Formation". *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 64: 223-282. <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.64.8>
- Gourrier, Aurélien, Céline Chadefaux, Estelle Lemaitre, Ludovic Bellot-Gurlet, Michael Reynolds et al.** 2017. "Nanoscale Modifications in the Early Heating Stages of Bone Are Heterogeneous at the Microstructural Scale". *PLoS ONE* 12 (4): e0176179. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176179>
- Guiry, Eric y Paul Szpak.** 2021. "Improved Quality Control Criteria for Stable Carbon and Nitrogen Isotope Measurements of Ancient Bone Collagen". *Journal of Archaeological Science* 132: 105416. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105416>
- Gutiérrez, María.** 1998. "Taphonomic Effects and State of Preservation of the Guanaco (*Lama guanicoe*) Bone Bed from Paso Otero 1 (Buenos Aires Province, Argentina)". Tesis de maestría en Ciencias, Graduate Faculty, Texas Tech University, Lubbock.
- Gutiérrez, María.** 2001. "Bone Diagenesis and Taphonomic History of the Paso Otero 1 Bone Bed, Pampas of Argentina". *Journal of Archaeological Science* 28: 1277-1290. <https://doi.org/10.1006/jasc.2000.0648>

- Gutiérrez, María.** 2007. "Preservación ósea diferencial a través del análisis diagenético: perspectivas, alcances e implicaciones arqueológicas". *Cazadores-Recolectores del Cono Sur: Revista de Arqueología* 2: 35-66.
- Gutiérrez, María, Gustavo Martínez y Christina Nielsen-Marsh.** 2001. "Alteración diagenética y preservación diferencial de los conjuntos óseos de la localidad arqueológica Paso Otero (provincia de Buenos Aires, Argentina)". *Estudios Geológicos* 56: 291-299. <https://doi.org/10.3989/egeol.00565-6145>
- Hackett, Cecil.** 1981. "Microscopical Focal Destruction (Tunnels) in Exhumed Human Bones". *Medicine, Science and the Law* 21: 243-265. <https://doi.org/10.1177/002580248102100403>
- Hedges, Robert.** 2002. "Bone Diagenesis: An Overview of Processes". *Archaeometry* 44: 319-328. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00064>
- Hedges, Robert e Ian Law.** 1989. "The Radiocarbon Dating of Bone". *Applied Geochemistry* 4: 249-253. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(89\)90025-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(89)90025-5)
- Hedges, Robert y Andrew Millard.** 1995. "Bones and Groundwater: Towards the Modelling of Diagenetic Processes". *Journal of Archaeological Science* 22: 155-164. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0017>
- Hedges, Robert, Andrew Millard y Alistair Pike.** 1995. "Measurements and Relationships of Diagenetic Alteration of Bone from Three Archaeological Sites". *Journal of Archaeological Science* 22: 201-209. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0022>
- Hedges, Robert y Gert van Klinken.** 1992. "A Review of Current Approaches in the Pre-treatment of Bone for Radiocarbon Dating by AMS". *Radiocarbon* 34 (3): 279-91. <https://doi.org/10.1017/S0033822200063438>
- Hollund, Hege.** 2013. "Diagenetic Screening of Bone Samples; Tools to Aid Taphonomic and Archaeometric Investigations". Tesis doctoral en Estudios Geoarqueológicos y Bioarqueológicos, Department for Geo and Bioarchaeology, Vrije Universiteit Amsterdam, Ámsterdam.
- Hollund, Hege, Malou Blank y Karl-Göran Sjögren.** 2018. "Dead and Buried?: Variation in Post-Mortem Histories Revealed through Histotaphonomic Characterisation of Human Bone from Megalithic Graves in Sweden". *PLoS ONE* 13 (10): e0204662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204662>
- Hollund, Hege, Miranda Jans, Matthew Collins, Henk Kars, Ineke Joosten y Saskia Kars.** 2012. "What Happened Here?: Bone Histology as a Tool in Decoding the Post-mortem Histories of Archaeological Bone from Castricum, The Netherlands". *International Journal of Osteoarchaeology* 22 (5): 537-548. <https://doi.org/10.1002/oa.1273>
- Jans, Miranda.** 2005. *Histological Characterization of Diagenetic Alteration of Archaeological Bone*. Vrije Universiteit.

