

# Análisis de huellas de pisoteo y eólicas sobre huesos de un vertebrado moderno: contribución de la tafonomía al registro forense\*

*Analysis of traces of prints and the effects of wind on bones of a modern vertebrate: contribution of taphonomy to the forensic registry*

*Análise de rastros de pisadas e pegadas eólicas sobre ossos de um vertebrado moderno: contribuição da tafonomia para o registro forense*

Atilio Nasti, Ph.D.<sup>1</sup>

**Recibido:** 2 de marzo del 2019

**Aprobado:** 3 de junio del 2019

**Publicado:** 20 de septiembre de 2019

**Cómo citar este artículo:** Nasti A. Análisis de huellas de pisoteo y eólicas sobre huesos de un vertebrado moderno: contribución de la tafonomía al registro forense. Colomb.Forense. 2019;6(1): 1-22. doi: <https://doi.org/10.16925/2145-9649.2019.01.07>

---

\* Artículo de investigación.

1 Área de Criminalística y Estudios Forenses. Gendarmería Nacional, Argentina

Correo electrónico: [anasti@iugna.edu.ar](mailto:anasti@iugna.edu.ar)

## Resumen

**Introducción:** el análisis tafonómico de los restos óseos nos permitiría obtener información sobre algunos de los procesos posdeposicionales que los afectaron a corto, mediano y largo plazo. Este trabajo pretende exponer algunos de los resultados sobre la formación y distribución de huellas sobre restos óseos como parte de los procesos diagenéticos.

**Métodos y materiales:** para el análisis de las huellas se seleccionaron cinco muestras de huesos planos analizadas mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido ambiental. Para obtener imágenes topográficas de las impresiones, se utilizó un perfilómetro óptico 3D.

**Resultados y discusión:** durante la presión de la superficie del periostio sobre el sedimento se producen ablaciones (soluciones de continuidad por colapso del periostio), que se asocian con frecuencia a la presencia de huellas múltiples. Con respecto a las huellas producidas por erosión eólica, estas muestran dos tipos de morfología: una se presenta como pequeños agujeros con perímetros simétricos, generalmente coincidente con morfología de los granos de sedimento. El otro tipo de huella muestra una forma más asimétrica de forma alargada.

**Conclusión:** los procesos tafonómicos pueden ser reconstruidos a partir de una secuencia diacrónica de la alteración que permita modelar una línea de tiempo que reconstruya los procesos que afectaron los restos orgánicos desde la muerte de un organismo. El modelo diagenético de *Equus sp.* mostraría que la erosión eólica permanecería a las pocas semanas de depositación y actuaría en espacios de tiempo más largos con lapsos de interrupción al momento del enterramiento de *Equus* por procesos de sedimentación.

**Palabras clave:** antropología forense, huellas medioambientales, historia tafonómica, intervalo *post mortem*.

## Summary

**Introduction:** Taphonomic analysis of bone remains could allow us to obtain information on some of the post-depositional processes that affected them in the short, medium and long term. This work aims to expose some of the results on the formation and distribution of prints on bone remains as part of the diagenetic processes.

**Methods and materials:** For the print analysis, five samples of flat bones, analyzed by means of the electron scanning electron microscopy technique, were selected. To obtain topographic images of the prints, a 3D optical profilometer was used.

**Results and discussion:** Whilst pressing the periosteum surface onto the sediment, ablations (continuity solutions due to collapse of the periosteum) occur that are frequently associated with the presence of multiple prints. With respect to the marks produced by wind erosion, these show two types of morphology: one is presented as small holes with symmetrical perimeters, generally coinciding with the morphology of sediment grains. The other type of print shows a more asymmetrical shape in the form of an elongated shape.

**Conclusion:** The taphonomic processes can be reconstructed from a diachronic sequence of the alteration that allows modeling a timeline that reconstructs the processes that affected the organic remains since the death of an organism. The diagenetic model of *Equus sp.* shows that wind erosion could remain within a few weeks of deposition and would act over longer periods of time, with an interruption period at the time of burial of *Equus* via sedimentation processes.

**Keywords:** forensic anthropology, environmental prints, taphonomic history, post mortem interval.

## Resumo

**Introdução:** a análise tafonômica dos restos ósseos nos permite obter informação sobre alguns dos processos pós-depositacionais que os afetaram em curto, médio e longo prazo. Este trabalho pretende expor alguns dos resultados sobre a formação e a distribuição de pegadas sobre restos ósseos como parte dos processos diagenéticos. **Métodos e materiais:** para a análise das pegadas, foram selecionadas cinco amostras de ossos planos analisadas mediante a técnica de microscopia eletrônica de varredura ambiental. Para obter imagens topográficas das impressões, foi utilizado um perfilômetro óptico 3D. **Resultados e discussão:** durante a pressão da superfície do perióstio sobre o sedimento, são produzidas ablações (soluções de continuidade por colapso do perióstio) que são associadas com frequência à presença de pegadas múltiplas. A respeito das pegadas produzidas por erosão eólica, estas mostram dois tipos de morfologia: uma é apresentada como pequenos buracos com perímetros simétricos, geralmente coincidente com morfologia dos grãos de sedimento. O outro tipo de pegada mostra uma forma mais assimétrica de forma alongada. **Conclusão:** os processos tafonômicos podem ser reconstruídos a partir de uma sequência diacrônica da alteração que permita modelar uma linha de tempo que reconstrua os processos que afetaram os restos orgânicos desde a morte de um organismo. O modelo diagenético de *Equus sp.* mostraria que a erosão eólica permaneceria às poucas semanas de deposição e atuaria em espaços de tempo mais longos com lapsos de interrupção no momento do enterro de *Equus* por processos de sedimentação.

**Palavras-chave:** antropologia forense, pegadas meio ambientais, história tafonômica, intervalo *post mortem*.

## Introducción

Una detallada observación sobre los restos óseos humanos en diferentes entornos, son fundamentales para una interpretación no ambigua del registro forense [1, 2, 3, 4, 5]. En este sentido, uno de los mayores desafíos que el científico forense debe de sortear es que diversos fenómenos de diferente origen pueden dejar rastros de apariencia similar en la superficie del hueso [6, 7, 8]. Por ejemplo, muchas técnicas de trozamiento y corte realizadas por el hombre, como también el pisoteo (trampling) por factores antrópicos y naturales, y algunas conductas llevadas a cabo por los carroñeros, pueden generar huellas sobre la superficie del hueso reduciendo la precisión de cualquier interpretación centrada en un conjunto de criterios [1, 9, 10, 11, 12 y 13].

En este sentido, el análisis tafonómico de los restos óseos, nos permitiría obtener información sobre algunos de los procesos pos depositacionales que los afectaron a corto, mediano y largo plazo [11, 14, 15]. Este trabajo pretende exponer algunos de los resultados sobre la formación y distribución de huellas sobre restos óseos como parte de los procesos diagenéticos [16]. La observación microscópica de huellas de origen eólico y por pisoteo sobre huesos contemporáneos de *Equus sp.* en escenarios controlados nos da la posibilidad de una interpretación primaria

acerca de la etiología y las consecuencias que los diferentes factores erosivos producirían sobre la superficie del hueso, que generan una inferencia inductiva sobre la historia tafonómica y, en última instancia, sobre el intervalo *post mortem* [1, 4, 5, 22, 23].

