

**“ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS EN
MATERIALES QUEMADOS PREHISTÓRICOS DE
LA PENÍNSULA IBÉRICA. APLICACIONES
GEOCRONOLÓGICAS Y GEOARQUEOLÓGICAS”**

Tesis doctoral

2020

Ángela Herrejón Lagunilla

Directores:

Dr. Juan José Villalaín Santamaría

Dr. Ángel Carrancho Alonso



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**



UNIVERSIDAD
DE BURGOS

Juan José Villaláin Santamaría, Catedrático de Escuela Universitaria adscrito al Departamento de Física de la Universidad de Burgos, y Ángel Carrancho Alonso, contratado doctor adscrito al Departamento de Historia, Geografía y Comunicación de la Universidad de Burgos

HACEN CONSTAR

que la presente tesis doctoral, titulada "*Estudios arqueomagnéticos en materiales quemados prehistóricos de la península ibérica. Aplicaciones geocronológicas y geoarqueológicas*" ha sido realizada bajo su dirección y supervisión, cumpliendo las condiciones necesarias para que Ángela Herrejón Lagunilla pueda optar al grado de Doctor en el programa de doctorado de "Evolución humana, Paleoecología del Cuaternario y Técnicas Geofísicas Aplicadas en la Investigación" de la Universidad, con opción a la mención de "Doctor Internacional".

Para que así conste, firmamos el presente documento en Burgos a 23 de julio de 2020.

VºBº: Juan José Villaláin Santamaría

VºBº: Ángel Carrancho Alonso

A mi madre y mi padre

“Mis padres no eran científicos. No sabían casi nada de ciencia. Pero, al introducirme simultáneamente en el escepticismo y lo asombroso, me enseñaron los dos modos de pensamiento difícilmente compaginables que son la base del método científico. Su situación económica no superaba en mucho el nivel de pobreza. Pero cuando anuncié que quería ser astrónomo recibí un apoyo incondicional, a pesar de que ellos (como yo) sólo tenían una idea rudimentaria de lo que hace un astrónomo. Nunca me sugirieron que a lo mejor sería más oportuno que me hiciera médico o abogado.”

CARL SAGAN, *El Mundo y sus demonios*

“[378]

Las disciplinas del conocimiento crecen por sus costuras, es decir, por interdisciplinariedad.”

JORGE WAGENSBERG, *Sólo se puede tener fe en la duda*

“[380]

Nada hay más interdisciplinario que la propia realidad.”

JORGE WAGENSBERG, *Sólo se puede tener fe en la duda*

“No se me había dado el camino, pero sí la revelación.”

JUAN GIL ALBERT, *Memorabilia*

Agradecimientos

Esta tesis no estaría totalmente completa sin los agradecimientos. Este camino lo he hecho acompañada, rodeada (desde cerca o desde la distancia) de personas que han contribuido a que hoy esté aquí. Por ello, quiero darles las gracias en las siguientes líneas.

En primer lugar, he de dar las gracias a mis directores de tesis, Juanjo y Ángel, quienes han sido maestros, pero también compañeros en este viaje. ¡He aprendido tanto de vosotros! Cada vez que he llamado a vuestra puerta habéis estado dispuestos a ayudarme, y siempre lo habéis hecho con la humildad de las personas que son grandes de verdad. Agradezco vuestra comprensión y vuestro apoyo incluso cuando no pasabais por vuestros mejores momentos. En definitiva, gracias, Ángel y Juanjo, por vuestra generosidad, vuestra honestidad y vuestra integridad. No sé si lo habré demostrado lo suficiente, pero os aprecio y os admiro. Gracias por compartir conmigo vuestro saber y vuestro tiempo. Espero haber estado a la altura.

No puedo pasar sin dar gracias también a mis compañeras y compañeros del grupo de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos: Sara Torres López, Pablo Calvín Ballester, Manuel Calvo Rathert, María Felicidad Bógalo, Elisa Sánchez Moreno, Natalia García Redondo, Irene Falcón, Balazs Brâdak, Ángela Jiménez Sanz, Isabel Blanco. Juntos hemos compartido debates a la hora de comer, muestreos, horas de laboratorio y horas de *pajareo*, congresos (incluyendo pérdidas y olvidos de diversos enseres), esperas en aeropuertos, viajes maratonianos en coche, rodajes de documentales, cumpleaños, quedadas en Los Enchilao... ¡Y hasta una boda! Me habéis ayudado a crecer como investigadora pero también como persona.

También quiero dar las gracias a mis compañeros/as Isabel Gómez, Arancha, Iván, Alfonso, Fernando y Marta Francés. Y, ¡cómo no!, gracias a Avto Goguichaishvili. Hemos coincidido poco en estos años, pero todavía te debo una por aquel póster de hace unos años... ¡Espero que algún día podamos vernos por Georgia o México!

I want to give special thanks to Mark Dekkers for accepting me to carry out an internship at the Paleomagnetic Laboratory Fort Hoofddijk (Utrecht Universiteit). It was a privilege and I learnt a lot of things during my stay! Thanks for your patience, your hospitality and your kindness. Thanks are also given to Maxim, Bertwin, Woult, Cor, Annicka and the other colleagues from the lab for their help and availability.

Je remercie Philippe Lanos pour sa supervision lors de mon séjour à Rennes. J'ai beaucoup appris sur la modélisation chronologique, mais aussi sur l'incroyable Bretagne. Ce fut une chance de pouvoir faire ce séjour. ¡Merci beaucoup! Je remercie également Philippe Dufresne, Annick Chauvin, Pierrick Roperch et mes collègues du cours de modélisation et du Geosciences Rennes leur aide et leur gentillesse. Gracias a Manuela Durán por contribuir a que mi estancia en Rennes fuese aún mejor (¡y gracias también a Puy Ayarza por ponernos en contacto!). Me alegro mucho de que hayas entrado en la secta paleomagnética. Espero que sigamos coincidiendo por los mundos de la ciencia.

Por supuesto, he de dar un agradecimiento muy especial a Francisco Javier Pavón Carrasco por su colaboración para desarrollar algunas partes de la tesis. Siempre accesible, amable y generoso, he tenido la gran suerte de poder aprender muchas cosas gracias a ti. ¡Muchísimas gracias!

Merecen también un gran agradecimiento Bertila Galván, Carolina Mallol y Cristo Manuel Hernández. ¡Cuánto he aprendido gracias a vosotros! ¡Y cuánto me habéis cuidado! Habéis tenido un papel muy importante en mi formación, pero también en mi vocación. Siempre me habéis hecho sentir valorada y apreciada, y os guardo un cariño muy grande. No puedo sino deciros gracias, gracias y gracias por permitirme involucrarme en El Salt. Por supuesto, también quiero agradecer a Álex, Mariel, Jorge, Ágata, Sven, las Lauras, Leo, Santi, María, Aitor, Jared, Anthony, Natalia, Gloria, Fernando, Richard, Lucia, Rory, Sam y todos los demás compañeros de El Salt el buen trato que siempre me dieron y todo lo que me han enseñado. Todavía recuerdo el primer día que llegué a Villa Vicenta, y todavía recuerdo qué rápido me hicisteis sentir como en casa. Entre todos habéis hecho que El Salt sea algo más que un yacimiento en el que trabajar.

No me olvido de ti, Ana Fagoaga, pero es que tú mereces agradecimiento especial. En parte eres “culpable” de que haya llegado hasta aquí. Hemos ido recorriendo camino casi a la par, y aunque estemos lejos, te tengo muy presente. ¡Gracias, amiga!

Durante el desarrollo de este trabajo, he tenido la suerte de poder trabajar también en otros yacimientos excepcionales, y eso ha sido posible gracias a sus respectivos equipos investigadores. Es por ello que me gustaría agradecer enormemente a Josep Maria Vergès el haber podido trabajar en El Mirador, un sitio tan especial, y además germen de algunos estudios previos que sentaron bases para el presente trabajo. Gracias por tu amabilidad y tu disponibilidad. También quiero dar gracias a Javier Fernández Eraso por facilitarnos el acceso a los materiales del abrigo de San Cristóbal y por ayudarnos a ponerlos en contexto. Igualmente, quiero agradecer a Ana Polo su colaboración. Mis agradecimientos se extienden también a Cristina Vega y Eduardo Carmona, quienes me permitieron acceder a los materiales del abrigo de La Castañera.

He de dar gracias también a José Miguel Carretero y a Manuel Ramón Gonzáles Morales por darme su apoyo cuando, al poco de comenzar a seguir este camino de la ciencia, me puse a buscar financiación. Aunque no hubo suerte aquella vez, no me olvido de vuestro gesto y os lo agradezco enormemente.

Por otro lado, quiero agradecer a Marina Martín Albaladejo y Gizéh Rangel de Lázaro por darme su amistad y su apoyo durante estos años. Con buena compañía, los momentos malos se hacen menos malos, y los buenos, mejores. Gracias, amigas.

Quiero dar las gracias también a mi abuela Nina. Sé que te cuesta entender qué son estas cosas tan raras que hago, pero aun así siempre me has apoyado y ayudado cuando lo he necesitado. Gracias por todo, abuela.

Como no podía ser de otra manera, quiero dar gracias a mis padres por confiar en mí y arroparme siempre. Cada vez que me pasaron la lección antes de un examen, con cada

viaje a la universidad, con cada esfuerzo que hicieron para que yo pudiera continuar formándome en Burgos, con su apoyo y cariño incondicionales, pusieron su voto de confianza en mí y fueron sentando las bases para que hoy esté donde estoy. Su ilusión puesta en mí no ha hecho sino alimentar aún más la mía. Gracias por darme la oportunidad de seguir este camino que me apasiona y que me ha permitido aprender tanto. Cualesquiera que sean las palabras que escoja, no van a ser suficientes para expresar todo mi agradecimiento. Esta tesis está dedicada a vosotros y, en realidad, es un poco vuestra también.

Por último, pero no por ello menos importante, me gustaría dar un agradecimiento especial a Miguel. Sé que a veces puedo ser un poco complicada (y ni te cuento cuanto tienes que acabar una tesis encerrada en casa y lejos de tus seres queridos por culpa de una pandemia mundial...). Pero, aun así, sigues ahí, al pie del cañón. Gracias por tu generosidad, tu paciencia y tu cariño.

Ahora que escribo estas líneas finales, me doy cuenta de que, después de un largo camino, he llegado a Ítaca...

*Ten siempre a Ítaca en tu mente.
Llegar allí es tu destino.
Mas no apresures nunca el viaje.
Mejor que dure muchos años
y atracar, viejo ya, en la isla,
enriquecido de cuanto ganaste en el camino
sin aguantar a que Ítaca te enriquezca.
Ítaca te brindó tan hermoso viaje.
Sin ella no habrías emprendido el camino.
Pero no tiene ya nada que darte.
Aunque la halles pobre, Ítaca no te ha engañado.
Así, sabio como te has vuelto, con tanta experiencia,
entenderás ya qué significan las Ítacas.*

CONSTANTINO P. CAVAFIS, Ítaca

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a una ayuda destinada a financiar la contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciadas por el Fondo Social Europeo (orden EDU/310/2015, de 10 de abril).

Las estancias en Géosciences-Rennes (Université Rennes 1) y en el Paleomagnetic Laboratory Fort Hoofddijk (Universiteit Utrecht) han sido posibles gracias a las ayudas para movilidad de alumnos de doctorado de la Universidad de Burgos (2018 y 2019).

Los fuegos experimentales fueron desarrollados en el marco del proyecto *Neanderthal Fire Technology*, financiado por The Leakey Foundation.