- Jans, Miranda, Christina Nielsen-Marsh, Colin Smith, Matthew Collins y Henk Kars.** 2004. "Characterization of Microbial Attack on Archaeological Bone". *Journal of Archaeological Science* 31: 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.07.007>
- Kars, Eva y Henk Kars.** 2002. *The Degradation of Bone as an Indicator in the Deterioration of the European Archaeological Property*. Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek.
- Keenan, Sarah y Annette Engel.** 2017. "Early Diagenesis and Recrystallization of Bone". *Geochimica et Cosmochimica Acta* 196: 209-223. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.09.033>
- Kendall, Christopher, Anne Høier Eriksen, Ioannis Kontopoulos, Matthew Collins y Gordon Turner-Walker.** 2018. "Diagenesis of Archaeological Bone and Tooth". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 491: 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.041>
- Lawrence, David.** 1968. "Taphonomy and Information Losses in Fossil Communities". *Geological Society of America Bulletin* 79: 1315-1330. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1968\)79\[1315:TAILIF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1968)79[1315:TAILIF]2.0.CO;2)
- Legoupil, Dominique.** 2009. "La ocupación del alero de Cerro Castillo: un sitio residencial en un mirador panorámico". *Magallania* 37 (1): 47-60. <https://www.magallania.cl/index.php/magallania/article/view/289>
- Lyman, Lee.** 1987. "Archaeofaunas and Butchery Studies: A Taphonomic Perspective". *Advances in Archaeological Method and Theory* 10: 249-337. <https://www.jstor.org/stable/20210090>
- Lyman, Lee.** 1994. *Vertebrate Taphonomy*. Cambridge University Press.
- Marchiafava, Valeria, Ermanno Bonuci y Antoni Ascenzi.** 1974. "Fungal Osteoclasia: A Model of Dead Bone Resorption". *Calcified Tissue Research* 14: 195-210. <https://doi.org/10.1007/BF02060295>
- Marden, Kerriann, Marcella Sorg y William Haglund.** 2013. "Taphonomy". En *Research Methods in Human Skeletal Biology*, editado por Elizabeth DiGangi y Megan Moore, 241-262. Academic Press.
- Marshall, Theo y John Holmes.** 1988. *Soil Physics*. Cambridge University Press.
- Millard, Andrew.** 2001. "The Deterioration of Bone". En *Handbook of Archaeological Sciences*, editado por Don Brothwell y Mark Pollard, 637-647. Wiley.
- Morales, Natalia.** 2022. "La relación humanos-fauna en el sur del área ecotonal húmedo-seca pampeana desde una perspectiva zooarqueológica". Tesis doctoral en Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.
- Morales, Natalia, Gustavo Barrientos y Lorena L'Heureux.** 2021. "Diagénesis ósea en el bosque caducifolio de Patagonia meridional al este de los Andes: modelo

teórico y evidencia empírica”. *Magallania* 49: 6e. <https://doi.org/10.22352/magallanla202149006>

Morales, Natalia, Luciana Catella, Fernando Oliva, Patricia Sarmiento y Gustavo Barrientos. 2018. “A SEM-Based Assessment of Bioerosion in Late Holocene Faunal Bone Assemblages from the Southern Pampas of Argentina”. *Journal of Archaeological Science: Reports* 18: 782-791. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.07.012>

Morales, Natalia, Patricia Sarmiento y Gustavo Barrientos. 2017. “Estudio comparativo de bioerosión microbiana en muestras óseas humanas y faunísticas del sur de la región pampeana”. Ponencia presentada en el VIII Congreso de Arqueología de la Región Pampeana Argentina, Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, 22-25 de agosto.

Müller, Hermann. 1951. “Grundlagen der Biostratinomie”. *Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik und Allgemeine Naturwissenschaften* 3: 1-147.

Müller, Hermann. 1963. *Lehrbuch der Paläozoologie*. Vol. 1, *Allgemeine Grundlagen*. Gustav Fischer Verlag.

Nielsen-Marsh, Christina. 1997. “Studies in Archaeological Bone Diagenesis”. Tesis doctoral en Ciencias Arqueológicas, School of Archaeology, University of Oxford, Oxford.