## Presentación del problema

Del mismo modo que al contexto arqueológico [18,19, 20, 21, 24], en los últimos años se ha prestado interés a los fenómenos de alteración ósea y sus consecuencias dentro del contexto forense [25, 26]. Puesto que el comportamiento de los huesos a través del tiempo puede ser, en parte reconstruido, los científicos forenses ven a la tafonomía como la disciplina capaz de distinguir e interpretar eventos *peri mortem* y *post mortem*, debido a una gran variedad de procesos tanto naturales como derivados del comportamiento humano que los afectaron en el pasado [1, 4, 5, 11, 27]. Por esta razón, durante los últimos años, la tafonomía forense se ha convertido en una importante herramienta analítica que participa en la interpretación y reconstrucción diacrónica del registro forense, como uno de los componentes críticos del proceso de identificación [4, 26, 27].

En este trabajo, consideramos a los agentes tafonómicos como entidades que tienen la capacidad para modificar o preservar el registro óseo [1,11, 16, 26, 27]. En este sentido, tanto la erosión por el viento como la abrasión por el pisoteo se entienden mejor como una tríada de procesos: a) abióticos, b) inadvertido o intencional y c) bióticos, que alteran el registro óseo [6].

La hipótesis que proponemos en este trabajo es que la identificación y reconstrucción de los procesos erosivos (viento) y abrasivos (pisoteo) sobre la superficie de los huesos permitiría, a través de la inferencia inductiva, la construcción de un modelo tafonómico analógico de ciclo anual (360 días), donde dichos fenómenos podrían tomarse como indicadores a corto, mediano y largo plazo de los procesos *post mortem* [15, 16, 28].

## Huellas de abrasión por pisoteo

A partir de la publicación de Olsen y Shipman [21], se han realizado importantes aportes a la interpretación del pisoteo (*trampling*) como un factor significativo en el proceso de modificación de los huesos. Sin embargo, el fenómeno de pisoteo mayormente enfocaba la alteración espacial que producía sobre el registro

arqueológico, fundamentalmente sobre el registro lítico y cerámico [24]. Además, el pisoteo, como proceso de modificación del registro arqueológico se diferencia de las acciones de otros factores porque su ocurrencia es mucho más dependiente del azar, no solo debido a la indiferencia del actor, sino también a la precisión necesaria en la interacción entre agente y objeto [20, 21, 24, 30, 31, 33, 34].

Domínguez Rodrigo *et al.* [10] argumentan que el pisoteo conduce a la formación de estrías y micro estrías sobre las superficies del hueso, razón por la cual, se considera que el daño por pisoteo es una forma de abrasión sedimentaria. Esta definición implica un mecanismo sin muchas complicaciones inducidas, sobre todo, por la presión de la superficie del hueso sobre los sedimentos.

Cuando el fenómeno de pisoteo aparece, la presión hace que el hueso haga contacto contra la matriz sedimentaria circundante, produciendo una gran variedad de estrías y micro estrías en toda su superficie. Las marcas de pisoteo se han descrito como aleatoriamente orientadas en la superficie de los huesos, aunque generalmente transversales al eje longitudinal de los huesos largos [10, 21, 31].

La presencia de estrías y micro estrías se considera generalmente como resultado de la interacción directa entre la superficie del sedimento y la del hueso, en este sentido la presencia de un gran número de huesos estriados puede explicarse por el intenso movimiento de estos sobre la superficie sedimentaria [10]. Además, la forma y estructura de cada hueso, taxonomía, edad ontogenética, morfología, estado de conservación, etc., determinaría principalmente la naturaleza y la intensidad del proceso abrasivo y sus efectos sobre la superficie del hueso [10, 14].

Durante el pisoteo, la eliminación del periostio y la abrasión de la superficie externa es un proceso intenso y rápido que, después de solo unas pocas horas, puede llevar al pulido y finalmente puede borrar todas las huellas anteriores que estaban en la superficie [35]. En los huesos aún hidratados, las estrías suelen ser claras debido a la fricción de los sedimentos con la superficie e incluso no es inusual que los sedimentos permanezcan incrustados en la matriz de la corteza del hueso [10, 8, 36]. Por el contrario, en huesos secos y pobremente hidratados, existen diferentes propiedades mecánicas que inducen a una mayor rigidez y una respuesta menor a la tensión, por lo tanto, al absorber menos energía en las fracturas, podría producir una asociación más frecuente entre la presencia de fracturas y las estrías durante el pisoteo [6, 10, 20, 26, 31].

## Huellas de erosión por la acción eólica

Existen algunos indicadores sobre la acción del viento en los huesos como, por ejemplo, la erosión de los bordes y la superficie del periostio que secuencialmente pueden afectar los diferentes huesos del esqueleto, y que han sido estudiados en detalle dentro del contexto forense [27, 37]. El descubrimiento de granos de arena incrustados sobre la topografía anatómica de la superficie de los huesos podría constituir un indicador importante para identificar el factor erosivo sobre huesos, aun, hidratados, mientras que, en los huesos meteorizados, los granos de arena podrían quedar depositados dentro de las grietas preexistentes en la superficie del periostio [27, 38].

Según estudios de diagenéticos en contextos marinos [38], existiría una correlación entre el tamaño de los granos de arena y el tamaño de la marca en la superficie del hueso. Partiendo de este principio, una manera de identificar los factores de la erosión eólica sería identificar las impresiones resultantes y los sedimentos o granos de sedimento asociados a ella. Los sedimentos más pequeños podrían perderse, principalmente en entornos altamente energéticos, mientras que los granos más gruesos tenderían a acumularse en las grietas de los huesos [37].

En ambientes áridos y semiáridos se pueden observar distintos procesos que funcionan simultáneamente, como la velocidad del viento, que contribuye al transporte de sedimento; el impacto de estos sobre la superficie del hueso, como también, la orientación del hueso y la dirección del viento son algunos de los factores básicos que contribuyen a la génesis de alteraciones de origen eólico sobre el registro óseo [25, 28, 32, 39, 45, 46].

Algunas de las observaciones han demostrado que mientras la acción del viento puede ser constante, la naturaleza del daño no lo es. En efecto, en algunos contextos sedimentarios, el hueso expuesto puede ser pulido, pero no existe una pérdida real de la superficie cortical [37]. Sin embargo, en otros contextos ecológicos, ante la persistencia de la erosión eólica, la superficie cortical tenderá a disminuir gradualmente hasta el punto donde en los huesos largos, la epífisis se perderá, aunque a menudo se conservará la diáfisis de los huesos grandes [28, 37].

## Metodología

Los restos completos de un ejemplar de un año y medio de *Equus caballus* fue localizado sobre la superficie del borde de una duna a 60 metros de la playa (Lat. 37° 18' 47,15 "S. larga. 57 ° 0'26 05" W). El ejemplar murió a fines de marzo de 2016 y no se observaron signos de trauma *peri mortem*. [29]. El ejemplar fue monitoreado

mensualmente hasta abril de 2017 y reveló macroscópicamente los procesos de alteración de la superficie ósea, la desarticulación y la dispersión esquelética.