Adicionalmente, se ha contado con el apoyo de los proyectos HAR2015-68321-P y CGL2016-77560 del Ministerio de Economía y Competitividad-Fondo Europeo de Desarrollo Regional y el proyecto BU235P18 de la Junta de Castilla y León- Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Índice

Resumen.....	1
Abstract	5
1. Introducción.....	9
1.1. Antecedentes y estado de la cuestión	11
1.2. Objetivos.....	16
a) <i>Cuestiones de interés geoarqueológico:</i>	16
b) <i>Cuestiones de interés geocronológico:</i>	17
1.3. Organización de la tesis	18
2. Fundamentos.....	21
2.1 El campo magnético terrestre: origen y geometría.....	23
2.2. Variaciones en el campo magnético terrestre: inversiones de polaridad, excursiones geomagnéticas y variación secular.	25
2.2.1. Inversiones de polaridad	25
2.2.2. Excursiones geomagnéticas.....	27
2.2.3. Variación secular	27
2.3. El registro del campo magnético terrestre en el pasado.....	28
2.3.1. Diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo.....	28
2.3.2. Teoría de Néel y dominios magnéticos.	31
2.3.3. Mecanismos de registro de la magnetización remanente en los materiales arqueológicos quemados	34
3. Metodología.....	39
3.1 Trabajo de campo	41
3.2. Trabajo de laboratorio	44
3.2.1. Preparación de muestras	44
3.2.1.1. Muestras extraídas con dispositivo de materiales blandos	44
3.2.1.2. Bloques de mano.....	44
3.2.1.3. Muestra suelta.....	46
3.2.2. Análisis paleomagnéticos	47
3.2.3. Estudio de las propiedades magnéticas.....	50
3.2.3.1. Susceptibilidad magnética	50
3.2.3.2. Anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM)	51
3.2.3.3. Adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM) y curvas de backfield	54

3.2.3.4. Anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (ARM).....	56
3.2.3.5. Ciclos de histéresis.....	58
3.2.3.6. Curvas termomagnéticas.....	60
4. Materiales de estudio e hipótesis de trabajo	61
4.1. Las estructuras de combustión prehistóricas: características y tipos.....	63
4.2. Recreaciones experimentales del proyecto “Neanderthal Fire Technology”	65
4.2.1. Descripción de las estructuras.....	67
4.2.2. Observaciones tafonómicas	71
4.2.3. Observaciones durante la excavación	73
4.2.4. Materiales estudiados de los hogares experimentales	74
4.3. Estructuras de combustión del Paleolítico medio de El Salt	75
4.3.1. Estudios previos en la unidad X de El Salt	79
4.3.2. Arqueomagnetismo aplicado a la disección de palimpsestos: hipótesis de trabajo.....	83
4.3.3. Materiales estudiados de la unidad X de El Salt	85
4.3.4. Contribuciones a la identificación de materiales potencialmente quemados	87
4.4. Episodios de combustión antrópicos holocenos en cueva: depósitos de <i>fumiers</i>	89
4.4.1. Abrigo de La Castañera.....	90
4.4.2. Cueva de El Mirador.....	93
4.4.3. Abrigo de San Cristóbal	96
4.4.4. Cueva del Estillín	99
5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales con 2 y 5 años de antigüedad	105
5.1. Resultados de propiedades magnéticas.....	108
5.1.1. Materiales no quemados.....	108
5.1.2. Materiales quemados	112
5.2. Análisis paleomagnéticos.....	116
5.2.1. Materiales no quemados	116
5.2.2. Materiales quemados	117
5.3. Discusión.....	123
5.3.1. La influencia del sustrato original en el registro arqueomagnético	123
5.3.2. Variación del registro magnético debido al impacto térmico.....	124
5.3.3. Los efectos de los procesos tafonómicos en la señal magnética.....	126

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio mediante análisis arqueomagnéticos: el caso de la unidad X de El Salt 129

6.1. Resultados de propiedades magnéticas.....	132
6.2. Análisis paleomagnéticos.....	138
6.3. Detección de diacronías y temporalización de ocupaciones.....	144
6.4. Discusión.....	157
6.4.1. Las diferencias en el registro arqueomagnético en las distintas facies quemadas.....	157
6.4.2. El comportamiento de las curvas termomagnéticas de los materiales no quemados a baja temperatura.....	159
6.4.3. La estabilidad del registro direccional.....	161
6.4.4. Implicaciones arqueológicas de la temporalización de ocupaciones de la unidad X.....	163
6.4.5. Una nueva metodología para el estudio de palimpsestos arqueológicos.....	167

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas..... 171

7.1. Conjunto P2A.....	174
7.2. Conjunto P2B.....	182
7.3. Discusión.....	189
7.3.1. Mineralogía magnética.....	189
7.3.2. Evidencias de posibles materiales quemados en los conjuntos P2A y P2B.....	190

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*: actualización de la curva de variación secular en Iberia durante la Prehistoria reciente. 199

8.1. Propiedades magnéticas.....	201
8.2. Análisis paleomagnéticos.....	219
8.3. Calidad de las direcciones arqueomagnéticas y selección de datos.....	223
8.4. La variación secular en Iberia antes del año 1000 a.C.	232
8.4.1. Base de datos.....	232
8.4.2. Generación de la nueva curva de variación secular.....	235
8.5. Discusión.....	237
8.5.1. Comparativa de propiedades magnéticas en secuencias de <i>fumiers</i>	237
8.5.2. El comportamiento de la variación secular en Iberia entre el 1000 a.C. y el 6000 a.C.....	240

8.5.3. El potencial arqueomagnético de las secuencias de fumiers: límites y posibilidades	244
9. Discusión general	247
9.1. El registro arqueomagnético de los materiales prehistóricos quemados: cuestiones interpretativas.....	249
9.2. Utilidad del arqueomagnetismo en contextos prehistóricos: aplicaciones geocronológicas y geoarqueológicas	253
9.3. ¿Materiales <i>in situ</i> ? La versión arqueológica frente a la de los análisis arqueomagnéticos.	256
10. Conclusiones	259
10.1. Conclusiones generales	261
10.2. Conclusiones geoarqueológicas	262
10.3. Conclusiones sobre las aplicaciones geocronológicas.....	264
11. Conclusions	265
11.1 General conclusions.....	267
11.2. Geoarchaeological conclusions	268
11.3. Geochronological conclusions	269
Referencias bibliográficas.....	271
Anexos.....	289
Anexo 1.....	291
Anexo 2.....	295
Anexo 3.....	299
Anexo 4.....	301
Anexo 5.....	313

Resumen

El arqueomagnetismo y los análisis de magnetismo de las rocas son herramientas muy versátiles que aún no han sido muy utilizadas en contextos arqueológicos prehistóricos de la península ibérica. Su uso puede ayudar a resolver diferentes problemas que abarcan cuestiones geoarqueológicas y geocronológicas. El presente trabajo afronta algunos de estos asuntos mediante el uso de las citadas técnicas.

En primer lugar, se presenta el estudio arqueomagnético de una serie de hogares experimentales que recrean las estructuras encontradas en las unidades del Paleolítico medio del yacimiento de El Salt (Alcoy, Alicante; España). Se trata de hogares recreados en el contexto del proyecto *Neanderthal Fire Technology* (financiado por The Leakey Foundation). Se controlaron múltiples variables antes, durante y tras la quema, entre las que se incluyen diversas acciones antrópicas como el cocinado, pisoteo, etc. Los hogares estudiados fueron abandonados durante un período de tiempo que osciló entre 3 y 5 años, tras lo cual fueron muestreados y excavados. Estos hogares suponen una oportunidad única para evaluar la calidad del registro direccional de este tipo de materiales bajo determinadas condiciones tafonómicas. Resultan de utilidad para comprobar la idoneidad de los hogares paleolíticos para la realización de análisis arqueomagnéticos. Además, puesto que una de las estructuras estudiadas fue re-encendida varios años después de su primera quema, también permiten analizar si existía alguna evidencia o patrón diagnóstico de dicha acción. Hasta la realización de este estudio, no conocíamos ninguna publicación en la que se evaluaran todas estas cuestiones a tan largo plazo sirviéndose de la arqueología experimental. Los resultados han evidenciado la importancia de tener muy en cuenta la facies que se está estudiando a la hora de interpretar la señal magnética en estos contextos. Se ha observado que las cenizas de estas estructuras, que presentan una mayor concentración de minerales ferromagnéticos (*s.l.*) que el sustrato termoalterado sobre el que se realizó el fuego, son más propensas a experimentar alteraciones mecánicas. Sin embargo, el registro direccional del sustrato termoalterado de estas estructuras de combustión es eficiente, incluso en un hogar que fue pisoteado intensamente tras el apagado (aunque hay que mencionar que existe una relación clara entre el grado de preservación de cada estructura y la calidad de las direcciones obtenidas). Se interpreta que la mejor preservación se debe a la compactación del sustrato antes de la quema, que hace que sea menos propenso a las remociones. De todo esto se infiere que la aplicación del arqueomagnetismo es posible en materiales similares a los experimentales (p. ej.: estructuras paleolíticas) y el sustrato termoalterado sería la facies más recomendada para ello.

En segundo lugar, teniendo en cuenta las conclusiones extraídas del estudio de los fuegos experimentales, se analizaron varios hogares de la unidad X de El Salt

(~52 ka BP). En este caso, el interés radica en la individualización y temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos. El fenómeno del palimpsesto consiste en unidades arqueológicas o paleosuperficies cuyos materiales se presentan bajo una apariencia sincrónica, pero que pueden abarcar distintos aportes que abarcan períodos de tiempo muy amplios. Afinar el marco temporal en estos contextos es importante a la hora de interpretar los comportamientos humanos inferidos a partir de los materiales contenidos en ellos. Para llevar a cabo esta tarea, se han comparado las direcciones medias de distintas estructuras de combustión de la unidad X. Puesto que la dirección del campo magnético terrestre va cambiando con el tiempo, si dichas direcciones son estadísticamente distinguibles, se considera que esas estructuras fueron realizadas en momentos claramente diferentes. Ahora bien, esto no aporta información cuantitativa sobre el tiempo que podría haber pasado entre la realización de unos y otros hogares. Con la intención de afrontar este problema, se ha utilizado un modelo global del campo magnético terrestre para estimar cuál es el tiempo mínimo que podría explicar la diferencia angular entre direcciones medias de distintos hogares considerando un determinado nivel de incertidumbre. Los resultados han mostrado que, entre los hogares estudiados, existen diferencias temporales mínimas del orden de entre décadas y siglos. Hasta ahora, no existían datos de otras disciplinas que cuantificaran estas diferencias temporales con una incertidumbre estadística asociada. Cabe mencionar que, en el estudio de estos hogares de la unidad X, se detectó que las cenizas de uno de los fuegos presentaban inclinaciones anómalas, más bajas que las del sustrato termoalterado. Esto se ha interpretado como un posible efecto de la compactación de las cenizas tras la quema. Esto, sumado a lo observado a través de las estructuras experimentales, apunta a que las cenizas pueden plantear problemas importantes para la realización de análisis direccionales en contextos similares.

Por otro lado, se han realizado análisis de propiedades magnéticas de algunos horizontes de perfiles de El Salt con el fin de evaluar si pudieran tratarse de materiales quemados. Aunque los resultados no pueden ser considerados concluyentes y es necesario combinarlos con los datos de otras disciplinas, se han detectado comportamientos compatibles con los de determinadas facies quemadas. En el caso de los materiales que macroscópicamente parecen cenizas, los comportamientos considerados compatibles con lo esperado son curvas termomagnéticas altamente reversibles, valores altos de NRM, de ratio de Königsberger (Q_n) y de susceptibilidad magnética a temperatura ambiente. Los horizontes negros u oscuros son más problemáticos, pues el comportamiento esperable para el sustrato termoalterado (curvas termomagnéticas irreversibles mostrando neoformación de magnetita y valores relativamente altos de NRM, ratio Q_n y susceptibilidad magnética) puede ser compatible también con facies ricas en materia orgánica en descomposición sin quemar. Por lo tanto, en esos casos, aunque el comportamiento sea coherente con lo esperado para las capas negras, no

se puede descartar que sean facies de origen húmico o similar. En otros casos en los que se han observado varios horizontes sucesivos que podrían conformar una estructura de combustión completa (cenizas + sustrato termoalterado), la existencia de un patrón decreciente de valores de la NRM, del ratio de Königsberger y de la susceptibilidad magnética en profundidad ha apoyado la hipótesis planteada a nivel macroscópico.

Por último, se han realizado análisis arqueomagnéticos de 26 episodios de combustión de 4 secuencias de *fumiers* del norte de la península ibérica: el abrigo de La Castañera (Cantabria), la cueva de El Mirador (Burgos), la cueva del Estillín (Burgos) y el abrigo de San Cristóbal (Álava). Los *fumiers* son depósitos en cueva vinculados a actividades ganaderas. Fundamentalmente se originaban por la acumulación de excrementos de animales y restos vegetales que periódicamente eran quemados, generando así secuencias de horizontes quemados y no quemados que se intercalan. La finalidad del estudio de estos materiales es la obtención de datos direccionales que permitan mejorar y extender la curva de variación secular para la península ibérica antes del 1000 a.C. Se han obtenido 13 nuevas direcciones que, junto a los datos previamente disponibles, han permitido generar dos nuevas versiones de la curva de variación secular para Iberia entre el 1000 a.C. y el 6000 a.C., utilizando dos métodos diferentes (aproximación bayesiana y *bootstrap*). Además de esto, los análisis de propiedades magnéticas sugieren que las facies carbonosas de estos episodios de combustión tienen características muy similares a las capas negras de los hogares paleolíticos. Esto es coherente con lo sugerido por otras disciplinas.

