

Algunas reflexiones sobre el proceso de incorporación de CaCO_3 en los enterramientos en cal de la Edad del Hierro en las cuevas de las Islas Baleares

Mark VAN STRYDONCK¹ y Damià RAMIS²

¹ Royal Institute for Cultural Heritage. Bruselas, Bélgica. Email: marbolleke@telenet.be

² Investigador independiente.

Abstract

Lime burials are the archaeological remains of one of the most enigmatic burial rites in the Mediterranean Iron Age. They can be found in caves and rock shelters. Unlike other types of sites, they present unique challenges both in their appearance and in their methodology of excavation and analysis, which has made their study difficult. While early studies offered limited insight, recent advances in radiocarbon dating and petrographic analysis have begun to reveal important details about their chronology and ritual structure.

As a result of this, different theories are launched about the processes that are on the origin of these large packages of lime and bones. Most of these theories are no more than speculations and are in no way based on natural science research. Especially about the origin of the lime, there is a lot of speculation. Using the available data this article has tried to test the likelihood of the various theories. The way energy is transferred between the pyre, the body of the deceased and the limestone is one of the most crucial parameters in this study. The evaluation of this has shown that only the addition of finely ground limestone rock to the pyre can provide the observed effect.

Resumen

Los enterramientos en cal constituyen los restos arqueológicos de uno de los ritos funerarios más enigmáticos del Mediterráneo durante la Edad del Hierro. Pueden encontrarse en cuevas y abrigos rocosos. A diferencia de otros tipos de yacimientos, presentan desafíos únicos tanto en su aspecto como en su metodología de excavación y análisis, lo que ha dificultado su estudio. Si bien los primeros estudios ofrecieron una visión limitada, los avances recientes en la datación por radiocarbono y el análisis petrográfico han comenzado a revelar detalles importantes sobre su cronología y su estructura ritual.

Si bien se han formulado diferentes teorías sobre los procesos que han dado origen a estos grandes paquetes de cal y huesos, la mayoría de estas teorías no son más que especulaciones sin ninguna base en la investigación de las ciencias naturales. Especialmente, existe mucha especulación sobre el origen de la cal. Utilizando los datos disponibles, este artículo ha tratado de comprobar la verosimilitud de las diversas teorías. La forma en la que la energía se transfiere entre la pira, el cuerpo de los difuntos y la piedra caliza es uno de los parámetros más cruciales en este estudio. Su evaluación demuestra que solamente la incorporación de roca caliza finamente triturada puede proporcionar el efecto observado.

Van Strydonck, M. y Ramis, D. (2024): Algunas reflexiones sobre el proceso de incorporación de CaCO_3 a los enterramientos en cal de la Edad del Hierro en las cuevas de las Islas Baleares. Papers Soc. Espeleo. Balear, 7: 165-174. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear. **Rebut:** 23 octubre 2024; **Revisat:** 7 novembre 2024; **Acceptat:** 12 novembre 2024. **Publicat online:** 19 novembre 2024.

Introducció

Los llamados 'enterramientos en cal' de las islas de Mallorca y Menorca (archipiélago de las Islas Baleares) son los restos materiales de uno de los ritos funerarios más enigmáticos de la Edad del Hierro en el Mediterráneo. Prácticamente todos los yacimientos de estas características se encuentran en cuevas o en abrigos rocosos. Aunque los estudios recientes han revelado que este ritual de enterramiento era esencialmente una incineración (VAN STRYDONCK, 2020, y referencias incluidas), se ha prestado poca atención al origen de la cal, la forma de deposición y los procesos tafonómicos asociados. A pesar de ello, se han planteado toda una serie de hipótesis sobre la formación de estos enterramientos y los rituales involucrados. La mayoría de estas teorías son especulaciones que no se encuentran fundamentadas sobre la evidencia científica. Las diferentes hipótesis pueden reducirse a las siguientes diferencias esenciales que enumeramos a continuación. Algunos trabajos defienden que

los cuerpos humanos fueron cubiertos con cal viva elaborada expresamente con dicho propósito (en una especie de horno). Otros sugieren que los cuerpos fueron incinerados antes de que la cal viva fuera añadida. También se ha planteado que la cal cayó de la pared de la cueva debido al calor liberado por la pira o que la acción prolongada del calor puede haber provocado, en determinados casos, el ennegrecimiento, agrietamiento y exfoliación del techo de las cuevas. Existe además otra teoría que asume que se trata de una incineración ritual a la que se añadiría caliza en polvo. En cambio, según una variante de esta última, se colocarían bloques calcáreos sobre la pira y los cuerpos antes de prenderles fuego. Una de las teorías asume que la cal y el 'nivel negro' o *black layer*, presente de manera habitual inmediatamente bajo el nivel de cal, deben considerarse como una unidad (sincrónica) y son el resultado del mismo proceso de incineración (DEYÀ 2017, 2020a, y referencias incluidas). Uno de los problemas principales relativos a estas teorías es que son citadas, a menudo unas junto a otras, sin ninguna evaluación crítica, siendo consideradas con el mismo grado de credibilidad (e.g., COLL & CARBONELL, 2021).

Objetivo del estudio

Este estudio trata de evaluar la factibilidad de todas estas asunciones:

- ¿Se añadió la cal a la pira antes de ser encendida, en bloques o en polvo, y la transformación en cal viva se produjo durante la cremación?
- ¿Se preparó la cal viva con anterioridad y fue después añadida al enterramiento?
- ¿Es la cal viva en los enterramientos el resultado de la descomposición de la caliza de las paredes y el techo de la cueva durante el proceso de incineración (siendo una adición no intencionada)?
- ¿Existe una relación entre el denominado 'nivel negro' o *black layer* y el nivel de cal?