Para el análisis de las huellas, se seleccionaron cinco muestras de huesos planos, (cuatro costillas y un fragmento del hueso de la pelvis). Las superficies de las costillas fueron divididas en 20 sectores de 1x1 cm (10 en su superficie ventral y 10 en la dorsal). 50 unidades de muestreo al azar se seleccionaron para análisis con la técnica de microscopía electrónica de barrido ambiental (Fei Quanta 450 con resolución de 3,5 nm a 30 kV en 38 x, 200 x y 400 x). Todas las imágenes fueron procesadas y analizadas usando la suite de JMicrovision 2,5, mientras que los datos estadísticos y los gráficos fueron obtenidos con Infostat. Para obtener imágenes topográficas de las impresiones, se utilizó un perfilómetro óptico 3D, Veeco Wyco NT1100. Este instrumento realiza mediciones a través de desplazamiento de fase y análisis vertical por interferometría de luz. Se utilizaron lentes 10 X y 50 X (movimiento XY de  $\pm 50,8$  mm y rango de las mediciones verticales: 0,1 nm a 1 mm). Las imágenes se analizaron con SPM Gwyddion, programa modular orientado al análisis topográfico de las superficies obtenidas por técnicas de microscopía electrónica de barrido.

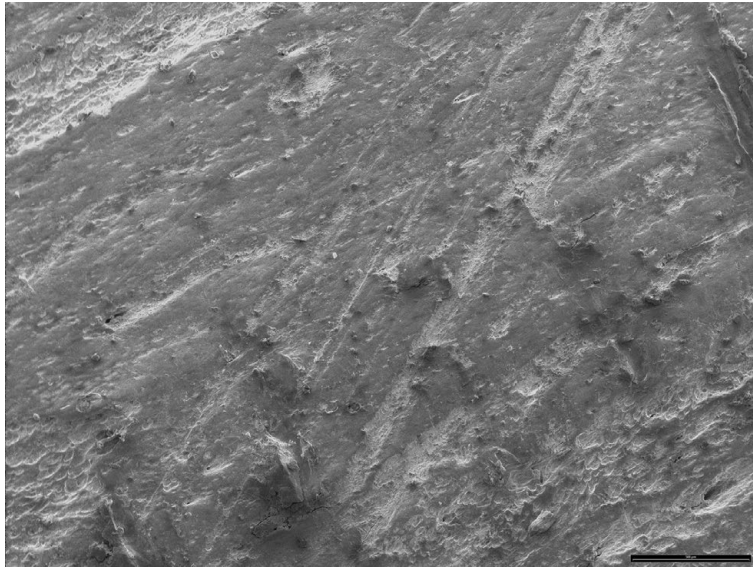
## Área de estudio

El área de depositación del ejemplar de *Equus* se encuentra en el borde oriental de la llanura costera, caracterizada por un relieve extremadamente plano y bajo. La zona presenta una alta heterogeneidad de hábitats naturales, como la franja de playa de arena, sistemas de dunas activas, una zona de bosque artificial y la llanura. El cordón litoral se divide en dos unidades geomorfológicas, playa y dunas. La playa es aproximadamente rectangular con un ancho que varía entre 50 y 150 metros, mientras que las dunas de pendientes suaves están mayormente formadas por arena de grano medio [40].

La temperatura tiene un promedio anual de 14,6 °C con una precipitación de 885 milímetros y una evapotranspiración potencial en 727 mm. Las precipitaciones se distribuyen durante todo el año, aunque aumentan durante los meses de diciembre y enero, disminuyendo durante el invierno. En este sector de la costa, los vientos predominan del cuadrante oeste, de octubre a febrero y desde el norte, entre abril y agosto, con una intensidad media anual a 12 km/h [41].

## Resultados

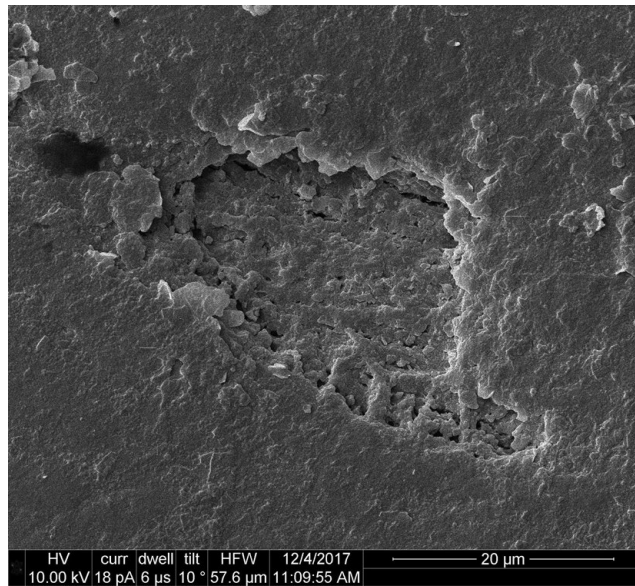
Las huellas de abrasión por pisoteo se presentan principalmente como líneas rectas o semirrectas proyectadas sobre la superficie del periostio, con longitudes que van desde 0,54 mm a 7,56 mm (promedio de 23 mm). Según la clasificación de Domínguez-Rodrigo [10], hay huellas que están formadas por estrías (simples) y más de una estría (múltiples) producida por diferentes sedimentos en el mismo acto de presión y arrastre. La figura 1 muestra huellas de pisoteo simple y múltiple que atraviesan la superficie del hueso. La anchura media de las impresiones simples es 0,060 mm y de las múltiples van desde 0,50 mm a 1,44 mm con un promedio de 0,73 mm. El análisis de varianza sobre ambos tipos de huellas indica que hay una diferencia significativa si comparamos la anchura ( $0,00060294 p \leq 0,05$ ), mientras que no hay importantes variaciones si se compara la longitud entre ellas ( $5,22939 p \geq 0,05$ ).



**Figura 1.** Huellas de abrasión por pisoteos simples y múltiples

Fuente: elaboración propia.

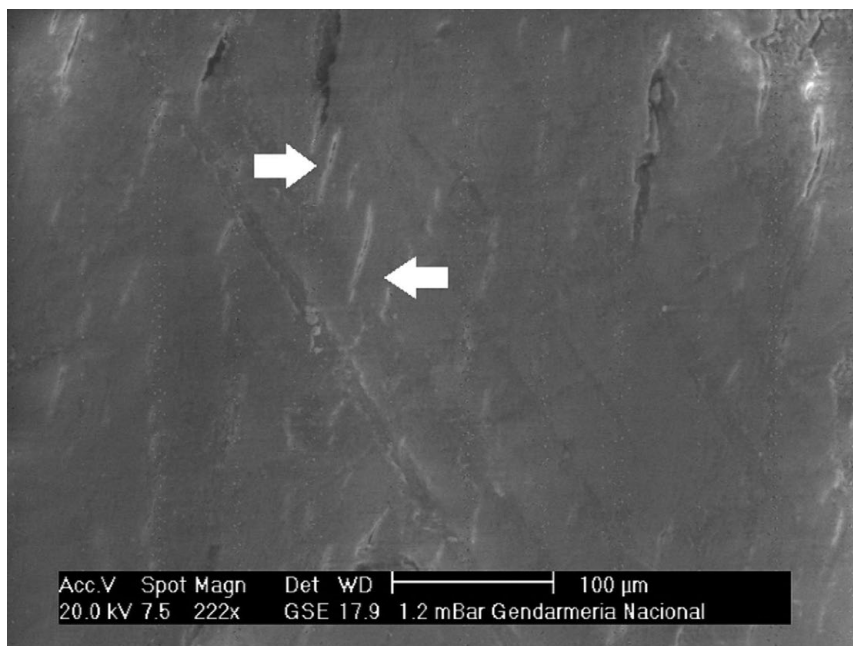
Durante la presión de la superficie del periostio sobre el sedimento por el pisoteo, se producen ablaciones (soluciones de continuidad por colapso del periostio) que se asocian con frecuencia a la presencia de huellas múltiples. Presentan un promedio de 0,020 mm de ancho por 0,040 mm de largo. Son principalmente ovaladas con bordes perimetrales irregulares (figura 2).