Partiendo de las observaciones específicas para cada grupo de materiales, se han podido extraer, además, algunas ideas generales en relación al comportamiento magnético de las distintas facies quemadas, independientemente del contexto al que se adscriban. Para las cenizas bien preservadas, se espera una alta estabilidad termomagnética, gran concentración de minerales ferromagnéticos, altos valores de NRM, susceptibilidad magnética y ratio Q_n y diagramas de desmagnetización univectoriales (exceptuando la componente viscosa). El mecanismo de magnetización de la componente característica asociada al fuego es la termorremanencia (TRM). Parece que esta facies se preserva mejor en las secuencias de *fumiers*. Probablemente esto pueda tener relación con la protección que le ofrecen las cuevas y abrigos en este tipo de depósitos, así como con las altas tasas de sedimentación y la rápida cobertura de los episodios de combustión con nuevos desechos del ganado y/o con forraje. En el caso de los hogares paleolíticos y las recreaciones experimentales, las cenizas pueden presentar más problemas (sobre todo, alteraciones mecánicas). Por su parte, las capas negras en contextos paleolíticos y las facies carbonosas en secuencias de *fumiers* tienen una menor estabilidad térmica, que se traduce en generación de magnetita secundaria al calentarlo en el laboratorio. Presenta valores de NRM, susceptibilidad magnética y ratio Q_n también altos, aunque generalmente menores

que los de las cenizas. El mecanismo de magnetización en el sustrato termoalterado es la termorremanencia parcial (pTRM). Esto se refleja en forma de diagramas de desmagnetización multicomponente, donde la componente asociada al fuego suele tener temperaturas máximas de desbloqueo de ~300-500 °C. Ocasionalmente pueden presentar diagramas univectoriales, puesto que pueden tener lugar también mecanismos de origen termoquímico (TCRM). Los análisis de propiedades magnéticas, combinados con los datos paleomagnéticos, sugieren que capas negras y facies carbonosas no suelen superar los 500 °C.

Además de lo mencionado, se han recopilado algunos comportamientos que pueden servir para detectar posibles alteraciones post-quema: (1) curvas termoagnéticas irreversibles en cenizas bioturbadas, debido a la inclusión de materiales nada o poco quemados a causa de los procesos mecánicos, (2) valores de magnetización en el sustrato termoalterado más altos incluso que en cenizas en una estructura pisoteada, causados por la incorporación de éstas en el sustrato debido al pisoteo intenso, (3) inclinaciones anómalamente bajas en cenizas por el efecto de su compactación y (4) alta dispersión en las direcciones medias debido a alteraciones mecánicas.

Abstract

Archaeomagnetism and Rock Magnetism analyses are versatile tools which have not been widely harnessed in prehistoric contexts of Iberia. Their use may contribute to solve different geochronological and geoarchaeological questions. The present work faces some of these issues by means of the use of the mentioned techniques.

Firstly, an archaeomagnetic study of several experimental hearths is presented. These structures were carried out in the context of *Neanderthal Fire Technology Project* (funded by The Leakey Foundation) and recreated hearths founded in the Middle Paleolithic units from El Salt site (Alcoy, Alicante; España). Multiple variables were taken into account prior, during and after the burning. They include the developing of certain anthropogenic actions as cooking, trampling, etc. After the burning, the hearths remained unexcavated up to 3 -5 years. This was a unique opportunity to assess the quality of the directional record of this sort of materials under certain taphonomical conditions. It is very helpful to test the suitability of the Palaeolithic hearths for archaeomagnetic purposes. Furthermore, since one of the structures was re-heated some years after the first burning, it allowed to search for patterns or diagnostic behaviors of this action. To our knowledge, no previous publication has tested these issues for such a long time using Experimental Archaeology. The results have shown the importance of taking into account the facies' specific features when interpreting the magnetic signal. While ashes present a higher ferromagnetic (*s.l.*) concentration than thermoaltered substrate, they are prone to suffer more mechanic disturbances. However, the directional record of the thermoaltered substrate is very efficient – even in an intensively trampled structure. It is interpreted that better preservation of the archaeomagnetic signal in thermoaltered substrate is due to the compaction that it presents before the burning. Anyway, there is a relationship among the preservation degree and the quality of the obtained directions. From all the above it can be inferred that this type of materials (and thus, also the Palaeolithic hearths) are good candidates for archaeomagnetic implementation and thermoaltered substrate seems to be the optimal facies for this task.

Considering the conclusions obtained from the experimental study, several hearths from El Salt unit X (~52 ka BP) were analysed. In this case, the interest lies in the isolation and temporalization of Neanderthal occupations in palimpsest contexts. Palimpsest phenomenon consist of archaeological units or paleosurfaces whose remains seems to appear under the aspect of a synchronous input but may really correspond to several diachronic inputs covering very long periods of time. Refining the temporal framework is important to interpret the human behaviors inferred from the archaeological remains included in this units/paleosurfaces. In order to develop this task, mean archaeomagnetic directions from different

hearths from unit X were compared. Considering that direction of the Earth's Magnetic Field (EMF) changes with time, when directions are statistically distinguishable, they are considered diachronic records. It means that burning of each hearth took place in clearly different moments. However, it does not provide quantitative information. In order to deal with this issue, a global model of the EMF was used to calculate the minimum time (at certain confidence level) that could explain the angular differences among the mean directions of the studied hearths. The results have shown that there are minimum temporal differences of decades and even centuries. Up until now, no other discipline had supply quantitative information with an associated statistic uncertainty. Another remarkable fact is the detection of anomalous low inclination in the ashes of a hearth from unit X. It is interpreted as the possible effect of the compaction of the ashes after the burning. This suggests, once again, that ashes can be problematic for directional purposes in this type of context.

Thirdly, magnetic properties analyses were carried out on some horizons from two profiles from El Salt with a view to assess if they may correspond to burnt materials. Although results should be compared with the data from other disciplines, some behaviors compatible with those expected for certain burnt facies were detected. In the case of materials with macroscopic ash appearance, the behaviors considered congruente with the expected one were: highly reversible thermomagnetic curves, high values of NRM, Königsberger ratio (Q_n) and magnetic susceptibility. Black or dark horizons were more problematic, because the expected pattern for the thermoaltered substrate (irreversible thermomagnetic curves due to magnetite neoformation and relatively high values of NRM, Q_n ratio and magnetic susceptibility) are also congruente with unburnt facies with a high content of organic matter. Therefore, in these cases, an humic or similar origin cannot be disregarded. In the case of successive horizons which could form a complete combustion structure (ashes + thermoaltered substrate), the existence of a decreasing pattern of NRM, Q_n ratio and magnetic susceptibility in depth was considered a supporting argument of the hypothesis suggested by the macroscopic observation.

Finally, archaeomagnetic analyses were carried out on 26 combustion episodes from four *fumiers* sequences from North Iberia: La Castañera rockshelter (Cantabria), El Mirador cave (Burgos), Estillín cave (Burgos) and San Cristóbal rockshelter (Álava). *Fumiers* deposits are linked to livestock practices. They are mainly formed by the accumulation of animal excrements and plant remains, which were periodically burnt, generating sequences of interspersed burnt and not burnt horizons. The aim of this study is the obtaining of new directional data to extend and improve the Iberian Secular Variation (SV) curve prior to 1000 BC. 13 new directions were calculated. Along with the datasets from previous studies, the new data was used to generate two versions of the Iberian SV curve between 6000 BC and 1000 BC by using different methods (Bayesian approach and bootstrap).

Apart from this, Rock Magnetic analyses of the carbonaceous facies of *fumiers* sequences has shown very similar features to those of the Palaeolithic black layers. It is congruent with the suggestions of other disciplines.

On the basis of the specific observations of each group of materials, some general ideas about the magnetic behavior of the different facies (regardless the context to which they are assigned) were extracted. The expected behavior of well-preserved ashes includes: (1) high thermomagnetic stability, (2) high concentration of ferromagnetic minerals (*s.l.*), (3) high values of NRM, magnetic susceptibility and Q_n ratio, and (4) univectorial demagnetization diagrams (excluding the viscous component). Main remanent magnetization acquisition mechanism is thermoremanence (TRM). It seems that ashes are better preserved in the *fumiers* sequences. This is likely related to the protection of the caves and shelters, the rapid covering of the episode combustions with more excrements and fodder and the high sedimentation rates. In the case of the Paleolithic hearths, ashes might present more problems (mainly mechanical disturbances).

Black layers (in Palaeolithic contexts) and carbonaceous facies (in *fumiers* sequences) exhibit a lower thermomagnetic stability, which results in the formation of secondary magnetite during the heating in the laboratory. NRM, magnetic susceptibility and Q_n ratio present high values, but usually not as high as those of ashes. Main acquisition mechanism of the remanence is partial thermoremanence (pTRM). It implies multicomponent demagnetization diagrams, in which the component related to fire is isolated up to ~300-500 °C. Occasionally, univectorial diagrams may exist due to thermo-chemical acquisition mechanism (TCRM). Combination of palaeomagnetic and Rock Magnetism analyses suggests that black layer and carbonaceous facies do not usually reach temperatures higher than 500 °C.

Apart from this, some behaviors that may be used to detect possible post-burning disturbance have been compiled: (1) irreversible thermomagnetic curves in ashes affected by bioturbation, due to the inclusion of slightly or not burnt by the mechanical disturbances, (2) very high magnetization values (even higher than ashes) in black layer of a trampled hearth, due to the incorporation of ashes in the thermoaltered substrate, (3) anomalously low inclinations (shallowing) in ashes due to their compaction (flattening), and (4) scattered directions as an effect of mechanical processes.

1. Introducción

1.1 Antecedentes y estado de la cuestión

1.2 Objetivos

a) Cuestiones de interés geoarqueológico

a) Cuestiones de interés geocronológico

1.3 Organización de la tesis



1.1. Antecedentes y estado de la cuestión

No son pocos los trabajos de investigación que se han basado en el estudio de las propiedades magnéticas y del registro de la dirección y/o la intensidad del campo magnético terrestre (CMT) en los materiales arqueológicos quemados con distintas finalidades. Tales fines incluyen la datación de estructuras arqueológicas como hornos, hogares, etc. (p. ej.: Carrancho et al., 2016; Casas et al., 2014; Goguitchaichvili et al., 2017; Gómez-Paccard et al., 2019a; Gómez-Paccard y Beamud, 2008; Jordanova et al., 2004; Schnepf et al., 2015; Zananiri et al., 2007), la caracterización de los distintos materiales quemados (p. ej.: Brodard et al., 2012; Carrancho et al., 2014, 2009; Church et al., 2007; Kapper et al., 2014a; McClean y Kean, 1993; Peters et al., 2001), la evaluación del grado de conservación y de los procesos mecánicos que pueden haber afectado al registro arqueológico (Carrancho et al., 2016a; Carrancho et al., 2012; Gose, 2000; Kapper et al., 2014a; Shahack-Gross et al., 2018), e incluso la reconstrucción de los patrones regionales de variación secular (Batt et al., 2017; Carrancho et al., 2013; Gómez-Paccard et al., 2006; Hervé et al., 2013a, 2013b; Hervé y Lanos, 2017; Molina-Cardín et al., 2018; Palencia-Ortas et al., 2017; Péter y Ferencz, 2006; Schnepf y Lanos, 2005, 2006; Tema et al., 2006; Tema y Kondopoulou, 2011; etc.) y la generación de modelos geomagnéticos regionales y globales (p. ej.: Pavón-Carrasco et al., 2009, 2014). Aunque hay algunas excepciones, no hay muchos trabajos en los que se apliquen análisis arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas en contextos prehistóricos con materiales quemados en el ámbito de la península ibérica (Carrancho et al., 2016a, 2016b, Carrancho et al., 2009, 2012, 2013; Catanzariti et al., 2008; Gómez-Paccard et al., 2019b; Gómez-Paccard et al., 2006; Gómez-Paccard et al., 2006; Molina-Cardín et al., 2018; Osete et al., 2016, 2020; Palencia-Ortas et al., 2017). Además, muchos de estos trabajos no alcanzan fechas más antiguas que el primer milenio a.C. Sin embargo, el arqueomagnetismo y las técnicas de magnetismo de las rocas son herramientas muy versátiles que pueden contribuir a resolver diferentes cuestiones geocronológicas y geoarqueológicas que surgen en contextos prehistóricos.