Para afrontar estos problemas, el presente trabajo explorará diferentes opciones y evaluará los cambios físicos de los materiales durante la cremación, así como la distribución y transferencia de la energía (calor) y el intercambio de carbono entre los diferentes componentes. Por desgracia, apenas existe información (pruebas de laboratorio o datos analíticos de los yacimientos arqueológicos) y deberemos trabajar con evidencias circunstanciales como son la transferencia de energía y carbono, las dataciones radiocarbónicas disponibles y la descripción de la localización de los yacimientos.

Transferencia de energía

Uno de los temas más importantes que deben ser tenidos en cuenta es el de la transferencia del calor (energía) desde la madera ardiendo en la pira a la atmósfera de la pira, la caliza (CaCO_3) y los objetos depositados.

Entre la pira, los cuerpos y los ajuares funerarios

El calor de la pira funeraria ardiendo se transmite a la atmósfera situada a su alrededor. El grado de alteración de los restos humanos y de los artefactos es un indicador de la energía (temperatura y duración) que se libera durante el ritual de cremación. Así que esta alteración nos informa del total de energía liberada durante la incineración.

En las circunstancias adecuadas, los fuegos de leña y carbón pueden liberar energía suficiente como para fundir el hierro ($>1.000^\circ\text{C}$). No obstante, es necesaria una estructura especial (un horno) para provocar un aporte suplementario de oxígeno que permita alcanzar y mantener esta temperatura. La situación es diferente en una pira, tal como se discutirá más abajo.

La mayoría de los huesos que aparecen en los enterramientos en cal son de color blanco pálido. No se conserva ningún componente orgánico y



Figura 1: El hueso de la izquierda es blanco en el exterior, pero su interior es negro. El hueso de la derecha es completamente blanco. Ambos huesos proceden del mismo contexto arqueológico de Son Matge (Valldemossa, Mallorca) (escala 1 cm).

Figure 1: The bone left is white on the outside but black on the inside. The bone on the right is completely white. Both bones come from the same archaeological unit at Son Matge (Valldemossa, Mallorca) (scale 1 cm).

Muestra	Código de laboratorio	Edad- ¹⁴ C (BP)	SF	Δ Edad- ¹⁴ C	C _{apatita} /peso total del hueso (‰)
Exterior del muro talayótico					
Valor de consenso de la datación de la cal		2.095 ± 25			
Marrón	KIA-44831	2.650 ± 25	3,8 ± 0,5	555 ± 35	7,8
Negro	KIA-44832	2.710 ± 25	4,1 ± 0,4	615 ± 35	7,1
Blanco	KIA-44830	3.155 ± 25	8,1 ± 1,4	1.060 ± 35	1,4
Localización 2200-2204					
Valor de consenso de la datación de la cal		2.525 ± 25			
Blanco	KIA-44322	2.995 ± 30	5,7 ± 1,5	470 ± 39	2,4
Negro/marrón	KIA-45045	2.490 ± 25	3,0 ± 0,9	-35 ± 35	7,2

Tabla 1: Relación entre la diferencia de la Edad-¹⁴C del hueso y el valor de consenso de la cal (Δ Edad-¹⁴C), la cantidad de carbono conservada en la apatita (C_{apatita}/peso total del hueso) y el factor SF. Las muestras proceden de dos áreas del abrigo de Son Matge.
 Table 1: Relation between the difference in ¹⁴C age between the bone and the consensus value of the lime (Δ ¹⁴C-age), the amount of carbon left in the apatite (C_{apatite}/total weight bone) and the SF factor. Samples from two areas within the Son Matge rock shelter.

los huesos presentan distorsiones irregulares debido al calor (VAN STRYDONCK, 2020). Todo ello indica que la temperatura de la cremación debe situarse alrededor de 750-800°C. Sin embargo, ninguno de los huesos muestra signos de vitrificación (HOEFKENS, 2004), así que puede descartarse una temperatura muy superior. De hecho, el interior de algunos de los huesos no es completamente blanco (Figura 1), indicando que la transmisión de energía fue limitada, que dicha transmisión ocurrió solamente durante un breve período o bien que su distribución fue irregular. Esta suposición queda corroborada por los valores SF de los huesos (Tabla 1, Figura 2).

El factor de recristalización (SF) obtenido mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) es una herramienta para medir el grado de recristalización (WRIGHT & SCHWARCZ,

1996; OLSEN et al., 2008). Los valores SF entre 2 y 2,9 representan un hueso no quemado, valores entre 3 y 4 un hueso quemado a baja temperatura y valores superiores a 4 una recristalización parcial. Los valores superiores a 7 indican una recristalización completa del hueso.

Estos resultados de la Tabla 1 (columna 4, SF) muestran la existencia de amplias diferencias en el grado de incineración. Esto implica que el calor de la atmósfera de la pira no se distribuye uniformemente. Este fenómeno se discutirá más adelante.

Este grado relativamente bajo de incineración de la mayoría de los huesos es corroborado por el grado de intensidad de la destrucción de los objetos del ajuar funerario por su exposición al fuego. Todos los elementos orgánicos que pudieran haber formado parte del ajuar se han consumido. Los objetos de hierro, sin embargo, se conservan intactos a pesar de la corrosión (Figura 3a). Es algo esperado, ya que la pira no podría haber alcanzado los 1.538°C del punto de fusión del hierro sin provocar la vitrificación de los huesos.

Los objetos de bronce también aparecen intactos en los enterramientos en cal (Figura 3b), aunque pueden observarse algunos cambios microscópicos (DEYÀ et al., 2024). El bronce funde a una temperatura de entre 900 y 950°C, dependiendo del tipo de aleación. Así pues, la temperatura de la pira debe haber sido inferior a los 900°C.