**Figura 2.** Huella de ablación por pisoteo producida por la presión del periostio sobre los granos de sedimento. Estas huellas suelen estar asociadas a huellas de abrasión de tipo múltiple

**Fuente:** elaboración propia.

Por su parte, las huellas producidas por la erosión eólica muestran dos tipos de morfología: una se presenta como pequeños agujeros con perímetros simétricos, (0,002 mm) generalmente coincidente con morfología de los granos de sedimento. El otro tipo de huella muestra una forma más asimétrica de forma alargada con un perímetro medio de 0,050 mm. También, pueden aparecer marcas pequeñas y cortas (figura 3) de forma recta de 0,040 mm de largo por 0,010 mm de ancho promedio. Estas huellas podrían confundirse morfológicamente con las de pisoteo de estría simple. Sin embargo, la tabla 1 muestra los resultados de una estadística descriptiva sobre dos variables (longitud y anchura) de estas huellas eólicas comparadas con las huellas de estrías simples causada por pisoteo.



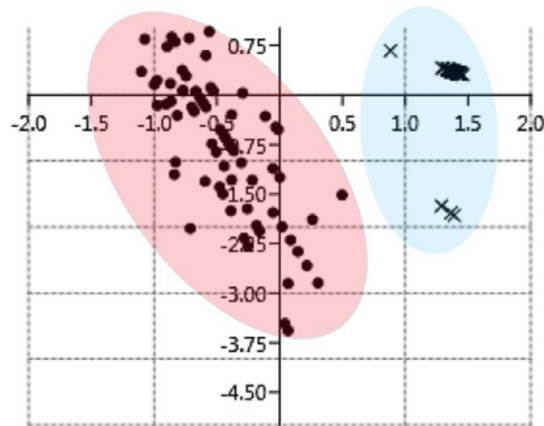
**Figura 3.** Huellas de erosión eólica (flecha) en forma de pequeñas estriaciones  
Fuente: elaboración propia.

Podemos observar que la desviación estándar es más fuerte en las huellas de pisoteo con estría simple, en contraste con la de origen eólico, que tienden a ser más homogéneas. A pesar de la posible similitud entre ambos tipos de huellas, la prueba T de Student muestra un valor de 3,977 con un  $p \leq 0,05$ , que conduce a rechazar la homogeneidad de la igualdad de la muestra.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva para 2 variables (largo/ancho) en milímetros de huellas de erosión eólica y abrasión por pisoteo

Variable	Observación	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv.estándar
<b>Pisoteo</b>					
Largo	82	0,537	11,04	3,235	2,287
Ancho	82	0,023	0,144	0,065	0,025
<b>Eólico</b>					
Largo	82	0,025	0,555	0,081	0,059
Ancho	82	0,008	0,025	0,016	0,002

Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** Análisis de correspondencia para largo y ancho de huellas de erosión eólica ● y abrasión por pisoteo X  
 Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la frecuencia (*f*) de las huellas de pisoteo y eólica sobre la superficie de las costillas, la tabla 2 muestra que sobre un total de 2.064 casos, están presentes en ambos lados de la superficie del hueso, sin embargo, las huellas de origen eólico aparecen con más frecuencia en la parte anterior (posición anatómica), mientras que las huellas de pisoteo son más frecuentes en el lado posterior. En cuanto a la distribución espacial de ambos tipos de huellas, las de origen eólica presentarían un patrón que tiende a la concentración en grupos ( $R: 0,93749 p \leq 0,005$ ), mientras que, las huellas por pisoteo mostrarían un patrón más aleatorio  $R: 1,3246 p \leq 0,05$ .

**Tabla 2.** Frecuencia (*f*) de hellas de erosión eólica y abrasión por pisoteo relevada en las cuatro áreas de muestreo

<i>Lado</i>	<b>Eólico</b>		<b>Pisoteo</b>	
	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i>	<i>f</i>
Frontal	1397	0,70	37	0,45
Posterior	585	0,29	45	0,54
<b>TOTAL</b>	1982		82	

Fuente: elaboración propia.

En muchos contextos forenses, la orientación espacial de las huellas podría utilizarse como indicador de la historia tafonómica [1, 28, 29, 36, 37] y es por esta razón, que este tipo de datos debe ser relevado. La posición en la que el hueso queda depositado sobre la superficie del sedimento y la morfología topográfica del hueso son dos variables que influyen en la distribución espacial de las huellas [11, 20, 24, 31]. Utilizamos la prueba paramétrica R (*Rayleigh*), cuyo propósito es determinar si la población de un conjunto de datos difiere significativamente de la uniformidad, es decir si hay evidencia de un patrón unidireccional de los datos. La prueba estadística para las huellas de pisoteo, mostró un valor de R: 0,6817, mientras que para las huellas eólicas el valor fue de R: 0,8542, esto podría significar que ambas poblaciones presentan direcciones que tienden a una orientación al azar, aunque las eólicas se alejan más de un patrón aleatorio. Por último, una comparación entre los patrones entre ambos tipos de huellas, muestra una muy baja correlación (coeficiente de correlación circular R: -0,0049997).

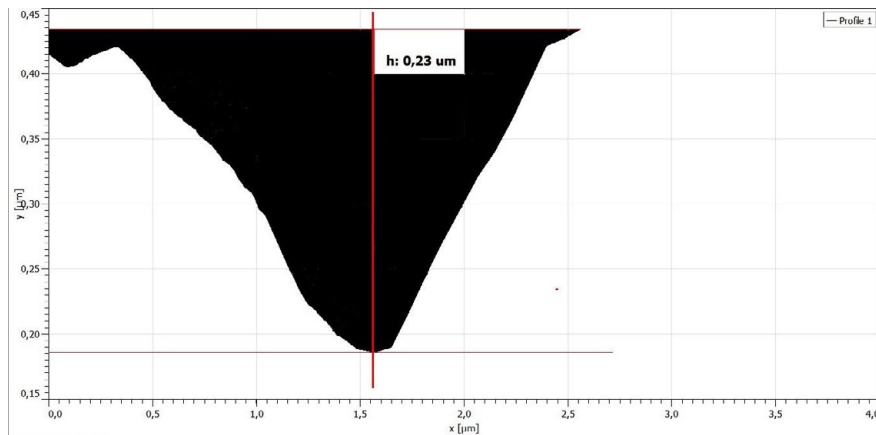
## Discusión

En el área bajo estudio, la arena tiene un origen biogénico con valores unimodales (2,32 *Phi*). El sedimento se compone principalmente de arenas (0,030 mm de diámetro promedio) de carácter homogéneo (desviación típica de 1,07 y una asimetría de -0,10), pero también hay arena de grano medio, 0,11 mm y mayor 0,38 mm [40, 42].