Nielsen-Marsh, Christina, Angela Gernaey, Gordon Turner-Walker, Robert Hedges, Alistair Pike y Matthew Collins. 2000. “The Chemical Degradation of Bone”. En *Human Osteology in Archaeology and Forensic Science*, editado por Margaret Cox y Simon Mays, 439-454. Greenwich Medical Media.

Nielsen-Marsh, Christina y Robert Hedges. 1999. “Bone Porosity and the Use of Mercury Intrusion Porosimetry in Bone Diagenesis Studies”. *Archaeometry* 41 (1): 165-174. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1999.tb00858.x>

Nielsen-Marsh, Christina y Robert Hedges. 2000. “Patterns of Diagenesis in Bone I: The Effects of Site Environments”. *Journal of Archaeological Science* 27: 1139-1150. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0537>

Nielsen-Marsh, Christina, Colin Smith, Miranda Jans, Anders Nord, Henk Kars y Matthew Collins. 2007. “Bone-Diagenesis in the European Holocene II: Taphonomic and Environmental Considerations”. *Journal of Archaeological Science* 34: 1523-1531. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.11.012>

O'Connor, Terry. 1996. “A Critical Overview of Archaeological Animal Bone Studies”. *World Archaeology* 28 (1): 5-19. <https://www.jstor.org/stable/124971>

Pfretzschner, Hans-Ulrich. 2006. “Collagen Gelatinization: The Key to Understand Early Bone-Diagenesis”. *Palaeontographica* 278: 135-148. <https://doi.org/10.1127/pala/278/2006/135>

- Pfretzschner, Hans-Ulrich y Thomas Tütken.** 2011. "Rolling Bones: Taphonomy of Jurassic Dinosaur Bones Inferred from Diagenetic Microcracks and Mineral Infillings". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 310: 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.01.026>
- Pike, Alistair.** 1993. "Bone Porosity, Water and Diagenesis: Towards a Grand Unified Theory of Bone Diagenesis". Tesis de licenciatura en Ciencias Arqueológicas y Forenses, Faculty of Life Sciences, University of Bradford, Bradford.
- Pike, Alistair, Christina Nielsen-Marsh y Robert Hedges.** 2001. "Modelling Bone Dissolution under Different Hydrological Regimes". En *Archaeological Sciences '97: Proceedings of the Conference Held at the University of Durham*, editado por Andrew Millard, 127-132. BAR International Series 939. Bar
- Procopio, Noemi, Caley Mein, Sefora Starace, Andrea Bonicelli y Anna Williams.** 2021. "Bone Diagenesis in Short Timescales: Insights from an Exploratory Proteomic Analysis". *Biology* 10 (6): 460. <https://doi.org/10.3390/biology10060460>
- Rho, Jae-Young, Lisa Kuhn-Spearing y Peter Zioupos.** 1998. "Mechanical Properties and the Hierarchical Structure of Bone". *Medical Engineering & Physics* 20: 92-102. [https://doi.org/10.1016/s1350-4533\(98\)00007-1](https://doi.org/10.1016/s1350-4533(98)00007-1)
- Roberts, Sam, Colin Smith, Andrew Millard y Matthew Collins.** 2002. "The Taphonomy of Cooked Bone: Characterizing Boiling and Its Physico-Chemical Effects". *Archaeometry* 44: 485-494. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.t01-1-00080>
- Rodríguez, Juan.** 2023. "Preservación, integridad y resolución del registro arqueológico del centro-este de Argentina durante el Holoceno tardío". Tesis doctoral en Arqueología, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Olavarría.
- Rodríguez, Juan, Paula Vitale, Marcela Bax y Ariadna Flores.** 2024. "Diagénesis ósea en sitios arqueológicos de ambientes fluvio-lacustres del centro-este de Argentina". *Intersecciones en Antropología* 25 (2): 189-208. <https://doi.org/10.37176/iea.25.2.2024.870>
- Rodríguez Suárez, Roberto.** 1995. "Validación de un procedimiento experimental para la determinación de calcio como elemento diagnóstico de diagénesis ósea". *Boletín Antropológico* 34: 87-95.
- Rodríguez Suárez, Roberto.** 2010. "La medición de parámetros diagenéticos: comprensión de los modelos de diagénesis". *Estudios de Antropología Biológica* 12 (2): 997-1020. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/eab/article/view/20375>
- Roux, Wilhelm.** 1887. "Über eine Knochen lebende Gruppe von Fadenpilzen (*Mycelites ossifragus*)". *Zeitschrift für Wissenschaftliche Zoologie* 45: 227-254.