Pero, además, las cuentas de pasta vítrea también aparecen prácticamente intactas en los enterramientos en cal. Algunas se encuentran rotas o dañadas, pero ninguna ha sido derretida. El vidrio común comienza a ablandarse generalmente por encima de 570°C,

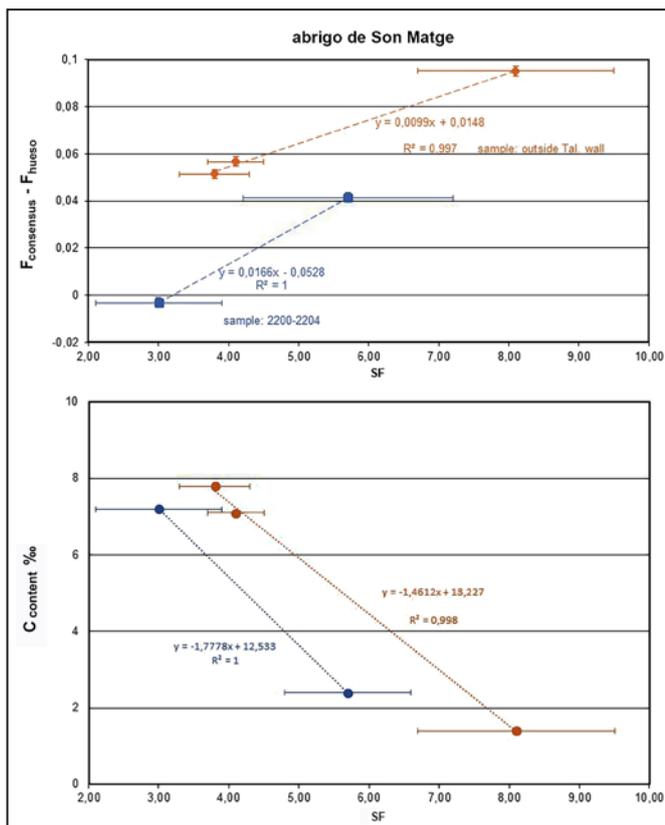


Figura 2: Relación entre la diferencia de la Edad-¹⁴C del hueso y el valor de consenso de la cal (Δ Edad-¹⁴C o F_{consensus}-F_{hueso}), la cantidad de carbono conservada en la bioapatita se expresa como la relación C_{apatita}/hueso (% por peso). Las muestras proceden de dos áreas del abrigo de Son Matge.

Figure 2: Relation between the difference in ¹⁴C age between the bone and the consensus value of the lime (Δ ¹⁴C-age or F_{consensus}-F_{bone}), the amount of carbon left in the bioapatite expressed as the ratio C_{apatite}/bone (% by weight). Samples from two areas within the Son Matge rock shelter.

dependiendo del tiempo que se mantenga a una cierta temperatura. Para fundir y deformar una cuenta de pasta de vidrio la temperatura necesaria es, al menos, de 650 a 700°C. Esta deformación puede observarse a menudo en cremaciones o incendios (Figura 4a), pero no en el caso de enterramientos en cal (Figura 4b).

No obstante, el estado físico de los materiales y sus condiciones de conservación deben interpretarse con precaución. En los enterramientos en cal aparecen objetos de fundición de plomo (Figura 5). El hecho de que estos elementos del ajuar funerario se hayan recuperado

intactos demuestran que nunca estuvieron en contacto con la pira porque el plomo funde a 327,5°C, muy por debajo de la temperatura alcanzada por la incineración. De hecho, aparecen a menudo lejos de los contextos de cal (WALDREN, 1982). Sin embargo, también hay ejemplos de placas de plomo parcial o completamente deformadas por el calor, formando amasijos de plomo (DEYÀ, 2020b). Así que las conclusiones sobre la transferencia de calor/energía solamente pueden basarse en aquellos objetos procedentes indudablemente del nivel de cal (Figura 6).

De este apartado puede concluirse que la energía liberada por la cremación no era muy elevada y que no se distribuía uniformemente, lo cual significa que la aportación de oxígeno era limitada o que el calor era absorbido preferentemente por otra sustancia, *in casu* la caliza. Este efecto difícilmente puede ser provocado por unos bloques de gran tamaño sobre la pira, porque la zona de contacto entre los cuerpos humanos situados sobre la pira y las rocas sería pequeña.

Figura 4: a) Cuentas de vidrio derretido del yacimiento de cremaciones del Bronce Final de Sierentz (Haut Rhin, France) (foto B. Gratuze) (PLOUIN et al., 2012; GRATUZE, com. pers.) (escala 0,1 cm). b) Las cuentas del enterramiento en cal de Son Matge (Valldemossa, Mallorca) se encuentran más corroídas que deformadas o derretidas. El calor de una pira puede provocar corrosión mediante la alteración de la estructura del vidrio y haciéndolo más susceptible a la corrosión. Algunos cristales tienden a ser químicamente muy frágiles y a menudo presentan síntomas de una corrosión muy acusada dependiendo del tipo de suelo en el que han sido enterrados. Estos dos factores, calor fragilizante y composición química, pueden explicar el estado de conservación de la cuenta. Las cuentas representadas en la imagen no se encuentran realmente deformadas, así que no estuvieron sometidas a una alta temperatura (escala 1 cm).

Figure 4: a) Melted glass pearls from the Final Bronze Age cremation site at Sierentz (Haut Rhin, France) (photo B. Gratuze) (PLOUIN et al. 2012; GRATUZE, pers. comm.) (scale 0,1 cm). b) The pearls from the Son Matge lime burial (Valldemossa, Mallorca) are more corroded than distorted or melted. The heat of a pyre can promote corrosion by altering the structure of the glass and making it more susceptible to corrosion. Certain glasses tend to be very fragile chemically and often exhibit very pronounced corrosion symptoms depending on the soil they are buried in. These two factors, embrittling heat and chemical composition could be at the origin of the state of the pearl. The depicted pearls do not appear really deformed, so they were not subjected to a high temperature (scale 1 cm).