Desde el punto de vista de la mecánica del transporte, los granos de arena se mueven básicamente bajo la fuerza del viento de dos formas diferentes: por saltación y por arrastre superficial. La primera de ellas es más importante y representa más del 75 % del total [42]. Cuando el viento alcanza la velocidad crítica, arrastra las partículas sedimentarias de la superficie con un movimiento ascendente para caer luego por su propio peso en forma de una parábola. Cuando llegan a la superficie, los granos transmitirán su movimiento cinético a otras partículas. El movimiento se repite a través de la energía generada por el impacto de los granos en saltación que golpearán sucesivamente nuevos granos. Los granos que son mayores de 1 mm de diámetro (algo que no ocurre en estos sedimentos de arena) son movidos generalmente por el segundo proceso llamado arrastre superficial.

En este mismo sentido, se han identificado sobre la superficie del periostio, un promedio de 50 impactos por milímetro cuadrado, de pequeños granos (0,002 x 0,001 mm). Los impactos de sedimento a 90 grados producirían pequeños agujeros con perímetros regulares de forma circular o levemente ovalada. La figura

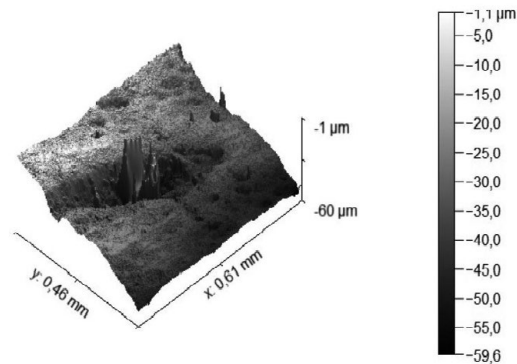
5 muestra un perfil topográfico de una impresión de impacto perpendicular a la superficie del hueso por erosión eólica. Observamos un diámetro promedio de 0,0039 mm por 0,023 mm de profundidad. Por el contrario, un grano que impacte en ángulo agudo produciría agujeros con perímetros irregulares de forma más alargada (en forma de uso o fusiforme).



**Figura 5.** Perfil topográfico de hoyo por impacto directo por erosión eólica

**Fuente:** elaboración propia.

En la figura 6 se muestra la imagen de un hoyo de impacto en ángulo agudo producido por acción eólica de donde se infiere a partir de su forma (alargada o fusiforme), la dirección del impacto. Como hemos argumentado, algunas partículas sedimentarias muy pequeñas pueden afectar la superficie del hueso con un ángulo mucho menor y marcar finamente la superficie del hueso, produciendo estrías pequeñas [43] (indicadas por flechas de detalle en la figura 4). Argumentamos que la mayor cantidad de huellas de erosión eólica se encontrarían en la superficie anterior de la costilla, que es la zona más expuesta a la erosión eólica, mientras se encuentra articulada. Una vez iniciado el proceso de desarticulación y dispersión, las huellas por abrasión por pisoteo se producirían mayormente sobre la superficie posterior que apoya sobre el sedimento.

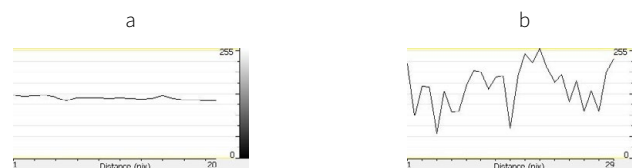


**Figura 6.** Imagen 3D obtenida mediante el perfilómetro láser que muestra el hoyo alargado producido por erosión eólica

Fuente: elaboración propia.

Olsen y Shipman [21] argumentan que la presencia de múltiples estrías podrían indicar continuas acciones abrasivas del pisoteo, y que de alguna manera demostraría la intensidad y duración de la tensión, mientras que la abrasión de huellas de tipo simple podrían implicar menos estrés [10].

En la figura 7 podemos observar dos perfiles de huellas de abrasión por pisoteo simple (a) y múltiple (b). El perfil de una huella con estría simple (a) se produciría con granos sedimentarios aislados, a baja presión, originando una impresión de aspecto topográfico regular. La imagen (b) muestra un perfil topográfico irregular, a alta presión, producida por varios granos que genera una impresión con múltiples marcas de estrías.



**Figura 7.** Perfiles de huellas de abrasión por pisoteo simple (a) y múltiple (b)

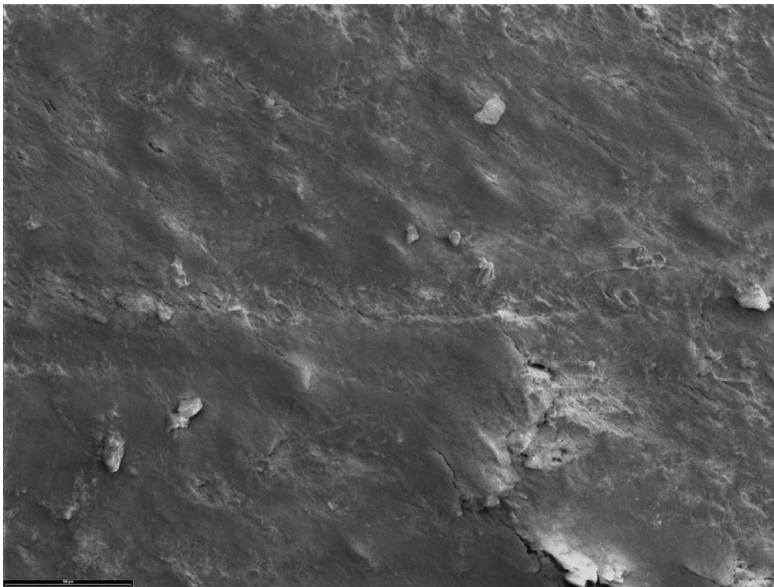
Fuente: elaboración propia.

Por su parte, las mencionadas ablaciones expresarían el colapso de la superficie del periostio. Este tipo de huellas se producirían debido a la presión de la superficie contra los granos de sedimento. En las muestras que fueron sometidas al análisis

microscópico se observa que existe una correlación significativa entre el diámetro de los sedimentos y el diámetro de las ablaciones sobre el periostio ( $R_2$  0,778).