- Rudakova, T. E. y Gennadii Zaikov.** 1987. “Degradation of Collagen and Its Possible Applications in Medicine”. *Polymer Degradation and Stability* 18: 271-291. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(87\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0141-3910(87)90015-2)
- Schaffer, Josef.** 1895. “Bemerkungen zur Geschichte der Bohrkanäle in Knochen und Zähnen”. *Anatomischer Anzeiger* 10: 459-464.
- Schotsmans, Eline, Barbara Stuart, Tahlia Stewart, Paul Thomas y Justyna Miszkiewicz.** 2024. “Unravelling Taphono-Myths: First Large-Scale Study of Histotaphonomic Changes and Diagenesis in Bone from Modern Surface Depositions”. *PLoS ONE* 19 (9): e0308440. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308440>
- Schwarcz, Henry y Harmeet Nahal.** 2021. “Theoretical and Observed C/N Ratios in Human Bone Collagen”. *Journal of Archaeological Science* 131: 105396. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105396>
- Smith, Colin.** 2002. “Modelling Diagenesis in Archaeological Bone”. Tesis doctoral, Department of Fossil Fuels and Environmental Geochemistry, University of Newcastle-Upon-Tyne, Newcastle.
- Smith, Colin, Christina Nielsen-Marsh, Miranda Jans, Paul Arthur, Anders Nord y Matthew Collins.** 2002. “The Strange Case of Apigliano: Early Fossilisation of Medieval Bone in Southern Italy”. *Archaeometry* 44: 405e416. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.t01-1-00073>
- Smith, Colin, Christina Nielsen-Marsh, Miranda Jans y Matthew Collins.** 2007. “Bone Diagenesis in the European Holocene I: Patterns and Mechanisms”. *Journal of Archaeological Science* 34: 1485-1493. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.11.006>
- Solari, Ana, Daniel Olivera, Inés Gordillo, Pedro Bosch, Geolar Fetter et al.** 2013. “Cooked Bones?: Method and Practice for Identifying Bones Treated at Low Temperature”. *International Journal of Osteoarchaeology* 25: 426-440. <https://doi.org/10.1002/oa.2311>
- Stathopoulou, Elizabeth, Vassilis Psycharis, Georgios Chryssikos, Vassilis Gionis y George Theodorou.** 2008. “Bone Diagenesis: New Data from Infrared Spectroscopy and X-Ray Diffraction”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 266: 168-174. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.03.022>
- Taylor, Erik y Eve Donnelly.** 2020. “Raman and Fourier Transform Infrared Imaging for Characterization of Bone Material Properties”. *Bone* 115490. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2020.115490>
- Trueman, Clive.** 2013. “Chemical Taphonomy of Biomineralized Tissues”. *Palaeontology* 56: 475-486. <https://doi.org/10.1111/pala.12041>
- Trueman, Clive, Anna Behrensmeyer, Noreen Tuross y Steve Weiner.** 2004. “Mineralogical and Compositional Changes in Bones Exposed on Soil Surfaces in Amboseli National