Figura 3: Fragmentos de cal con un objeto de hierro (escala 10 cm) (a) y otros de bronce (escala 1 cm) (b), procedentes del abrigo de Son Matge (VAN STRYDONCK, 2020).
Figure 3: Fragments of the lime with an iron object (scale 10 cm) (a) and a bronze object (scale 1 cm) (b) from the Son Matge rock shelter (VAN STRYDONCK, 2020).

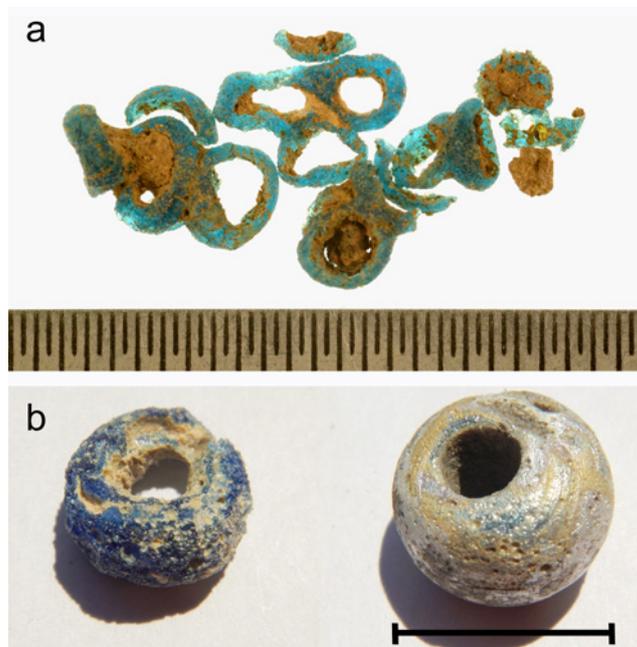




Figura 5: Objetos de plomo intactos (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (escala aprox. 10 cm) (a) y objetos de bronce fundidos (escala 1 cm), según DEYA (2020b) (b).
 Figure 5: Intact lead objects (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (scale aprox. 10 cm) (a) and melted lead objects after DEYA (2020b) (b).

Entre la pira y la caliza

La roca caliza se descompone en cal viva a alta temperatura de acuerdo con la reacción química: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Se trata de un fenómeno conocido por los habitantes de las Islas Baleares durante la Edad del Hierro, según KOPPER & ROSSELLÓ-BORDOY (1974). Se considera que la temperatura a la cual la caliza produce óxido de calcio es de 825°C, aunque la descomposición de la caliza depende de muchos factores como la densidad de la roca o el tamaño de los bloques. Esta temperatura es, de acuerdo con la discusión del apartado anterior, la máxima posible que se obtendría en la atmósfera de la pira.

Existe un ejemplo en Mallorca donde la pared de un edificio de fines de la Edad del Bronce se transformó en cal viva a causa de un incendio. Se trata del talayot de Son Oms, utilizado como granero, que sufrió un incendio

que convirtió parte de la roca caliza en cal viva (VAN STRYDONCK, 2020). La forma de un talayot circular se asemeja a la de un horno primitivo (Figura 7). El diámetro exterior en la base es algo mayor que en la parte superior y presenta una única abertura, un portal a nivel de suelo. Un incendio en el interior de un edificio de estas características crea un vacío parcial que provoca a su vez la entrada de aire (oxígeno) exterior, favoreciendo la combustión y la entrada de más oxígeno que permite alcanzar una temperatura muy alta. Al igual que en un horno, la temperatura alcanzada podría llegar a ser muy superior a la de un sistema al aire libre como una pira. Sin embargo, la caliza de una muestra tomada de este talayot todavía contenía un 19,2% de carbono mineral, una cantidad muy superior a la de la caliza de los enterramientos en cal. Esta última contiene entre <10% y 0% de carbono mineral (VAN STRYDONCK et al., 2020), evidenciando que la transferencia de calor (energía) de la pira a la roca caliza tiene que haber sido mucho más alta o más eficiente que en el caso de Son Oms. Es prácticamente imposible que haya sido mucho más alta porque un fuego al aire libre nunca genera la cantidad de calor que una estructura tipo horno.



Figura 6: Cuentas de vidrio incrustadas en la cal (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (escala 1 cm).
 Figure 6: Glass pearls embedded in the lime (Son Matge, Valldemossa, Mallorca) (scale 1 cm).

Pero si la roca caliza se tritura en pequeños fragmentos, el contacto de las superficies se incrementa exponencialmente, dando lugar a una transferencia de energía más eficiente, aunque por otra parte, disminuye la transferencia de energía entre la pira y los huesos y objetos del ajuar funerario. Ello explica también las amplias diferencias tanto en el factor SF como en los grados de incineración (Tabla 1). La gran variabilidad en la transferencia de energía (temperatura y tiempo de exposición) entre la pira ardiendo y los objetos situados sobre ella, tal como se ha tratado en el apartado anterior, solamente puede explicarse si el calor es bloqueado por algún nivel de material distribuido irregularmente en el interior o en la parte superior de la pira. Las pruebas de laboratorio han mostrado que el polvo de

caliza protege del calor a los cuerpos situados sobre la pira (VAN STRYDONCK, 2020, y referencias incluidas). Así pues, el grado de incineración depende, en parte, del grado de cobertura mediante el polvo de caliza. Este tipo de contacto tan intenso no puede alcanzarse con bloques calizos de tamaño relativamente grande situados sobre la pira.