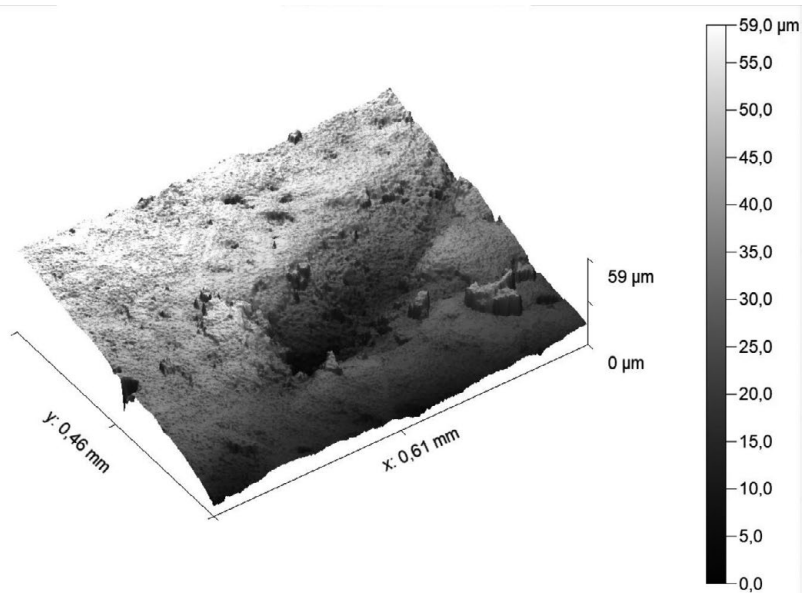
Generalmente, esta compatibilidad no se debería registrar regularmente en huesos meteorizados o quemados, donde los procesos diagenéticos del periostio complicarían la asociación entre los granos de sedimento y las impresiones que producen [44].

La figura 8 muestra algunos granos de sedimentos aún incrustados en la superficie del periostio, lo que permite inferir que el hueso, al momento del pisoteo, estaba hidratado, ya que existe una correspondencia entre el tamaño y morfología del grano de sedimento y la matriz del periostio. Por su parte, la figura 9 muestra una imagen tridimensional de una ablación, donde se aprecia el grano de sedimento aun incrustado. En huesos poco meteorizados (0-1) en la escala de Behrensmeyer [45], el contenido de humedad produciría una ablación con bordes regulares, adaptados a la morfología del sedimento, mientras que aquellas ablaciones que se produzcan en un hueso más deteriorado, presentarían bordes más irregulares, esto es debido a la menor plasticidad, siendo una evidencia del factor diacrónico de la historia tafonómica.



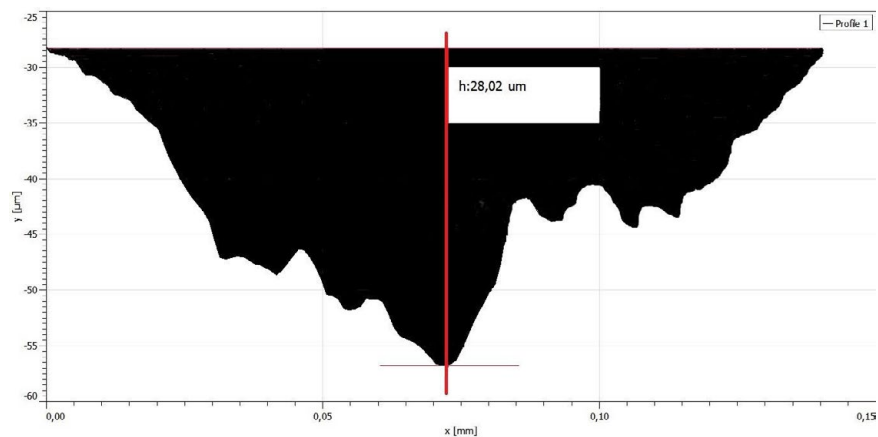
**Figura 8.** Granos de sedimentos aún incrustados en el periostio, asociados a huellas de pisoteo de tipo múltiple

Fuente: elaboración propia.



**Figura 9.** Huella de ablación por pisoteo conteniendo aun el grano de sedimento incrustado en su interior  
Fuente: elaboración propia.

La figura 10 muestra el perfil topográfico de una ablación con un ancho máximo 0,13 mm y una profundidad de 2,802 mm. Puede observarse la irregularidad de los perfiles replicando la morfología der los granos sedimentarios.



**Figura 10.** Perfil topográfico de ablación por pisoteo  
Fuente: elaboración propia.

Las huellas de erosión eólica estarían presentes durante el primer mes de depositación de *Equus*, afectando ciertas partes anatómicas (epífisis de huesos largos, bordes de escapulas, borde de pelvis, etc.), sobre todo en aquellas partes anatómicas vinculadas a la pérdida de tejido muscular y cutáneo. A partir del cuarto mes se observa una incidencia de los factores de erosión eólica. En efecto, los hoyos y las estrías se hacen más evidentes y hay una pérdida progresiva de tejido óseo del periostio, especialmente en los extremos proximal y distal de las extremidades y superficie de costillas de la caja torácica, que se acrecienta a partir del quinto mes.

En este sentido, el proceso de deshidratación al que están sometido los restos de *Equus* y la consecuente persistencia del tejido conectivo y cutáneo (cuero), podría explicar la distribución selectiva de las huellas de erosión eólica en las zonas del periostio que más se exponen a la intemperie. En este entorno, hay huesos que mantienen restos de tejido que contribuye a mantener la articulación de las partes anatómicas, y que luego se van degradando a partir de los 5/6 meses. La deshidratación y la consecuente presencia de tejido no solo contribuyen a preservar la integridad anatómica, sino que contribuye también a un retardo en la acción dispersiva (desarticulación) de los carroñeros [29].

En relación a la alteración antrópica (pisoteo observado durante el monitoreo), se consolida de manera significativa desde el octavo (8) mes, comenzando con la producción de huellas de pisoteo, tanto simples como de tipo múltiples y concluyendo hacia el décimo (10) mes, con la dispersión y consecuente pérdida de la totalidad del esqueleto apendicular. Es pertinente mencionar que las huellas de pisoteo están dispuestas aleatoriamente sobre la superficie del hueso porque este fenómeno se produciría, mayormente, una vez desarticulado y dispersados los huesos, que estarían ya erosionados en su superficie (estadio 1/2 en la escala de Behrensmeyer [45]).

Es interesante notar que los huesos, aún articulados, de *Equus* sp., después de seis meses *post mortem*, presentaban un estadio de conservación 0-1 en la escala de Behrensmeyer [45, 46], por lo que podemos afirmar que los procesos erosivos actúan tempranamente sobre los huesos todavía en buen estado de conservación, mientras que el pisoteo, se producirían una vez dispersados y sobre la superficie de huesos que ya han comenzado su proceso diagenético [21, 47]. Esperamos que los huesos que se han dispersado continúen con sus procesos naturales de diagénesis y la subsecuente destrucción de la superficie del periostio obstaculizando progresivamente la identificación de los procesos de erosión y abrasión que hemos observado sobre *Equus* sp. Durante los meses de diciembre y enero (10 y 11 mes de observación), los procesos sedimentarios cubrieron los restos de *Equus*, compuesto

por parte del tejido cutáneo del tórax, y protegieron totalmente partes anatómicas (costillas, escápula y vertebras torácicas) que aun mantenían un estadio 0-1 en la escala de Behrensmeier [45].

## Conclusión

Sabemos que los procesos relacionados con la diagénesis ósea, incluyen una gama de fenómenos que potencialmente pueden destruir la evidencia forense. Estos procesos pueden incluir, tanto los efectos de los ciclos climáticos, el consumo de restos por parte de animales carnívoros, la acción de pisoteo y el viento, como otros factores. Así como algunos agentes contribuyen a la preservación del registro forense, como los procesos sedimentarios, otros lo ocultan o destruyen, a menudo con más éxito [31, 32, 48]. Aunque ciertos procesos tafonómicos pueden no ser fáciles de identificar y comprender, pueden ser reconstruidos a partir de una secuencia diacrónica de la alteración, y modelar, en consecuencia, una línea de tiempo que reconstruya los procesos que afectaron los restos orgánicos desde la muerte de un organismo [38, 43].