- Park, Kenya: Diagenetic Mechanisms and the Role of Sediment Pore Fluids”. *Journal of Archaeological Science* 31: 721-739. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.11.003>
- Trueman, Clive, Karen Privat y Judith Field.** 2008. “Why Do Crystallinity Values Fail to Predict the Extent of Diagenetic Alteration of Bone Mineral?”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 266 (3-4): 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.03.038>
- Trueman, Clive y Noreen Tuross.** 2002. “Trace Elements in Recent and Fossil Bone Apatite”. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 48: 489-521. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.13>
- Turner-Walker, Gordon.** 2012. “Early Bioerosion in Skeletal Tissues: Persistence through Deep Time”. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie* 265: 165-183. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2012/0253>
- Turner-Walker, Gordon.** 2019. “Light at the End of the Tunnels?: The Origins of Microbial Bioerosion in Mineralised Collagen”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 529: 24-38. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.05.020>
- Turner-Walker, Gordon, Aida Gutiérrez Galiacho, Núria Armentano y Ching-Quey Hsu.** 2023. “Bacterial Bioerosion of Bones Is a Post-Skeletonisation Phenomenon and Appears Contingent on Soil Burial”. *Quaternary International* 660: 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.12.009>
- Turner-Walker, Gordon, Christina Nielsen-Marsh, Unni Syversen, Henk Kars y Matthew Collins.** 2002. “Submicron Spongiform Porosity Is the Major Ultra-Structural Alteration Occurring in Archaeological Bone”. *International Journal of Osteoarchaeology* 12: 407-414. <https://doi.org/10.1002/oa.642>
- Turner-Walker, Gordon y T. V. Parry.** 1995. “The Tensile Strength of Archaeological Bone”. *Journal of Archaeological Science* 22: 185-191. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0020>
- Urquiza, Silvana.** 2016. “Control tafonómico y geoquímico del registro Camelidae en base a difracción de RX (DRX): puna austral argentina (Holoceno temprano y tardío)”. *Serie Correlación Geológica* 32: 101-117. <https://www.insugeo.org.ar/scg/ver-articulo.php?id=484>
- Vitale, Paula, Julia Tasca, Marcela Bax, Ariadna Flores, Gustavo Politis y Luciano Valenzuela.** 2019. “Análisis mediante FTIR de la conservación del colágeno y la posible contaminación en muestras óseas del Cuaternario pampeano”. *Anales de Arqueología y Etnología* 74 (2): 169-189. <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/analarque-yetno/article/view/3737>
- Van Klinken, Gert.** 1999. “Bone Collagen Quality Indicators for Palaeodietary and Radiocarbon Measurements”. *Journal of Archaeological Science* 26: 687-695. <https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0385>

- Van Klinken, Gert y Robert Hedges.** 1995. “Experiments on Collagen-Humic Interactions: Speed of Humic Uptake, and Effects of Diverse Chemical Treatments”. *Journal of Archaeological Science* 22: 263-270. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0028>
- Von Endt, David W. y Donald Ortner.** 1984. “Experimental Effects of Bone Size and Temperature on Bone Diagenesis”. *Journal of Archaeological Science* 11: 247-253. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(84\)90005-0](https://doi.org/10.1016/0305-4403(84)90005-0)
- Wadsworth, Caroline, Noemi Procopio, Cecilia Anderung, José-Miguel Carretero, Eneko Iriarte et al.** 2017. “Comparing Ancient DNA Survival and Proteome Content in 69 Archaeological Cattle Tooth and Bone Samples from Multiple European Sites”. *Journal of Proteomics* 158: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2017.01.004>
- Wedl, Carl.** 1864. “Über einen im Zahnbeim und Knochen keimenden Pilz”. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe* 50: 171-193. <https://www.biodiversitylibrary.org/partpdf/231439>
- Weiner, Stephen y Ofer Bar-Yosef.** 1990. “States of Preservation of Bones from Prehistoric Sites in the Near East: A Survey”. *Journal of Archaeological Science* 17 (2): 187-196. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(90\)90058-D](https://doi.org/10.1016/0305-4403(90)90058-D)
- White, Everett y Adrien Hannus.** 1983. “Chemical Weathering of Bone in Archaeological Soils”. *American Antiquity* 48: 316-322. <https://doi.org/10.2307/280453>
- Yrarrázaval, Sebastián, Isabel Cartajena, Diego Carabias y Carla Morales.** 2023. “Initial Approaches to Histotaphonomic Change in Submerged Wetland Landscapes: The Case Study of the GNLQ1 Extinct Faunal Assemblage”. Ponencia presentada en el XXI International Union for Quaternary Research Congress, Roma, 14-20 de mayo.
- Zhang, Xiang-Yu, Gang Fang, Lei-Lei Xing, Wei Liu y Jie Zhou.** 2018. “Effect of Porosity Variation Strategy on the Performance of Functionally Graded Ti-6Al-4V Scaffolds for Bone Tissue Engineering”. *Materials and Design* 157: 523-538. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.064>