La alta temperatura necesaria para descomponer el carbonato de la roca hace improbable que el calor de la pira, si ésta estuviera situada en el interior de una cueva (tal como se discutirá más adelante), pueda descomponer la caliza del techo y las paredes

de la cavidad. El techo de la mayoría de cuevas y abrigos se encuentra a varios metros sobre el nivel de suelo. Ello implica que los gases emitidos por la pira se habrían enfriado a una temperatura por debajo de 825°C antes de alcanzar el techo, imposibilitando que pudieran afectarlo. Incluso asumiendo que la temperatura cerca del techo de la cueva fuera lo suficientemente alta como para descomponer la cal, la suposición de que grandes bloques pudieran desprenderse del techo se contradice con la observación de la degradación de las paredes de los hornos de cal (Figura 8). La superficie de los bloques calizos de la pared de los hornos de cal es blanda y polvorienta, pero no se desprenden piedras (véase el horno de cal de Trebalúger, en VAN STRYDONCK, 2020).

Esto no impide, asumiendo que la ceremonia de cremación hubiera tenido lugar en el interior de la cueva, que el fuego pudiera haber dejado algunas marcas en sus techos y paredes. Pero el recubrimiento negro presente en los techos de algunas cuevas (DEYÀ et al., 2024), si no fue provocado por una actividad posterior en la cavidad, como depósito de contrabando o establo, demuestra que la temperatura ha descendido por debajo de los 400°C, la temperatura a la que todo el carbono se transforma en CO₂.

A causa del modo de transferencia del calor, la idea de que el ‘nivel negro’ inferior o *black layer* (VAN STRYDONCK, 2020) y el enterramiento en cal forman una única unidad (DEYÀ, 2017) presenta algunos defectos importantes. Si se trata de un único nivel, debe considerarse que no está alterado y que la incineración se llevó a cabo in situ. Sin embargo, el ‘nivel negro’ subyacente es el resultado de un incendio breve y apresurado (temperatura <400°C) (Figura 9).

La energía liberada no fue suficiente para eliminar el carbono orgánico de los huesos de ese estrato ni para provocar la aparición de los rasgos característicos de la cremación como el

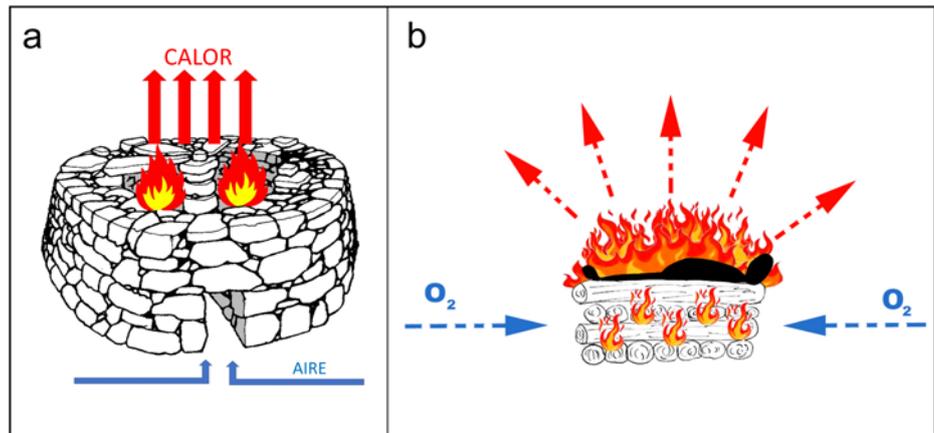


Figura 7: La forma de un talayot se asemeja a la de un horno primitivo (a). Una pira es una estructura mucho más abierta (b).
 Figure 7: The shape of a talayot resembles a primitive kiln (a). A pyre is a much more open structure (b).



Figura 8: Horno de cal de Trebalúger (Menorca) (a) y un detalle de la cara interior del muro (b).
 Figure 8: A lime kiln at Trebalúger (Menorca) (a) and a detail of the inner wall (b).



Figura 9: Hueso negro en el nivel oscuro situado bajo la capa de enterramientos en cal (a) (escala 1 cm), y detalle (b) (Cova de na Prior, Barranc de Binigaus, Menorca).
 Figure 9: Black bone in the dark layer under the lime burial (a) (scale 1 cm) and a detail (b) (Cova de Na Prior, Barranc de Binigaus, Menorca).

agrietamiento de los huesos (los huesos están quemados, pero no incinerados). Por tanto, no es posible que los huesos completamente incinerados aparezcan solamente en el nivel superior de cal, y no en la parte inferior donde habría tenido lugar la combustión. Además, en algunas partes del nivel de enterramientos en cal de Son Matge, probablemente en enterramientos tardíos, el ‘nivel negro’ no existe (WALDREN, 1982). Por último, es necesario mencionar que las dataciones radiocarbónicas han puesto de manifiesto que existe una diferencia cronológica significativa entre el ‘nivel negro’ y las muestras de cal y, a su vez, que el nivel de cal cubre un período de varios siglos –véase el ejemplo de Cova de na Prior (VAN STRYDONCK, 2020).

De este apartado puede concluirse que la energía liberada por la incineración no era suficiente para transformar grandes bloques de caliza o la pared de la cueva (si se asume que la pira funeraria se situó en su interior) en cal viva porque la energía disponible era muy baja. También es altamente improbable que el ‘nivel negro’ y el nivel de cal formen una misma unidad porque la temperatura alcanzada en el ‘nivel negro’ fue varios cientos de grados centígrados inferior a la del nivel de cal situado sobre el anterior.