En primer lugar, nos enfrentamos a cuestiones geocronológicas. A día de hoy existen diferentes técnicas de datación. Ahora bien, no en todos los yacimientos aparecen materiales susceptibles de ser datados por alguna de ellas. Por lo tanto, cuantas más técnicas existan y mejor desarrolladas estén, más posibilidades habrá para asignar cronologías a los yacimientos con más precisión. La datación arqueomagnética se aplica a estructuras de combustión (hornos, hogares, etc.) y permite datar el último calentamiento experimentado por éstas. Esta técnica ya se ha aplicado en diversos contextos, incluyendo algunos en los que se dispone solamente de dataciones relativas basadas en información arqueológica (p. ej.: García-Redondo et al., 2020) o en los que las técnicas de datación disponibles no permiten alcanzar tanta resolución (p. ej.: Gómez-Paccard et al.,

1. Introducción

2019a). La datación arqueomagnética se puede realizar a partir del análisis de la dirección del CMT, de la intensidad o de ambos conjuntamente. Los análisis de arqueointensidad deben cumplir una serie de requisitos metodológicos muy estrictos y no son objeto de esta Tesis.

La datación arqueomagnética se ha venido realizando tradicionalmente mediante el uso de curvas regionales de variación secular (VS) y, más recientemente, a través de modelos geomagnéticos regionales o globales (p. ej.: Pavón-Carrasco et al., 2014). Las curvas de variación secular están diseñadas a partir del estudio arqueomagnético de estructuras de combustión datadas independientemente por otros métodos. La datación se obtiene comparando la dirección y/o intensidad obtenida a partir de la magnetización remanente registrada en una estructura de combustión, con la curva de VS o modelo previamente establecido. Estas curvas y modelos sirven para realizar la datación, pero también permiten conocer el comportamiento del CMT en el pasado. En el caso de la península ibérica, la primera curva regional se publicó en 2006, cubría los últimos 3000 años (Gómez-Paccard et al., 2006), y se ha ido actualizando y extendiendo a lo largo del tiempo (Molina-Cardín et al., 2018; Osete et al., 2020; Palencia-Ortas et al., 2017). Carrancho et al. (2013) publicaron una curva patrón para Europa basada en datos direccionales, combinando datos de distintas zonas del continente y abarcando el intervalo de tiempo que va desde el año 1000 a.C. hasta el 6000 a.C. Los modelos geomagnéticos recientemente publicados, como el SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014) o el GGF100k (Panovska et al., 2018), han permitido acercarnos al comportamiento de la variación secular durante los últimos 14.000 y los últimos 100.000 años respectivamente. Ahora bien, conviene tener en cuenta que sólo los modelos basados exclusivamente en datos arqueomagnéticos como el SHA.DIF.14k permiten reconstruir fielmente las variaciones del CMT, pero tienen el hándicap de no abarcar con detalle más allá de unos pocos miles de años. Para cronologías más antiguas, debido al tipo y la cantidad de datos disponibles y a la incertidumbre de las dataciones, la precisión de los modelos empeora.

Cuando se observan en detalle los datos direccionales disponibles en la actualidad para la península ibérica, se puede percibir que, desde aproximadamente el año 1000 a.C., la densidad de datos es bastante baja (llegando a haber un vacío entre los años 2500 y 4000 a.C., Fig. 1.1). Es importante recordar que el patrón de la variación secular es reproducible a escala subcontinental por lo que incorporar nuevos datos arqueomagnéticos de la península ibérica a las bases de datos con cronologías anteriores al 1.000 a.C., es fundamental tanto desde el punto de vista geomagnético como arqueológico. Por una parte, eso permitirá conocer mejor cómo ha variado el campo magnético terrestre en la península ibérica los últimos milenios, lo cual es útil y para fines de modelado geomagnético y estudiar su evolución. Por otra parte, la ampliación de estos registros permitirá

mejorar la resolución de la datación arqueomagnética en materiales de la prehistoria reciente.

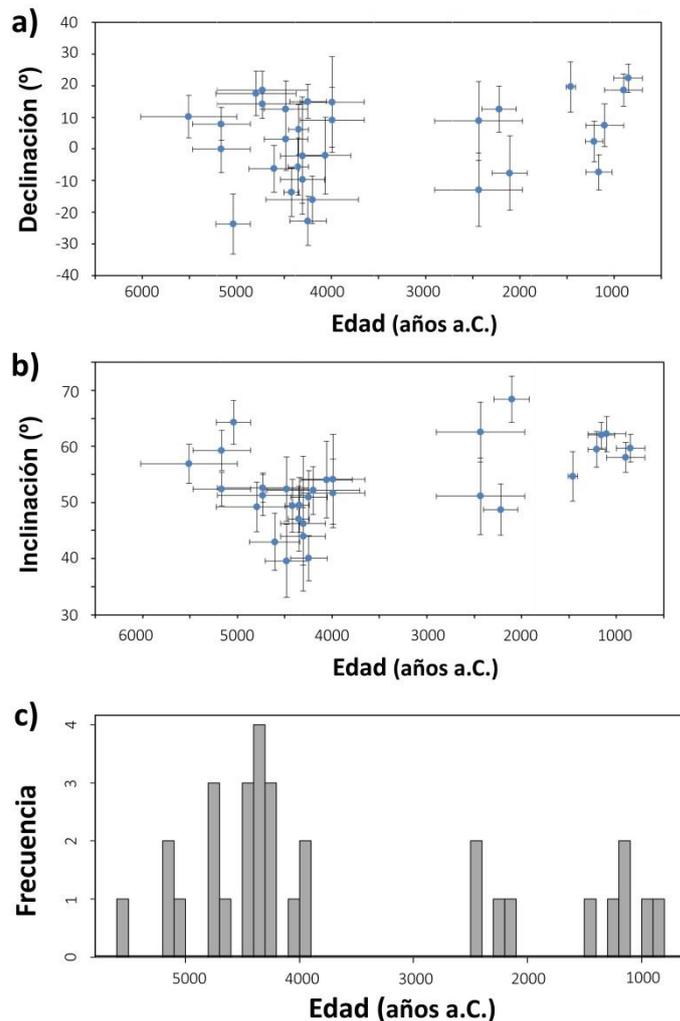


Fig. 1.1. (a-b) Representación de las direcciones disponibles para Iberia entre 1000 a.C. y 6000 a.C.: (a) declinación y (b) inclinación. Las barras horizontales representan el error temporal y las verticales el error del dato magnético. (c) Histograma representando la frecuencia de los datos mostrados en (a-b). [Los gráficos han sido realizados con los datos tomados de la base de datos GEOMAGIA50.v3.3 (Brown et al., 2015), consultada por última vez en abril de 2020]

Además de los problemas geocronológicos, en los yacimientos prehistóricos existen también problemas geoarqueológicos que pueden ser afrontados con ayuda del arqueomagnetismo. Es el caso de la individualización de ocupaciones neandertales en yacimientos del Paleolítico Medio (*ca.* 250 – 40 ka BP). En estos sitios, frecuentemente aparecen densas acumulaciones de materiales arqueológicos (restos líticos, óseos, etc.) asociados a estructuras de combustión en superficies que parecen depositados de manera sincrónica, pero que en realidad pueden corresponder a uno o más episodios de ocupación que tuvieron lugar a lo largo de un período largo de tiempo. Este fenómeno ha sido muy discutido en la literatura arqueológica y técnicamente se denomina “palimpsesto” (p. ej.: Bailey, 2007; Binford, 1981; Henry, 2012; Mallol y Hernández, 2016; Stern, 1993; Vaquero et al., 2012). Desentrañar los procesos de formación y alteración de estos yacimientos es muy complicado, y es de vital importancia para poder conocer mejor las dinámicas de ocupación humana.

1. Introducción

Es frecuente que en los palimpsestos aparezcan abundantes estructuras de combustión, que son susceptibles de haber registrado la dirección del CMT por efecto del calentamiento/enfriamiento. La detección de direcciones arqueomagnéticas estadísticamente distinguibles en fuegos de una misma unidad o paleosuperficie implicaría que nos encontramos ante registros diacrónicos. Esto significa que el último uso de las estructuras tuvo lugar en momentos claramente diferentes. Esta información es muy valiosa a la hora de diseccionar temporalmente los palimpsestos y sus ocupaciones. Sin embargo, es importante evaluar cuánto tiempo es necesario para que los registros direccionales puedan ser distinguibles. En las condiciones ideales, para resolver este problema se debería contar con una curva de referencia para la misma época con suficiente resolución, sin embargo, para cronologías muy antiguas esto no es posible. En ese sentido, el desarrollo alcanzado por los modelos geomagnéticos para los últimos milenios permite estudiar las tasas de variación temporal del campo magnético terrestre (variación secular) y evaluar esas características para asignar límites temporales a las diferencias direccionales observadas entre estructuras de combustión. Esta aproximación puede dar idea del tiempo mínimo que podría explicar la diferencia entre direcciones, contribuyendo así a una mejor comprensión de las dinámicas de ocupación humanas y a los procesos de formación de los yacimientos. La aplicación del arqueomagnetismo con similar finalidad ha sido explorada previamente en contextos paleolíticos (Carrancho et al., 2016b; Sternberg y Lass, 2007; Zeigen et al., 2019), pero la estimación de la diferencia temporal sigue planteando muchas incertidumbres.

El yacimiento de El Salt (Alcoy, Alicante) es un buen ejemplo de la problemática que se acaba de exponer. La unidad X de este yacimiento (52.3 +/- 4.6 ka BP; (Galván et al., 2014b) presenta un alto número de estructuras de combustión y una gran cantidad de materiales arqueológicos que conforman un palimpsesto. El estudio del yacimiento se ha llevado a cabo desde un enfoque multidisciplinar en el que se ha combinado un gran número de disciplinas (Fagoaga et al., 2017; Leierer et al., 2019; Machado et al., 2016; Machado y Pérez, 2016; Mallol et al., 2013a, 2013b; Marquina et al., 2017; Pérez-Luis et al., 2017; Pérez et al., 2017, 2015; Pérez-Luis, 2019; Rodríguez-Cintas y Cabanes, 2017; Vidal-Matutano, 2016; Vidal-Matutano et al., 2017). La resolución de estudio alcanzada (a nivel espacial y temporal) en la unidad X es muy alta, pero la incertidumbre respecto al marco temporal en el que tuvieron lugar las ocupaciones humanas es todavía grande. El objetivo sigue siendo llegar a estar lo más cerca posible de la escala etnográfica, de alguna manera análoga al concepto de ocupación (Vaquero, 2014). Los análisis arqueomagnéticos son una herramienta con un enorme potencial que puede contribuir al avance en esa línea de trabajo, pero todavía claramente infrutilizada en contextos paleolíticos.

A la hora de aplicar los análisis arqueomagnéticos a estructuras de combustión paleolíticas, surge una cuestión importante: ¿se preserva

correctamente la señal magnética a lo largo del tiempo a pesar de las distintas condiciones tafonómicas¹ que pueden haber experimentado los hogares? Aquí, la arqueología experimental aporta información de gran valor. La reproducción bajo condiciones controladas de fenómenos del pasado (ej.: fuego), con el fin de testar hipótesis que refuten observaciones arqueológicas es una vía de gran potencial y existen algunos trabajos que han estudiado y caracterizado la señal magnética en fuegos experimentales (p. ej.: Beatrice et al., 2008; Bellomo, 1993; Calvo-Rathert et al., 2011; Carrancho y Villalaín, 2011; Hathaway, 1990a, 1990b; McClean y Kean, 1993; Peters et al., 2001). Estos trabajos han aportado información importante acerca de cómo es la señal magnética en los materiales arqueológicos quemados. Sin embargo, hasta la realización de esta tesis, no había ninguna publicación previa que evaluara los efectos de los procesos tafonómicos sobre el registro arqueomagnético en este tipo de estructuras de combustión.