De hecho, el modelo diagenético de *Equus sp.* mostraría que la erosión eólica estaría presente a las pocas semanas de depositación y actuaría en espacios de tiempo más largos con lapsos de interrupción al momento de enterramiento de *Equus* por procesos de sedimentación. Mientras que el pisoteo se produciría mayormente a partir del séptimo mes de depositación, esto es, mayormente al inicio de la desarticulación y dispersión de las partes anatómicas, produciendo una mayor variedad de daño óseo en espacios de tiempo relativamente más cortos [37, 38].

Creemos que este tipo de observaciones podría tener importantes implicancias en los estudios forenses, ya que es imprescindible discriminar cómo diferentes procesos diagenéticos pueden producir resultados ambiguos [49]. Como parte de los procesos relacionados con las transformaciones que sufren los restos orgánicos, la modificación de la superficie del hueso debe ser considerada como un proceso continuo, lo que implica que la identificación de los fenómenos bióticos y abióticos, puede tener características de diagnóstico diacrónico. La construcción de pequeños modelos en ambientes específicos nos puede brindar la posibilidad de comprender la interacción de variables críticas para interpretar los fenómenos de los procesos diagenéticos e inferir el intervalo *post mortem*.

Aunque nuevas técnicas analíticas aplicadas a nuevos contextos interpretativos demostrarían la diversidad de las variables implicadas en los procesos diagenéticos [36, 26, 50, 51], necesitamos más trabajo experimental para demostrar la complejidad e interacción de dichas variables.

## Agradecimientos

Al Dr. Daniel Converso, jefe del Departamento Químico de Gendarmería Nacional, por permitirme la utilización del microscopio electrónico de barrido ambiental. A la Dra. Karina Pierpaulli y al Dr. Alejandro Fasciszewski del Instituto de Nano Ciencia y Nano Tecnología (INN), Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), por su asistencia en la utilización del perfilómetro óptico. Finalmente, deseo agradecer al Dr. S.J. Griffith del Departamento de Ciencias Oceánicas y Terrestres de la Universidad de Southampton, a la Dra. Juditt Littleton del Laboratorio de Investigaciones Paleocologías del Pacífico de la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda, y al Dr. James Pokines del Departamento de Anatomía y Neurobiología de la Escuela de Medicina de la Universidad de Boston por permitir el acceso a sus publicaciones.

## Referencias

1. Haglund WD, Sorg MH. Method and theory of forensic taphonomic research. En: Haglund WD, Sorg MH, editores. *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*. Florida, Estados Unidos: CRC Press; 1997. p. 13-26.
2. Ubelaker DH. Taphonomic Applications in Forensic Anthropology. En: W.D. Haglund and M.H. Sorg, editores. *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*. Florida, Estados Unidos: CRC Press; 1997, p. 77-90.
3. Cameron AC. Estimating the post-mortem interval of skeletal remains: a taphonomic approach. [Disertación]. [Sidney]: The Australian National University; 2016.
4. Dirkmatt DC, Cabo LL, Ousley SD, Symes SA. New perspectives in forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*. 2008; 137(S47):33-52. doi: [10.1002/ajpa.20948](https://doi.org/10.1002/ajpa.20948).
5. Cattaneo C. Forensic anthropology: developments of a classical discipline in the new millennium. *Forensic Sci Int*. 2007 en. 17; 165(2-3):185-93. doi: [10.1016/j.forsciint.2006.05.018](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.05.018).

6. Andrews P, Cook J. Natural Modifications to Bones in a Temperate Setting. *Man*. 1985 dic.; 20(4):675–691. doi: [10.2307/2802756](https://doi.org/10.2307/2802756).
7. Lyman RL, Fox GL. A critical evaluation of bone weathering as an indication of bone assemblage formation. *J. Archaeol. Sci.* 1989;6(3):293-317. doi: [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(89\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0305-4403(89)90007-1).
8. Fernandez Jalvo Y, Andrews P. Atlas of taphonomic identifications: 1001 images of fossil and recent mammal bone modification. Springer: Vertebrate Paleobiology and Paleontology; 2017.
9. Bunn HT. A taphonomic perspective on the archaeology of human origins. *Annu. Rev. Anthropol.* 1991; 20:443-67.
10. Dominguez-Rodrigo M, De Juana S, Galán AB, Rodríguez M. 2009. A new protocol to differentiate trampling marks from butchery cut marks. *J. Archaeol. Sci.* 2009; 36(12):2643-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.07.017>.
11. Lyman RL. Vertebrate Taphonomy. Cambridge Manuals in Archaeology. Cambridge: Cambridge University Press; 1994.
12. Haglund WD, Reay DT, Swindler DR. Canid scavenging/disarticulation sequence of human remains in the Pacific Northwest. *J Forensic Sci.* 1989 my.; 34(3):587-606.
13. Klippel WE, Synstelien JA. 2007. Rodents as taphonomic agents: bone gnawing by brown rats and gray squirrels. *J Forensic Sci.* 2007 jul.; 52(4):765-73.
14. Shipman P. 1981. Life history of a fossil: an introduction to taphonomy and paleoecology. Cambridge: Harvard University Press; 1981.
15. Pokines JT, Ames CJH. Weathering and Dispersal of a Cattle (*Bos taurus*) Carcass in the Desert of Eastern. Jordan over a Six-Year Interval. *Journal of Taphonomy.* 2015; 13(1):17-31.
16. Lloveras LI, Rissech L, Rosado N. Tafonomía forense. En Sanabria-Medina C, editor Patología y antropología forense de la muerte: la investigación científico-judicial de la muerte y la tortura, desde las fosas clandestinas, hasta la audiencia pública. Bogotá, Colombia: Forensic Publisher; 2016. p. 453-523.
17. Bell LS, Skinner MF, Jones SJ. The speed of post-mortem change to the human skeleton and its taphonomic significance. *Forensic Sci Int.* 1996 sep.; 82(2):129-40.