Transferencia de carbono

Por un lado, los huesos pierden carbono (en forma de CO_2) con el medio ambiente durante la incineración. Por otro, los huesos absorben CO_2 de la atmósfera de la pira durante este proceso (véase HÜLS et al., 2010; VAN STRYDONCK, 2020, y referencias incluidas). De todas maneras, el balance de masa favorece la pérdida de carbono por encima de su absorción, dando lugar a una situación en la que habrá menos carbono en la apatita del hueso, pero relativamente más carbono de la atmósfera de la pira que el carbono original. Así que la cantidad de carbono conservado en un hueso quemado es un indicador del grado de incineración. La Figura 2b y la Tabla 1 muestran la relación entre los valores SF y la cantidad restante de carbono en la apatita del hueso de dos localizaciones diferentes en el yacimiento de Son Matge. Estos datos muestran claramente la relación inversa entre el factor SF y la cantidad conservada de carbono en los huesos.

Debido a que una parte importante del carbono de los huesos procede de la atmósfera de la pira, la edad aparente de los huesos incinerados depende no su propia cronología, sino también de manera importante del contenido radiocarbónico de la atmósfera de la pira. La Figura 2a y la Tabla 1 indican la relación entre el factor SF y la diferencia de edad entre el valor de consenso de la muestra basado en las fechas proporcionadas por la cal y por los huesos. Los resultados muestran claramente que, cuanto mejor incinerada está la muestra (mayor valor SF), más se desvía el resultado del valor de consenso. Esto implica que la apatita de los huesos absorbe carbono ‘antiguo’ de la atmósfera de la pira.

Se podría argumentar que la media del contenido de ^{14}C del CO_2 en la atmósfera de la pira es más antigua que los huesos a causa de la combustión de madera vieja o de grandes árboles, el denominado *old wood effect* o efecto madera vieja (OLSEN et al., 2013). No obstante, este planteamiento debe ser descartado porque las diferencias de edad son demasiado importantes en muchos casos. Por

ejemplo, los huesos de Sant Joan de Missa (Menorca), Son Gallard (Mallorca) y Son Matge (Mallorca) proporcionan edades anteriores en más de 1.000 años radiocarbónicos. Esto implica que la media de edad del ^{14}C del CO_2 de la atmósfera de la pira tendría una antigüedad superior a 1.000 años radiocarbónicos respecto a su edad real (VAN STRYDONCK, 2020), lo cual supondría que los árboles utilizados en la pira tendrían que ser mucho más antiguos; una situación irreal puesto que en un árbol predomina la madera de formación reciente sobre la madera antigua.

Dado que no hay otra fuente de carbono presente además del cadáver, la madera y la caliza, tan solo esta última es la única fuente posible de carbono muy antiguo. La caliza tenía que estar en estrecho contacto con los cuerpos (huesos) sobre la pira, porque de lo contrario el carbono (de la caliza) no podría haber formado parte de la atmósfera de la pira. Incluso omitiendo las limitaciones del apartado 'Transferencia de energía entre la pira y la caliza', y aceptando que la pira estaba situada en el interior de la cueva (ver más abajo) y que el calor era suficientemente intenso para descomponer la caliza de las paredes o el techo de la cavidad, tampoco así el CO_2 antiguo podría incorporarse a la biopatita debido a la circulación de gases alrededor de la pira, tal como se representa en la Figura 10.

De este apartado puede concluirse que existe un intercambio de carbono fósil entre los huesos y la atmósfera de la pira. En dicha atmósfera, el carbono fósil solamente puede proceder de la caliza en contacto intenso con el cuerpo situado sobre la pira y no de la pared o el techo de la cueva ya que, en ese caso, la edad del ^{14}C del hueso reflejaría la edad del ^{14}C de la madera de la pira. Además, es imposible que la cal viva fuera elaborada en un horno, separadamente de la cremación, y añadido posteriormente como CaO porque sería imposible la incorporación de carbono antiguo (de la caliza) a la apatita del hueso.

Información deducida de las características del yacimiento

En ningún caso se han podido documentar con seguridad los restos de una pira. No es algo tan extraño como pueda parecer si se consideran los enterramientos en cal como un fenómeno derivado de los rituales de cremación propios de la Edad del Bronce y la Edad del Hierro. En las incineraciones fenicias de Eivissa no aparece carbón y prácticamente no se han podido documentar restos de las piras de cremación en los yacimientos funerarios de la Europa continental (DE MULDER, 2020). La ausencia prácticamente absoluta de carbón (excepto algunos fragmentos y las lentes de cenizas de Son Matge) en la cal hace poco probable que las ubicaciones de la pira y del enterramiento en cal estuvieran situadas en el mismo punto. Esta afirmación concuerda con la tradición de la Europa continental de la Edad del Bronce y la Edad del Hierro, donde los huesos incinerados (a veces con carbones y otras veces sin ellos) eran depositados en urnas y en paquetes de huesos en los yacimientos

Figura 10: Si se asume –contra todo pronóstico– que el fuego de la pira es suficientemente intenso para descomponer la roca caliza, la cal viva (CaO) caería sobre la pira, pero el CO_2 sería arrastrado debido a la circulación de los gases alrededor de la pira, imposibilitando la incorporación de carbono antiguo a la apatita del hueso. Leyenda: (1) la pira absorbe aire fresco a causa del calor; (2) el calor de la combustión se eleva con la corriente de gas; (3) el CO_2 de la corriente de gas procede de la combustión del cuerpo pero, sobre todo, de la madera de la pira; (4) el calor provoca la descomposición del CaCO_3 de la cueva en CaO que cae sobre la pira liberando CO_2 ; (5) debido a la circulación ascendente de los gases de la combustión, el CO_2 fósil procedente de la descomposición de la roca no puede entrar en contacto con los huesos situados sobre la pira.