Recientemente, se desarrolló un programa de arqueología experimental (*Neanderthal Fire Technology*, dirigido por la Dra. Carolina Mallol de la Universidad de La Laguna, y financiado por *The Leakey Foundation*) que se centró en la recreación de hogares que simularan las estructuras de combustión identificadas en El Salt. Los fuegos se realizaron controlando múltiples variables y se preservaron durante un tiempo variable (hasta varios años) bajo distintas condiciones tafonómicas. La realización de análisis arqueomagnéticos sobre estos materiales, supone una fuente de información muy valiosa para comprender e interpretar mejor cómo es la preservación de la señal arqueomagnética en fuegos prehistóricos, y en concreto, los hogares paleolíticos de El Salt.

Por último, hay otra problemática geoarqueológica que tiene larga tradición de estudio en el ámbito de la arqueología: la identificación de materiales quemados. En los yacimientos, en ocasiones, aparecen sedimentos y otros materiales que presentan coloraciones y características similares a las esperadas para los materiales quemados. Esto es particularmente evidente en contextos paleolíticos y en el propio yacimiento de El Salt también se da esta circunstancia. Determinar si se trata de materiales quemados o no, sobre todo en las épocas más antiguas, tiene implicaciones muy importantes en el estudio del comportamiento humano. Pero no siempre es posible determinar a simple vista si realmente han sufrido alteración térmica. Son muchas las técnicas que se han aplicado (incluidos el arqueomagnetismo y el magnetismo de las rocas), pero la problemática no tiene

¹ Por definición, la tafonomía estudia los procesos que afectan a los restos óseos en la transición desde que forman un ser vivo hasta que quedan fosilizados y enterrados o insertos en el registro arqueológico (Andrews, 1995; Fernández-López, 1998). Sin embargo, el término puede ser usado de manera más genérica no sólo en zooarqueología sino para cualquier otra disciplina arqueológica, como es el caso de la pirotecnología. En este ámbito, cuando hablamos de procesos tafonómicos, nos estamos refiriendo a todo aquello que ocurre desde que un fuego se apaga (podría considerarse un equivalente al momento en el que el ser vivo muere) hasta que es excavado y muestreado (que sería el tiempo equivalente al requerido para la fosilización y al enterramiento del resto óseo).

una única solución. Trabajos previos han explorado el potencial del arqueomagnetismo y el magnetismo de las rocas para contribuir en esta dirección (p. ej.: Bellomo, 1993; Zhang et al., 2014). Si bien es cierto que estas técnicas, por sí mismas, probablemente no resuelvan el problema por completo, combinadas con otros análisis pueden ayudar a facilitar la identificación de los materiales quemados.

Esta Tesis doctoral pretende ser una contribución a las distintas cuestiones planteadas, utilizando los análisis arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas como hilo conductor.

1.2. Objetivos

La motivación principal de esta tesis es la aplicación del arqueomagnetismo y el magnetismo de las rocas a la resolución de problemáticas gearqueológicas y geocronológicas en yacimientos arqueológicos prehistóricos. A continuación se resumen los objetivos principales del trabajo:

a) Cuestiones de interés gearqueológico:

1. Evaluar, mediante arqueología experimental, si la dirección del campo magnético terrestre se preserva correctamente o no en un conjunto de registros de fuegos sometidos a diversas condiciones tafonómicas de alteración tras varios años de exposición (entre 2 y 5 años). Dentro de este objetivo principal se distinguen varios objetivos secundarios:

- Caracterizar la mineralogía ferromagnética y relacionar esta información con el comportamiento paleomagnético y el mecanismo de adquisición de la magnetización que puedan haber registrado estos hogares recreados experimentalmente. Este objetivo también es aplicable a los demás materiales estudiados de la tesis (hogares paleolíticos y episodios quemados en *fumiers*).
- Evaluar qué facies (cenizas y/o sustrato subyacente) son las más idóneas para obtener datos arqueomagnéticos y determinar si hay diferencias significativas entre fuegos en cueva y al aire libre.
- Analizar la posibilidad de identificar reencendidos en fuegos quemados con varios años de diferencia temporal.
- Evaluar cómo afectan diversos procesos de alteración como por ejemplo el *trampling* (pisoteo) al registro arqueomagnético y a las propiedades magnéticas.
- Explorar la posibilidad de determinar temperaturas de calentamiento en estas facies mediante análisis arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas.

2. Analizar el potencial arqueomagnético de estructuras de combustión prehistóricas y otros materiales del yacimiento de Paleolítico medio de El Salt (Alcoy, Alicante). Dentro de este yacimiento se estudiaron varios tipos de materiales distinguiendo los siguientes objetivos parciales:

-Determinar qué facies quemadas en hogares de la unidad X son las más idóneas para obtener datos arqueomagnéticos, mediante la caracterización de sus propiedades magnéticas y comportamiento paleomagnético.

-Demostrar si varios hogares expuestos en una misma paleosuperficie (que pudieran parecer sincrónicos) o dentro de una misma subunidad (cuando en el campo cuesta establecer relaciones estratigráficas detalladas entre estructuras de combustión), son realmente diacrónicos. Es decir, individualizar ocupaciones humanas temporalmente diferenciadas.

-En el caso de identificar diacronías, determinar con certidumbre estadística el tiempo mínimo que haya podido transcurrir entre la quema de dos o más hogares. Es decir, temporalizar ocupaciones neandertales.

-Evaluar el potencial de los métodos magnéticos para identificar alteraciones térmicas en determinados horizontes de la estratigrafía de El Salt. Se trata de aportar criterios para identificar calentamiento en superficies donde la coloración u otros rasgos macroscópicos lo sugieren, pero no hay certeza al respecto.

b) Cuestiones de interés geocronológico:

1. Obtener nuevos datos direccionales a partir de depósitos de *fumiers* de la península ibérica para aumentar los registros arqueomagnéticos entre los años 1000 a.C. y 6000 a.C. Esta información permitirá obtener información geomagnética (reconstruir las variaciones del campo magnético terrestre) y geocronológica (mejorar la técnica de datación arqueomagnética para la prehistoria reciente). Dentro de este objetivo, se distinguen los siguientes objetivos parciales:

- Mejorar la curva de variación secular de la península ibérica para ese intervalo temporal, con especial interés en la incorporación de datos de cronologías poco a nada representadas previamente.

-Diseñar una curva regional de variación secular con técnicas distintas, para estas cronologías prehistóricas.

-Evaluar si los datos inéditos que se obtengan reproducen tendencias de variación del campo magnético terrestre previamente observadas o si variaciones específicas de carácter regional inéditas son observadas.

1.3. Organización de la tesis

La presente tesis se organiza en cinco grandes bloques (a parte de este primer bloque introductorio) que se describen a continuación:

- En primer lugar, se hace un breve repaso a los principales fundamentos teóricos sobre los que se sustenta el arqueomagnetismo y, por tanto, esta tesis: (i) la existencia del campo magnético terrestre (CMT), (ii) los cambios que éste experimenta a lo largo del tiempo y (iii) la capacidad de los materiales arqueológicos quemados para registrar la dirección del CMT debido a la presencia de minerales ferromagnéticos en ellos (capítulo 2).

-En el siguiente capítulo (capítulo 3) se explica la metodología seguida para la realización de la tesis. Por un lado, se detallan las distintas técnicas de muestreo y los tipos de muestras recogidas en el campo. Por otro lado, se describen los procedimientos llevados a cabo en el laboratorio, yendo desde la preparación previa de las muestras hasta los distintos experimentos paleomagnéticos y de magnetismo de rocas aplicados.

-En el capítulo 4 se describen los materiales estudiados y se exponen las hipótesis de trabajo propuestas para cada contexto. Éstos han sido agrupados en distintos bloques según su contexto de procedencia. En primer lugar, se detallan las características de las estructuras experimentales con 2 y 5 años de antigüedad del proyecto *Neandertal Fire Technology* (apartado 4.2).

A continuación, se describen los distintos tipos de materiales paleolíticos del yacimiento de El Salt sobre los que se han aplicado análisis arqueomagnéticos y de propiedades magnéticas (apartado 4.3). Estos materiales han sido subdivididos en dos grupos, según la finalidad de estudio. Por un lado, se presentan las estructuras de la unidad X y la problemática asociada a estos materiales, cuya finalidad de estudio es la de contribuir a la disección y temporalización de los eventos de ocupación incluidos en el palimpsesto que conforma dicha unidad (apartados 4.3.1 a 4.3.3). Por otro lado, se presenta una serie de horizontes expuestos en dos perfiles de El Salt y sospechosos de estar alterados térmicamente (apartado 4.3.4). Se pretende contribuir a la resolución de este problema mediante la realización análisis de propiedades magnéticas.

En tercer lugar, se describen los episodios de combustión de los yacimientos holocenos ibéricos con depósitos de *fumiers* estudiados con el fin de actualizar y extender en el tiempo la curva de variación secular específica de Iberia (apartado

4.4). Los yacimientos estudiados son el Abrigo de La Castañera (Obregón, Cantabria; apartado 4.4.1), Cueva de El Mirador (Sierra de Atapuerca, Burgos; apartado 4.4.2), Abrigo de San Cristóbal (Laguardia, Álava; apartado 4.4.3) y Cueva del Estillín (Hortigüela, Burgos; apartado 4.4.4).

-En los siguientes cuatro capítulos (capítulos 5, 6, 7 y 8) se recogen los resultados de la tesis. Estos se exponen siguiendo la división por contextos que se utilizó para describir los materiales:

*En el capítulo 5 se exponen los resultados del estudio de las estructuras de combustión experimentales del proyecto *Neanderthal Fire Technology*. Con el fin de evaluar los efectos de los procesos tafonómicos, se discuten los resultados obtenidos en función de la influencia que tienen el sustrato original, el grado de impacto térmico recibido en las distintas zonas de la estructura y los procesos tafonómicos en la señal magnética resultante.

*En el capítulo 6 se presentan los resultados de los análisis realizados sobre las estructuras de combustión de la unidad X de El Salt. Se han observado algunas características específicas en función de la facies que se estudie, lo cual se discute tras la presentación de los resultados. Además, se valoran algunas peculiaridades de las propiedades magnéticas de los materiales de control y la estabilidad del registro direccional de los hogares. Se discuten también las implicaciones arqueológicas de los resultados obtenidos. Por último, se presenta una nueva metodología para la detección de diacronías y temporalización de ocupaciones en palimpsestos arqueológicos. Se pone en valor y se desarrolla su aplicación a los datos del Salt.

*En el capítulo 7 se presentan los resultados de los análisis de las propiedades magnéticas de materiales potencialmente quemados de la secuencia de El Salt. Posteriormente se discuten las propiedades magnéticas observadas y se valora qué materiales podrían estar alterados térmicamente.

*En el capítulo 8 se recogen los resultados arqueomagnéticos y de propiedades magnéticas de las secuencias de *fumiers*. Cabe destacar que, entre los experimentos de magnetismo de las rocas se incluyen medidas de anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) y de la anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (AARM). De este último parámetro, aún no se ha publicado nada para secuencias de *fumiers*. A continuación, se comparan las propiedades magnéticas observadas con las que se observaron en estudios previos en *fumiers*. Por otro lado, se discute la estabilidad direccional y los procesos tafonómicos que pueden haber afectado a los episodios de combustión. Se presenta también una primera curva de variación secular para Iberia entre el año 1000 a.C. y el 6000 a.C. De ésta se presentan dos versiones (realizadas con distintos métodos de cálculo) y se comparan con otros registros

1. Introducción

coetáneos existentes. Por último, se discute el potencial y la viabilidad de los estudios arqueomagnéticos en materiales de este tipo.

-Aunque cada capítulo de resultados incluye su discusión específica, en el capítulo 9 se expone una discusión general en la que comentan las principales ideas extraídas de la evaluación en conjunto de los distintos resultados. Se comentan algunos comportamientos comunes que pueden servir de guía a la hora de interpretar materiales similares, así como se ponen en valor las utilidades geocronológicas y geoarqueológicas de las técnicas magnéticas.

-En los capítulos 10 y 11 se recogen las conclusiones de la tesis (en español y en inglés respectivamente). Por un lado, se exponen las conclusiones más generales respecto al registro magnético de los distintos materiales (apartados 10.1 y 11.1). Por otro lado, se describen las principales conclusiones geoarqueológicas extraídas (apartados 10.2 y 11.2) y las conclusiones en relación a las aplicaciones geocronológicas (apartados 10.3 y 11.3).