18. Brain CK. *The Hunters or the Hunted?* Chicago: The University of Chicago Press; 1981.
19. Fiorillo AR. An introduction to the identification of trample marks. En: *Abstracts of the First International Conference on Bone Modification*. 1984 ag. 17-19; Carson City, Nevada: Center for the Study of Early Man; 1984. 38 p.
20. Behrensmeyer AK, Gordon KD, Yanagi G. Trampling as a cause of bone surface damage and pseudo-cutmarks. *Nature* 1986; 319(6056):768-71.
21. Olsen S, Shipman P. Surface modification on bone: trampling versus butchery. *J. Archaeol. Sci.* 1988 sep.; 15(5):535-553.
22. SSchwarcz HP, Agur K, Jantz LM. 2010. A new method for determination of post mortem interval: citrate content of bone. *J Forensic Sci.* 2010 nov.; 55(6):1516-22. doi: [10.1111/j.1556-4029.2010.01511.x](https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01511.x).
23. Capella A, Gibelli D, Muccino E, Scarpulla V, Cerutti E, Caruso V *et al.* The comparative performance of PMI estimation in skeletal remains by three methods (C-14, luminol test and OHI): analysis of 20 cases. *Int J Legal Med.* 2018 jul.; 132(4):1215-24. doi: [10.1007/s00414-015-1152-z](https://doi.org/10.1007/s00414-015-1152-z).
24. Gifford-González DP, Damrosch DB, Damrosch DR, Pryor J, Thunen RL. The third dimension in site structure: an experiment in trampling and vertical dispersal. *Am. Antiq.* 1985 oct.; 50(4):803-18. doi: [10.2307/280169](https://doi.org/10.2307/280169).
25. Nicholson RA. Bone survival: the effects of sedimentary abrasion and trampling on fresh and cooked bone. *International Journal of Osteoarchaeology* 1992 mzo.; 2(1):79-90. doi: <https://doi.org/10.1002/oa.1390020110>.
26. Cusimano AD. *Trampling modification: an actualistic study in taphonomy*. A university [Disertación]. [California]: California State University; 2015. 99 p.
27. Pokines JT, Symes SA, editores. *Manual of Forensic Taphonomy*. Londres: CRC Press; 2014.
28. Nasti A. A taphonomic approach to marine abrasion on human bones. *Forensic Res Criminol Int J.* 2017; 5(3):1-10. doi: [10.15406/frcij.2017.05.00154](https://doi.org/10.15406/frcij.2017.05.00154).

29. Nasti A. Temperatura acumulada diaria (ADD) y secuencia de desarticulación en la reconstrucción del intervalo *post-mortem* (IPM). Contribución a la tafonomía forense. Revista Argentina de Antropología Biológica. 21(1). Enero-Junio 2019 doi: [10.17139/raab.2019.0021.01.07](https://doi.org/10.17139/raab.2019.0021.01.07).
30. Ubelaker DH. *Perimortem* and *postmortem* modification of human bone. Lessons from forensic anthropology. L Anthropologie. 1991; 29(3):171-4.
31. Fiorillo AR. An experimental study of trampling: implications for the fossil record. En: Bonnichsen R, Sorg MH, editors. Bone modification. Orono, Estados Unidos: Center for the Study of the First Americans; 1989. p. 61-71.
32. Fiorillo AR. Pattern and Process in Bone Modification. L Anthropologie. 1991 en.; 29(3):157-61.
33. Blasco R, Rosell A, Peris J, Cáceres I, Vergés JM. A new element of trampling: an experimental application on the Level XII faunal record of Bolomor Cave (Valencia, Spain). J. Archaeol. Sci. 2008 jun.; 35(6):1605-18. doi: [10.1016/j.jas.2007.11.007](https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.11.007).
34. Nielsen AE. Trampling the archaeological record: an experimental study. Am. Antiq. 1991 jul.; 56(3):483-503. doi: [10.2307/280897](https://doi.org/10.2307/280897).
35. Gaudzinski-Windheuser S, Lutz Kindler A, Rivka Rabinovich C, Naama Goren-Inbar D. Testing heterogeneity in faunal assemblages from archaeological sites. Tumbling and trampling experiments at the Early-Middle Pleistocene site of Gesher Benot Ya'aqov (Israel) J. Archaeol. Sci. 2010 dic.; 37(12):3170-90. doi: [10.1016/j.jas.2010.07.018](https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.07.018).
36. Marín-Monfort MD, Pesquero MD, Fernández-Jalvo Y. Compressive marks from gravel substrate on vertebrate remains: a preliminary experimental study. Quaternary International. 2014 abr.; 330:118-125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.10.028>.
37. Littleton J. Taphonomic effects of erosion on deliberately buried bodies. J. Archaeol. Sci. 2000 en.; 27(1):5-18. doi: <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0436>.
38. Thompson CEL, Ball S, Thompson TJU, Gowland R. The abrasion of modern and archaeological bones by mobile sediments: the importance of transport modes. J. Archaeol. Sci. 2011; 38(4):784-93. doi: [10.1016/j.jas.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.11.001).
39. Andrews P. Experiments in Taphonomy. J. Archaeol. Sci. 1995 mzo.; 22(2):147-53. doi: <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0016>.

40. Bertola GR. Morfo dinámica de playas del Sudeste de la Provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Lat. Am. j. sedimentol. basin anal.* [internet]. 2006; 13(1):31-57. Disponible en: [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1851](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851).
41. Del Río L, Esain M, Bocanegra A, Zamora A, Müller M, Menna, M. Caracterización y Estado Ambiental de Mar de Las Pampas, Partido de Villa Gesell. Recursos, funciones, consistencias y amenazas en asentamientos urbanos sobre costas medanosas. Provincia de Buenos Aires, República Argentina: Centro de Estudios Mar del Plata. Universidad Tecnológica Nacional. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional; 2010. 104 p.
42. Bertola GR, Cortizo L. Transporte de arena en médanos litorales activos y colgados del sudeste de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 2005; 60(1):174-84.
43. Griffith CEL, Thompsona TJU, Thompson B, Gowland R. Experimental abrasion of water submerged bone: The influence of bombardment by different sediment classes on micro abrasion rate. *J. Archaeol. Sci.* 2016 dic; 10:15-29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.09.001>.
44. De Battista TJU, Thompson CEL, Thompson RL, Gowland A. A comparison of surface features on submerged and non-submerged bone using scanning electron microscopy. *Journal of Forensic and Legal Medicine.* 2013 ag.; 20(6):770-76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2013.03.037>.
45. Bertola GR. Taphonomic and ecological information from bone weathering. *Paleobiology* 1978; 4(2):150-62. doi: <https://doi.org/10.1017/S0094837300005820>.
46. Gifford DP, Behrensmeyer AK. Observed formation and burial of a recent human occupation site in Kenya. *Quaternary Research.* 1977 nov.; 8(3):245-66. doi: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(77\)90071-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(77)90071-0).
47. Hedges REM. 2002. Bone diagenesis: an overview of processes. *Archaeometry.* 2002; 44(3): 319-28.
48. Andrews P, Whybrow P. Taphonomic observations on a camel skeleton in a desert environment in Abu Dhabi. *Palaeontologia Electrónica.* 2005 en.; 8(1):1-17.
49. Beary MO, Lyman RL. The use of taphonomy in forensic anthropology: past trends and future prospects. En: Dirkmaat D, editor. *A companion to forensic anthropology.* Nueva Jersey, Estado Unidos: Blackwell Publishing; 2012. p. 499-527.

50. Gilbert WH, Richards D. Digital imaging of bone and toothmodification. The Anatomical Record. 2000 dic.; 261(6):237-46. doi: [https://doi.org/10.1002/1097-0185\(20001215\)261:6<237::AID-AR1006>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1097-0185(20001215)261:6<237::AID-AR1006>3.0.CO;2-N)
51. Borrini M. *et al.* Contextual taphonomy: Superficial bone alterations as contextual indicators. Journal of Biological Research-Bollettino della Società Italiana di Biologia Experimentale. 2012 nov.; 85(1):217-19. doi: [10.4081/jbr.2012.4115](https://doi.org/10.4081/jbr.2012.4115).