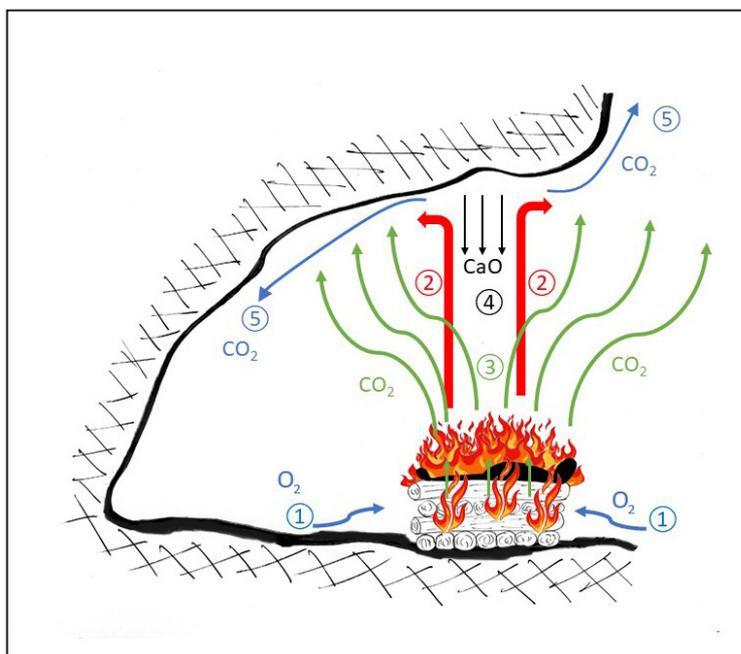


Figure 10: If it is assumed – against all odds – that the heat of the pyre is intense enough to decompose the limestone, quicklime (CaO) would fall on the pyre but the CO_2 is blown away due to the circulation of the gasses around the pyre, making it impossible for old carbon to become incorporated in the bone apatite. Legend: 1) due to the heat fresh air is sucked in; 2) heat from the combustion goes up with the gas stream; 3) in the gas stream CO_2 is present from the combustion of the body but mostly from the wood of the pyre; 4) due to the heat the CaCO_3 from the cave is decomposed into CaO that falls on the pyre and CO_2 is released; 5) due to the forced flow of the combustion gases the fossil CO_2 from the decomposing rock cannot come into contact with the bones on the pyre.

funerarios (DE MULDER et al., 2009). De acuerdo con esta analogía, es teóricamente posible que la cal y los huesos (que no pesarían más de unos pocos kg conjuntamente) fueran empaquetados en un contenedor de material perecedero, como una tela, y transportados al lugar de enterramiento.

A pesar de que, en el caso de grandes abrigos rocosos, como Son Matge, sería muy factible que la pira estuviera situada en este punto, en otros casos sería imposible, como en la Cova de sa Cometa des Morts I, una cueva que no llega a 1 m de amplitud durante gran parte de su recorrido (VENY, 1968). Esta cavidad es tan pequeña que las personas encargadas del rito de cremación se habrían ahogado por el humo de la pira.

La mayoría de los enterramientos en cal viva se encuentran en cuevas y abrigos, pero también aparecen ocasionalmente en lugares inesperados. Con toda probabilidad, de acuerdo con PIGA et al. (2010), la cámara A de s'illot des Porros (Santa Margalida, Mallorca) contenía enterramientos en cal (Figura 11). Aunque no se identificó como tal durante su excavación, la descripción se ajusta perfectamente a la de un enterramiento en cal (HERNÁNDEZ-GASCH & SANMARTÍ, 1998; PIGA et al., 2010). Existe un conjunto de dataciones radiocarbónicas de este yacimiento, pero ninguna de ellas corresponde a los enterramientos en cal (HERNÁNDEZ-GASCH & SANMARTÍ, 2020). S'illot des Porros supone una complicación de la situación. Pueden considerarse dos opciones principales: (1) la cremación se realizó en tierra firme y los restos fueron trasladados al islote o (2) los cadáveres, la madera para la pira y, probablemente, también la caliza, tuvieron que ser transportados al islote. La segunda opción supone un proceso mucho más complicado.



Figura 11: Hueso con cal de S'illot des Porros (escala 1 cm) (Santa Margalida, Mallorca).
Figure 11: Bone with lime from S'illot des Porros (scale 1 cm) (Santa Margalida, Mallorca).

Conclusiones

Existen muy pocos datos analíticos disponibles en relación al ritual funerario que originó el fenómeno de los enterramientos en cal. Como consecuencia, las interpretaciones solamente pueden ser extraídas a partir de las evidencias circunstanciales proporcionadas por los restos arqueológicos, manteniendo un amplio grado de incertidumbre en las conclusiones.

No obstante, los restos arqueológicos procedentes de la cal demuestran perfectamente que la transferencia de energía entre la pira y su entorno fue limitada; tan sólo lo necesario para incinerar los huesos y transformar el carbonato de calcio en cal viva, a menudo de manera incompleta (tanto en la incineración de los huesos como en la descomposición de la caliza). Esta limitada transferencia de energía hace improbable que la transformación en cal viva se realizara a partir de grandes bloques de caliza (de varios cm³) o incluso de las paredes o el suelo de la cueva. Ello no excluye la posibilidad de

una degradación puntual de la roca cercana a la pira, si se asume que la pira estaba situada en el interior de la cueva.

La circulación de los gases en la atmósfera de la pira hace que la transferencia de carbono fósil a los huesos solamente fuera posible con un contacto intenso entre los cadáveres y la caliza de la pira.

Las fechas radiocarbónicas, así como el grado de combustión de los huesos, en el 'nivel negro' permiten descartar que este estrato forme una única unidad con el nivel de cal situado sobre él.

No queda claro dónde tuvo lugar el ritual de incineración. En algunos casos es posible que se celebrara muy cerca del lugar de enterramiento, pero esto es improbable en otros yacimientos.