2. Fundamentos

2.1. El campo magnético terrestre: origen y geometría.

2.2. Variaciones en el campo magnético terrestre: inversiones de polaridad, excursiones geomagnéticas y variación secular.

2.2.1. Inversiones de polaridad

2.2.2. Excursiones geomagnéticas

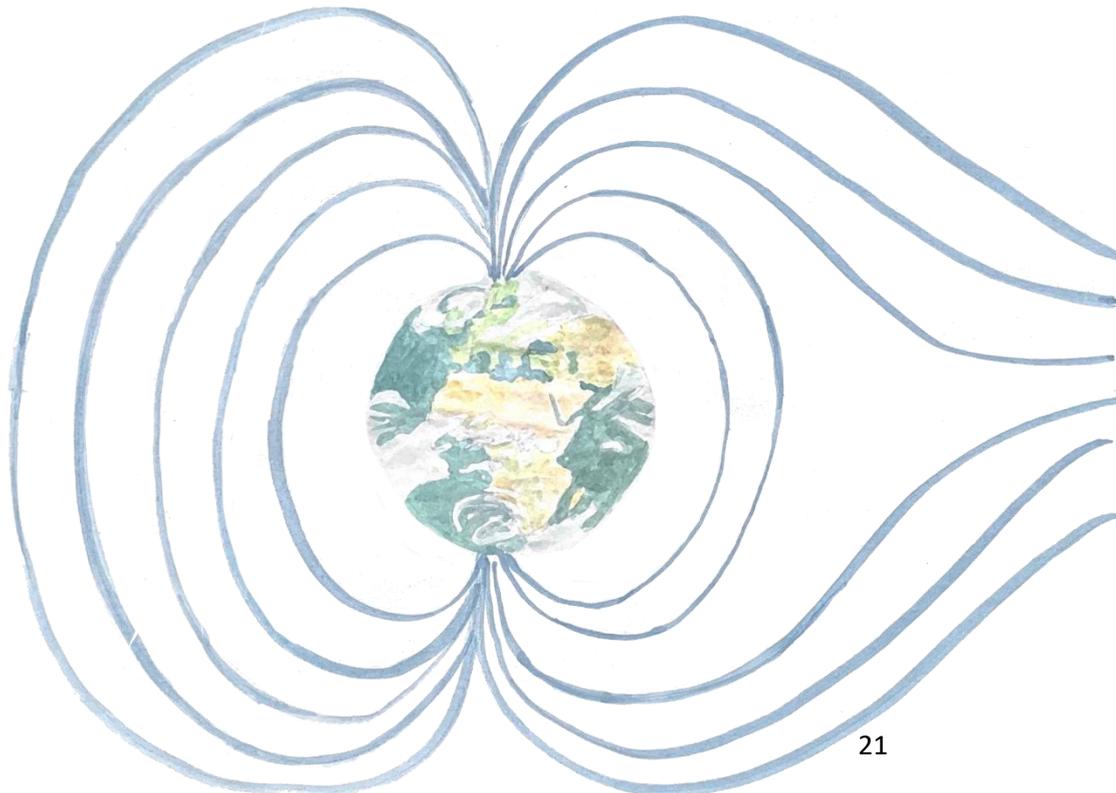
2.2.3. Variación secular

2.3. El registro del campo magnético terrestre en el pasado

2.3.1. Diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo

2.3.2. Teoría de Néel y dominios magnéticos

2.3.3. Mecanismos de la magnetización remanente en los materiales arqueológicos quemados



A grandes rasgos, podemos considerar que el arqueomagnetismo se fundamenta en tres premisas básicas:

- 1) La tierra posee un campo magnético: el campo magnético terrestre (CMT).
- 2) El CMT experimenta cambios a lo largo del tiempo.
- 3) Debido a la presencia de minerales ferromagnéticos (*sensu lato*) en los materiales quemados y al efecto del calor, éstos son capaces de registrar una magnetización con la dirección del campo magnético terrestre y una magnitud proporcional correspondiente al momento en que se enfrían por última vez.

Partiendo de estas tres premisas básicas, a continuación se describen brevemente los fenómenos y los conceptos teóricos más importantes implicados en ellas.

2.1 El campo magnético terrestre: origen y geometría.

Aunque es invisible al ojo humano, la Tierra está rodeada por el llamado campo magnético terrestre (CMT). Pese a que hay algunas contribuciones de origen externo, el CMT tiene su origen principalmente en las corrientes de convección que tienen lugar en el núcleo externo de la Tierra, el cual se compone fundamentalmente de hierro y níquel fundidos y funciona de manera similar a una dinamo auto-inducida (Butler, 2004; Glatzmaier y Olson, 2005; Tauxe, 2008). Su geometría se aproxima a la de un dipolo axial geocéntrico en el que las líneas de campo salen por uno de los polos y entran por el otro (Fig. 2.1), si bien un modelo, también simple, que se ajusta notablemente mejor asume que el eje del dipolo está ligeramente inclinado unos 10° respecto al eje de rotación de la Tierra en la actualidad (Roberts y Turner, 2013) (Fig. 2.2).

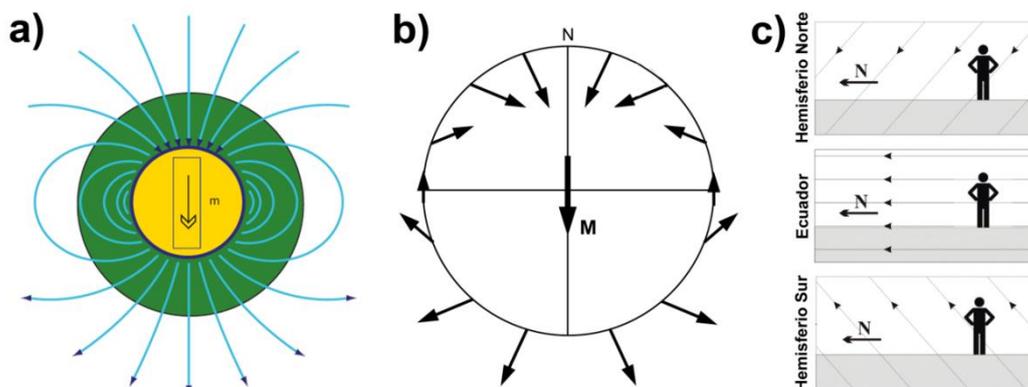


Fig. 2.1. (a) Representación de las líneas de campo producidas por un dipolo axial geocéntrico. (b) y (c) Dirección del vector magnético en las distintas zonas de la esfera según el modelo del dipolo axial geocéntrico en un momento de polaridad normal como el actual: en el hemisferio norte, apunta hacia el interior; en el ecuador, la dirección es paralela a la superficie; en el hemisferio sur el vector apunta hacia el exterior. [Imagen (a) tomada de Tauxe (2008); imagen (b) tomada de Butler (2004); imagen (c) tomada de Villalain Santamaría (2016a)]

2. Fundamentos

El modelo del dipolo geocéntrico inclinado explica alrededor del 90% del CMT y se basa en lo que llamamos componente dipolar, aunque en realidad el CMT es mucho más complejo y hay otras componentes que contribuyen en menor medida (véase p. ej.: Campuzano et al., 2014; McElhinny, 2004; Tauxe, 2005). Es por esto que si medimos y calculamos los polos magnéticos reales, éstos están ligeramente desviados respecto a los estimados según el modelo mencionado (que se denominan polos geomagnéticos).

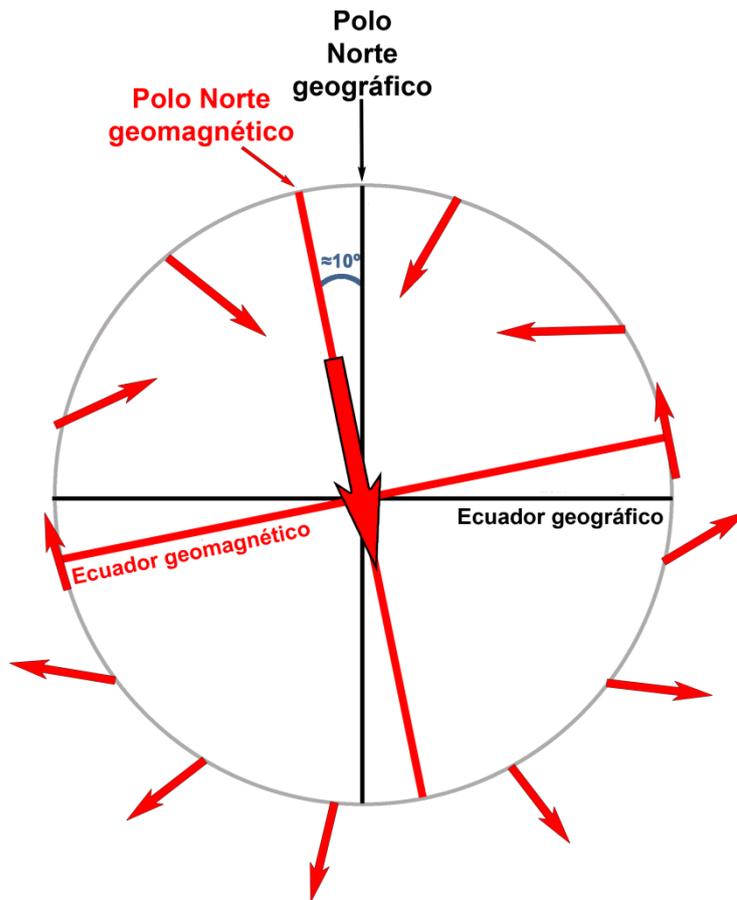


Fig. 2.2. Representación esquemática del Norte y del Ecuador geográficos (negro) frente al Norte y al Ecuador geomagnéticos estimados según el modelo del dipolo geocéntrico inclinado (rojo). Las flechas rojas representan la dirección del vector magnético.

2.2. Variaciones en el campo magnético terrestre: inversiones de polaridad, excursiones geomagnéticas y variación secular.

El CMT va experimentando variaciones a lo largo del tiempo, que pueden ser muy diferentes en cuanto a duración (entre milisegundos y millones de años), dirección (desde unos pocos grados hasta un intercambio entre los polos magnéticos), magnitud (desde pocos nT hasta decenas de miles de nT) y escala espacial a la que son reproducibles (fenómenos globales o locales). Aquí nos centraremos básicamente en tres fenómenos de larga duración: las inversiones de polaridad, las excursiones geomagnéticas y la variación secular.

2.2.1. Inversiones de polaridad

El CMT presenta dos configuraciones estables que se alternan a lo largo del tiempo. En primer lugar, encontramos la disposición actual, en la que el polo sur del dipolo se ubica en el norte geográfico y por tanto, las líneas de campo salen por el sur geográfico y entran por el norte (Fig. 2.3a). Esto es lo que por convención se llama “polaridad normal”. Cabe mencionar que, aunque el polo norte magnético y el geomagnético se representan en el norte geográfico en la actualidad, desde el punto de vista físico, el polo norte del dipolo queda en realidad al sur geográfico actual.

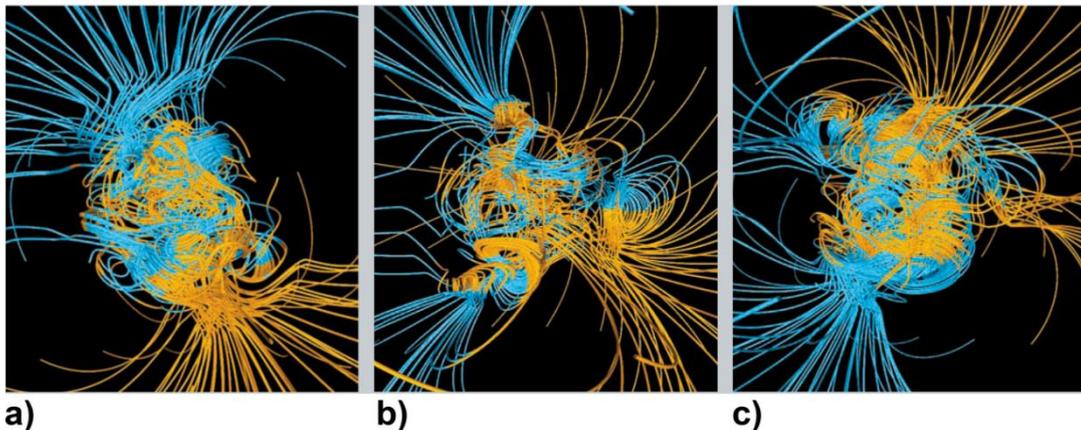


Fig. 2.3. Modelización del campo magnético terrestre (a) en un momento de polaridad normal (500 años antes de una inversión), (b) durante una inversión de polaridad en que desaparece la geometría dipolar y (c) en un momento de polaridad inversa (500 años después de la inversión). Las líneas azules representan las zonas en las que el vector magnético apunta hacia el interior de la Tierra y las naranjas, en las que apunta hacia fuera. [Tomado de Glatzmaier y Olson (2005)]

En otros momentos, el campo magnético puede tener la disposición contraria: el polo sur del dipolo coincide con el sur geográfico y las líneas de campo

2. Fundamentos

salen por el norte geográfico y entran por el sur (Fig. 2.3c). Se produce, por tanto, un cambio de signo en el dipolo axial y se intercambian las posiciones de los polos. A esta última disposición es a la que se llama “polaridad inversa”.