Bibliografia

- COLL, M. & CARBONELL, S. (2021): Where are the Postalaitic children? Una aproximación a los enterramientos infantiles en Mallorca y Menorca durante la segunda edad del hierro. *Sardinia, Corsica et Baleares Antiquae*, 19: 69-93. Roma.
- DE MULDER, G.; VAN STRYDONCK, M. & BOUDIN, M. (2009): The impact of cremated bone dating on the archaeological chronology of the Low Countries. *Radiocarbon*, 51 (2): 579–600. Tucson.
- DEYÀ, J. (2017): Coves forn? Noves reflexions entorn al ritu de la calç a Mallorca. In: ANGLADA, M.; RIERA, M. & MARTÍNEZ, A. (coord.) *VII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Maó, 30 de setembre i 1 i 2 d'octubre de 2016)*. Consell Insular de Menorca: 411- 420. Maó.
- DEYÀ, J. (2020a): Resultats preliminars de la intervenció en enterraments en calç a la Cova de S'Alova (Sóller). In: HERNÁNDEZ-GASCH, J.; RIVAS ANTEQUERA, M.J. & RIVAS LLOMPART, M. (coord.) *VIII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Alcúdia, 11,12 i 13 d'octubre de 2018)*. Departament de Cultura, Patrimoni i Esports del Consell Insular de Mallorca: 175-186. Palma.
- DEYÀ, J. (2020b): Relació i dispersió de les plaquetes de plom mallorquines del Postalaiòtic. In: HERNÁNDEZ-GASCH, J.; RIVAS ANTEQUERA, M.J. & RIVAS LLOMPART, M. (coord.): *VIII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (Alcúdia, 11,12 i 13 d'octubre de 2018)*. Departament de Cultura, Patrimoni i Esports del Consell Insular de Mallorca: 213-222. Palma.
- DEYÀ, J.; ARAMBURU, J. & DE MULDER, G. (2024): La necrópolis talayòtica de la Cova des Robiols (Puigpunyent) y el origen de los enterramientos en cal en Mallorca. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 7: 67-82. Palma.
- GRATUZE, B.; KOENIG, M.-P.; PLOUIN, S. & TREFFORT, J.-M. (2013): Les perles en faïence et en verre de l'âge du Bronze: contexte archéologiques et analyses pour l'Alsace et la Lorraine. *Cahiers alsaciens d'Archéologie d'art et d'Histoire*, 56: 21-52. Estrasburgo.
- HERNÁNDEZ-GASCH, J. & SANMARTÍ, J. (1998): La necrópoli Talaiòtica de s' illot des Porros. *Pyrenae*, 29: 69-95. Barcelona.
- HERNÁNDEZ-GASCH, J. & SANMARTÍ, J. (2020): Contextualització de datacions radiocarbòniques, estratigrafia i fases cronològiques del jaciment de les edats del bronze i del ferro de s'Illa des Porros (Santa Margalida, Mallorca). *Materialidades*, 6: 61-97. Palma.
- HOEFKENS, M. (2004): *Onderzoek naar de dateerbaarheid van gecremeerde botten met ¹⁴C*. Tesis para el grado y diploma de Ingeniero Industrial. Instituto De Nayer. Sint-Katelijne-Waver.
- HÜLS, C.M.; ERLLENKEUSER, H.; NADEAU, M.-J.; GROOTES, P.M. & ANDRESEN, N. (2010): Experimental Study on the Origin of Cremated Bone Apatite Carbon. *Radiocarbon*, 52(2): 587-599. Cambridge.
- KOPPER, J.S. & ROSSELLO-BORDOY, G. (1974). Megalithic quarrying techniques and limestone technology in Eastern Spain. *Journal of Field Archaeology*, 1: 161-170. Boston.
- OLSEN, J.; HEINEMEIER, J.; BENNIKE, P.; KRAUSE, C.; HORNSTRUP, K.M. & THRANE, H. (2008): Characterisation and blind testing of radiocarbon dating of cremated bone. *Journal of Archaeological Science*, 35(3): 791-800. Amsterdam.
- OLSEN, J.; HEINEMEIER, J.; HORNSTRUP, K.M.; BENNIKE, P. & THRANE, H. (2013): 'Old wood' effect in radiocarbon dating of prehistoric cremated bones? *Journal of Archaeological Science*, 40: 30-34. Amsterdam.
- PIGA, G.; HERNÁNDEZ-GASCH, J.; MALGOSA, A.; GANADU, M.L. & ENZO, S. (2010): Cremation practices coexisting at the S'Illot des Porros Necropolis during the Second Iron Age in the Balearic Islands (Spain). *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 61: 440-452. Amsterdam.
- PLOUIN, S.; KOENIG, M.-P. & GRATUZE, B. (2012): Les perles en verre de l'âge du Bronze d'Alsace et de Lorraine. In: CABART, H. (dir.) *Le Verre en Lorraine et dans les régions voisines*. Actes du colloque de l'AFAV, Metz, 18 et 19 novembre 2011. Monographies Instrumentum, 42: 11-36. Montagnac.
- VAN STRYDONCK, M. (2020): *45 años de investigación físico-química sobre los enterramientos en cal de Menorca y Mallorca 1975-2020*. Consell Insular de Menorca / Royal Institute for Cultural Heritage. Lovaina.
- VENY, C. (1968): *Las cuevas sepulcrales del Bronce Antiguo de Mallorca*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Bibliotheca Praehistorica Hispana, 9. Madrid.
- WALDREN, W.H. (1982): *Balearic Prehistoric Ecology and Culture. The Excavation and Study of Certain Caves, Rock Shelters and Settlements*. Archaeopress. British Archaeological Reports, International Series, 149(1). Oxford.
- WRIGHT, L.E. & SCHWARCZ, H.P. (1996): Infrared and isotopic evidence for diagenesis of bone apatite at Dos Pilas, Guatemala: palaeodietary implications. *Journal of Archaeological Science*, 23: 933-944. Amsterdam.



Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>