No parece que haya una tendencia al predominio de una u otra polaridad a lo largo del tiempo: el campo magnético ha estado prácticamente la mitad del tiempo en polaridad normal y aproximadamente la otra mitad en polaridad inversa, y en torno a un 1-2 % del tiempo en posiciones intermedias (Tauxe, 2008).

Las inversiones de polaridad son fenómenos globales cuyo origen está en el propio interior de la Tierra pero, a pesar de que los estudios paleomagnéticos y las simulaciones de la dinamo han aportado información muy útil al respecto, aún no se sabe de qué manera exacta se producen. Para una revisión del estado de la cuestión, véase por ejemplo (Glatzmaier y Coe, 2015).

Durante la transición entre una configuración y otra suele producirse una caída del momento magnético del dipolo que hace que la parte no dipolar pase a ser la dominante (Glatzmaier y Coe, 2015; Valet et al., 2012). La intensidad total del CMT se reduce drásticamente, llegando a tener valores de un 10 % de la intensidad que presenta durante periodos de estabilidad (Coe et al., 2000; Tauxe, 2008).

Aunque hay variabilidad según las latitudes (lo cual tiene que ver con el predominio adquirido por la componente no dipolar), la duración del proceso de inversión suele ser del orden de 10^3 - 10^4 años, lo que supone al menos en torno a uno o dos órdenes de magnitud menos que el tiempo durante el cual hay una época de polaridad estable dominada por la geometría dipolar (Glatzmaier y Coe, 2015). Valet et al. (2012) propusieron tres fases para el proceso de inversión: un evento precursor, el momento de intercambio de polaridades propiamente dicho y una fase de rebote (*rebound*). Teniendo en cuenta los datos direccionales, el primero y el último tendrían duraciones de menos de 2500 años y se caracterizan por una gran amplitud de la variación secular (lo cual se relaciona con la disminución del campo dipolar), mientras que el momento en el que las polaridades se intercambian duraría menos de 1000 años. Si se tuvieran en cuenta los valores de intensidad, los intervalos del proceso completo se alargarían, pues cuando aún hay poca disminución del campo dipolar, los cambios direccionales no son tan evidentes. Hay quienes han propuesto períodos de tiempo especialmente breves para el intercambio de polaridades (Bogue y Glen, 2010; Sagnotti et al., 2015). En cualquier caso, se trata de un fenómeno que sucede de manera rápida a escala geológica y del que aún nos queda mucho por saber.

La combinación de estudios paleomagnéticos con los registros de las anomalías magnéticas marinas ha permitido conocer la sucesión de inversiones de polaridad de los últimos 160 millones de años (véanse, p. ej.: Lowrie, 2007 y referencias incluidas en dicho texto). Con todos esos datos se genera la llamada *Geomagnetic polarity timescale* (GPTS), que se va actualizando a medida que se

obtienen nueva información (Gradstein et al., 2004). Esta escala es útil para comparar los datos de polaridad procedentes de secuencias estratigráficas y proceder a su datación.

2.2.2. Excursiones geomagnéticas

Las excursiones geomagnéticas son fenómenos difíciles de definir con precisión y sobre los que existe controversia (véanse p. ej.: Gubbins, 1999; Tauxe, 2008). Se trata de grandes cambios en la dirección del CMT, asociados también a momentos de disminución de la intensidad, tras los cuales no se llega a producir y estabilizar una inversión de polaridad y se vuelve a la configuración previa. En ocasiones se habla de una distancia mayor de 40-45° entre el polo virtual geomagnético (VGP por sus siglas en inglés, *virtual geomagnetic pole*) y el polo medio para el lugar y la época estudiados, para considerar que existe una excursión (Merrill y McElhinny, 1983).

A día de hoy hay muchas incertidumbres acerca de este fenómeno, como por ejemplo, si las excursiones geomagnéticas están relacionadas con grandes cambios vinculados a la variación secular o con inversiones de polaridad incompletas (Gubbins, 1999; Merrill et al., 1997; Roberts, 2008; y referencias incluidas en ellos). Además, mientras que las inversiones de polaridad son fenómenos claramente globales, se ha cuestionado que las excursiones geomagnéticas también lo sean, aunque al menos algunas de ellas sí que están aceptadas como tales (Laj y Channell, 2007; Roberts y Turner, 2013; y referencias incluidas en ellos).

2.2.3. Variación secular

La variación secular (VS) consiste en pequeños cambios en la dirección y la intensidad del CMT ocurridos a una escala temporal que oscila entre años y siglos (Jackson y Finlay, 2007) (Fig. 2.4). Tanto la parte no dipolar del CMT (dominando en períodos más cortos) como la dipolar (cambios más a largo plazo) contribuyen al fenómeno de la VS (Butler, 2004).

Los patrones de variación secular son reproducibles a escala subcontinental, lo cual puede relacionarse con la magnitud de la influencia no dipolar en las distintas zonas del núcleo interno de la Tierra (Butler, 2004). Es por ello que las curvas de referencia de la VS se realizan a escala regional (p. ej.: Gallet et al., 2002; Gómez-Paccard et al., 2006; Kapper et al., 2017; Molina-Cardín et al., 2018; Osete et al., 2015; Schnepf y Lanos, 2005).

2. Fundamentos

El fenómeno de la VS es sobre el que se sustenta principalmente el Arqueomagnetismo, y por ende, esta tesis. La comparación de las direcciones arqueomagnéticas y/o los valores de arqueointensidad registrados en los materiales arqueológicos quemados con las curvas de referencia de la VS permite datar dichos materiales.



Fig. 2.4. Variación secular para los últimos 3000 años en Iberia (valores relocalizados a Madrid). [Modificado a partir de Gómez-Paccard et al., (2006)]

2.3. El registro del campo magnético terrestre en el pasado

En los epígrafes anteriores se ha descrito brevemente cómo es el CMT y qué cambios experimenta a lo largo del tiempo. Ahora, es momento de comprender cómo somos capaces de conocer la manera en la que se comportó el CMT en el pasado a través de los materiales arqueológicos quemados. Para ello, hemos de comenzar explicando las propiedades magnéticas de los sólidos.

2.3.1. Diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo

Las partículas constituyentes del átomo y en especial los electrones son capaces de generar momentos magnéticos. Son dos las fuentes que dan lugar al momento magnético de un átomo: el momento orbital (relacionado con el movimiento de los electrones entorno al núcleo del átomo) y el espín (que es una propiedad intrínseca del electrón). En realidad ésta es una explicación muy simplificada: detrás de esto hay una serie de fundamentos cuánticos complejos que escapan de los límites de este trabajo, pero esta explicación nos sirve de acercamiento a la cuestión (para más información, puede verse, p. ej.: Tauxe, 2008).

Según cómo reaccionen los materiales a la aplicación de un campo magnético externo, se pueden establecer distintos tipos de comportamiento. En primer lugar, encontramos el diamagnetismo. El diamagnetismo tiene su origen en los momentos orbitales de los electrones y es una propiedad de toda la materia. Sin embargo, solo predomina cuando no hay espines de electrones desaparejados. Cuando se aplica un campo externo, la respuesta diamagnética consiste en la generación de una pequeña magnetización en dirección opuesta al campo aplicado (Fig. 2.5a). La magnetización que se adquiere mientras se aplica el campo se denomina magnetización inducida. Si retiramos el campo, los momentos orbitales se reorganizan al azar.

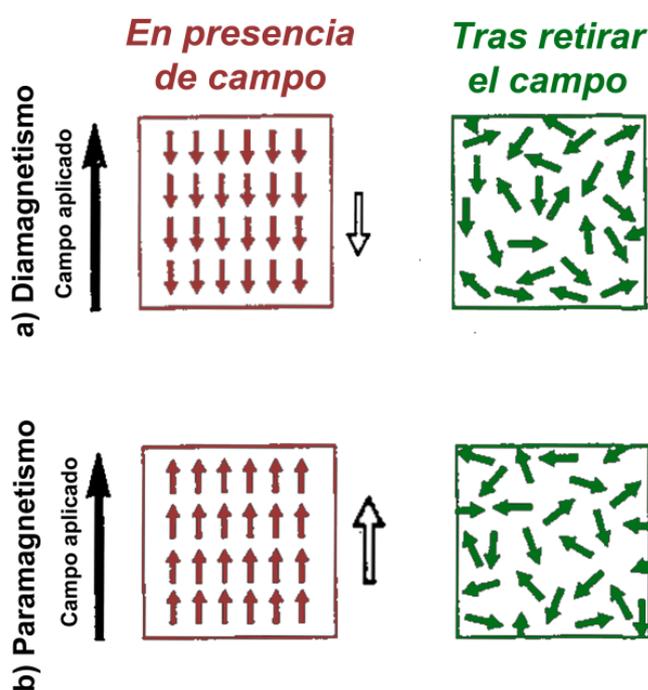


Fig. 2.5. Magnetización en (a) un material diamagnético y (b) un material paramagnético en presencia de un campo aplicado (paneles de la izquierda; la flecha negra representa el campo aplicado y la flecha blanca la magnetización resultante en conjunto para todo el material) y tras retirarlo (paneles de la derecha). [Modificado a partir de Tarling y Hrouda (1993)]

Hay otros casos en los que predomina la influencia de los espines, que aparecen desaparejados. En este caso, se da lo que llamamos paramagnetismo. Si aplicamos un campo externo a un material paramagnético, los momentos magnéticos de espín se alinearán a favor de dicho campo, adquiriendo una magnetización de mayor magnitud que la que adquieren los diamagnéticos (Fig. 2.5b). Si retiramos el campo, la orientación se perderá y la magnetización no se preservará. Esto se debe a que no existe interacción entre los espines adyacentes. Cuando existe una interacción fuerte, la magnetización se mantiene al retirar el campo externo. Esta magnetización preservada es la que llamamos magnetización remanente y es característica del tercer tipo de comportamiento: el ferromagnetismo (*sensu lato*). Los minerales ferromagnéticos contenidos en rocas, materiales quemados y otros materiales son los que nos permiten obtener el registro del campo magnético terrestre en el pasado.

Dentro de los ferromagnéticos (*s.l.*), hay distintos comportamientos. En los materiales ferromagnéticos (*sensu stricto*), los momentos magnéticos de espín son paralelos y su magnitud es uniforme (Fig. 2.6a). Otro tipo de comportamiento ferromagnético es el antiferromagnetismo. En este caso, parte de los momentos magnéticos se alinean de manera paralela al campo aplicado y otra parte en sentido opuesto, pero tienen la misma magnitud (Fig. 2.6b). Si los momentos se alinean de manera totalmente paralela, los momentos magnéticos se compensan unos con otros y la magnetización resultante es nula. Pero si hay cierta desviación de los momentos magnéticos, la magnetización no es nula (es el caso de la hematites, por ejemplo). Por último, encontramos el ferrimagnetismo. Al igual que ocurría con el antiferromagnetismo, parte de los momentos magnéticos se orienta a favor del campo aplicado y parte se orienta en el sentido contrario. Sin embargo, no tienen la misma magnitud y hay una magnetización neta resultante (Fig. 2.6c).

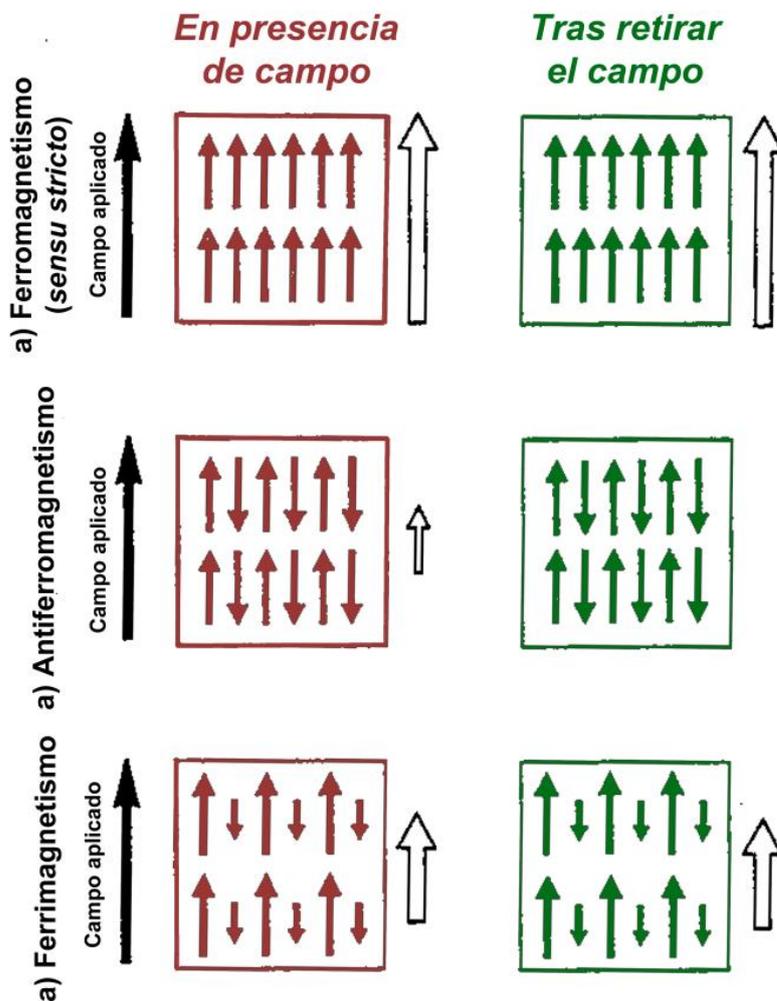


Fig. 2.6. Tipos de comportamientos de los materiales ferromagnéticos (*sensu lato*): (a) ferromagnetismo (*sensu stricto*), (b) antiferromagnetismo, (c) ferrimagnetismo. [Modificado a partir de Tarling y Hrouda (1993)]

Cuando los minerales ferromagnéticos (*s.l.*) son calentados por encima de la llamada temperatura de Curie (o temperatura de Néel si se trata de antiferromagnéticos), éstos se comportan como paramagnéticos. Cuando se

enfían, vuelven a comportarse como ferromagnéticos. La temperatura de Curie es característica de cada mineral.

2.3.2. Teoría de Néel y dominios magnéticos.

Centrándonos ahora en los materiales ferromagnéticos exclusivamente, para comprender mejor cómo se comportan, son esenciales los postulados de Louis Néel (Néel, 1949, 1955), quien describió el modelo básico que establece la relación entre magnetización, campo aplicado, tiempo, temperatura y volumen del grano. La idea de partida es que los granos ferromagnéticos toman la configuración en la que el balance entre energía magnetostática y energía de anisotropía requiera la menor inversión energética. La energía magnetostática depende de la energía potencial producida por su campo magnético externo. La energía de anisotropía depende de la forma del grano y su estructura cristalina.

La configuración más básica es el monodominio (SD, *single domain*). Los granos SD tienen un eje de fácil magnetización, determinado por su forma y su estructura cristalina (Fig. 2.7a). Si no se aplica ningún campo, el momento magnético se alinea con ese eje (en uno u otro sentido del mismo). Si se aplica un campo a favor del eje de fácil magnetización de un grupo de granos SD (sin interacción), veríamos que la magnetización (magnetización espontánea) resultante no variaría, pues todos los momentos magnéticos están ya alineados. Es decir, la magnetización está saturada.

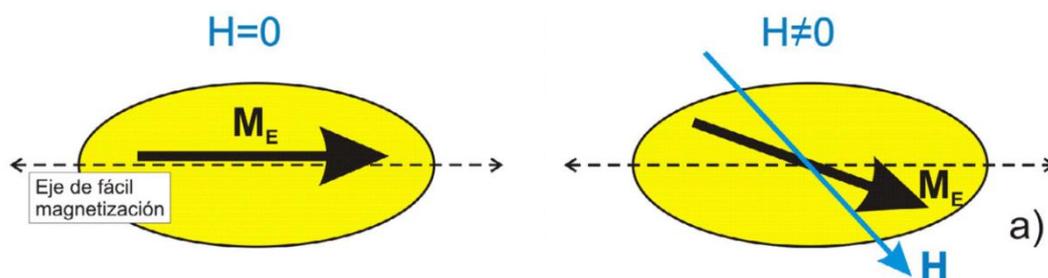


Fig. 2.7. Representación esquemática de un grano ferromagnético monodominio (a) en ausencia de campo y (b) en presencia de campo. La línea discontinua muestra el eje de fácil magnetización, la flecha negra representa el momento magnético (m) y la flecha azul el campo aplicado (H). [Modificado a partir de Villalaín Santamaría (2016b)]

Si se aplica un campo a un grano SD en determinado ángulo respecto al eje de fácil magnetización, el momento magnético se desviará de ese eje de manera

que la configuración energética se minimice (Fig. 2.7b). Si tenemos una población de granos SD orientados aleatoriamente y le aplicamos un campo que alcance la saturación (es decir, que haga que todos los momentos magnéticos se alineen a favor del campo aplicado mientras éste no sea retirado), cuando retiremos el campo, los granos volverán al eje de fácil magnetización, pero en el sentido más cercano a la orientación del campo aplicado. Es por eso que aquellos granos cuya magnetización inicial tenía un ángulo de más de 90° respecto al campo aplicado invertirán el sentido de su magnetización (Fig. 2.8). De esta manera, la magnetización remanente resultante sigue preferentemente la dirección del campo aplicado.

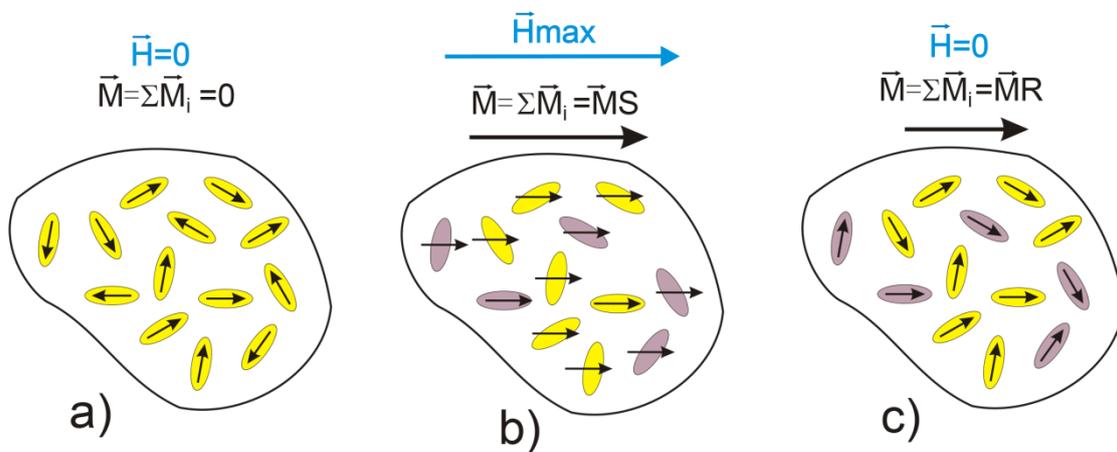


Fig. 2.8. Secuencia del comportamiento de un conjunto de granos ferromagnéticos monodominio (a) orientados al azar en ausencia de campo, (b) al aplicar un campo que los satura y (c) al retirar dicho campo. Las flechas pequeñas negras asociadas a los granos representan sus respectivos momentos magnéticos. La flecha azul en el panel (b) es el campo aplicado y la flecha negra grande representa la magnetización de saturación. En el panel (c), la flecha negra grande representa la magnetización remanente. Los granos coloreados en gris son aquellos que han invertido el sentido de su momento magnético debido al efecto del campo aplicado. [Modificado a partir de Villalaín Santamaría (2016a)].

Además del campo aplicado y del eje de fácil magnetización, en el comportamiento magnético de los granos monodominio entran en juego otras variables. La temperatura es una de ellas, pues la agitación térmica es capaz de desviar (e incluso invertir) el momento magnético de los granos respecto al eje de fácil magnetización. Otra variable es el volumen del grano. Tanto temperatura como volumen condicionan un tercer parámetro: el tiempo de relajación. Para un grupo de granos monodominio sin interacción, el tiempo de relajación consiste en

el tiempo necesario para que decaiga la magnetización remanente en una cierta fracción (Ecuación 1.1). Las diferencias en tamaño de grano y temperatura pueden hacer que el tiempo de relajación pase de ser del orden de unos segundos a millones de años. Es decir, que la magnetización remanente se preserve unos segundos (inestable) o millones de años (estable).

(1.1)

$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left[\frac{Kv}{kT}\right]$$

Ecuación para el cálculo del tiempo de relajación (τ) de un conjunto de granos monodominio con igual volumen, donde C es el factor de frecuencia, K es la constante de anisotropía, k la constante de Boltzmann, v el volumen del grano y T la temperatura.

Como se deduce de la ecuación 1.1, a menor volumen, menor tiempo de relajación (y, por tanto, menor estabilidad de la magnetización remanente). Por su parte, si aumentamos la temperatura, el tiempo de relajación también se reduce. Es decir, existe una relación directa entre τ y volumen, y una relación inversa entre τ y temperatura.

Aunque hasta ahora hemos hablado de granos SD (y sin interacción), existen distintas categorías -con diferentes comportamientos- que se basan fundamentalmente en el tamaño de los granos. El límite de tamaño de grano utilizado para establecer las distintas categorías es específico para cada mineral ferromagnético. Los granos más pequeños son los llamados *superparamagnéticos (SP)*. Estos son también granos SD cuyo tiempo de relajación a temperatura ambiente es muy pequeño (del orden de segundos o minutos) debido a su pequeño volumen, de modo que no registran una magnetización remanente estable. Le siguen los granos *monodominio estable (SSD)*, de los que hemos hablado anteriormente, que tienen un tamaño mayor y son los que presentan el mejor registro para realizar estudios paleomagnéticos. En granos aún más grandes la energía magnetostática crece mucho en la configuración monodominio, de modo que para reducir el coste de energía, los momentos magnéticos se dividen en regiones diferentes con distintas direcciones que se denominan dominios magnéticos y que están separadas por paredes de dominios. Se trata de los granos *multidominio (MD, multidomain)*. En este caso, su funcionamiento es más complejo que los monodominio y son menos estables para el paleomagnetismo ya que el campo necesario para desplazar las paredes es muy pequeño. Cuando los granos son algo más grandes que los SD pero el número de dominios es pequeño, hablamos de granos *pseudo-monodominio (PSD, pseudo-single domain)*; recientemente denominados *vortex state particles* en Roberts et al. (2017), pues se

comportan de forma similar a los monodominio. Estos granos también pueden ser útiles para los análisis paleomagnéticos.

2.3.3. Mecanismos de registro de la magnetización remanente en los materiales arqueológicos quemados

Como hemos comentado previamente, los materiales arqueológicos quemados (hornos, hogares, cerámicas, etc.) son susceptibles de presentar minerales ferromagnéticos (*s.l.*) en su composición. Éstos pueden estar presentes en mayor o menor medida antes del calentamiento, pero debido al efecto del calor es muy común que haya transformaciones de los minerales pre-existentes que hagan que se formen nuevos minerales ferromagnéticos, incrementándose así su concentración en muchos casos. Es por esto que los materiales arqueológicos quemados son muy buenos candidatos para registrar la dirección y/o la intensidad del CMT. La forma en la que adquieren la magnetización remanente puede variar de unos materiales quemados a otros. Ya hemos descrito el modelo teórico que explica el comportamiento de los materiales ferromagnéticos, pero ahora hemos de hablar de los distintos procesos por los que los materiales que contienen minerales ferromagnéticos pueden adquirir y preservar una remanencia de manera natural (es decir, sin aplicar ningún proceso artificial en el laboratorio). A continuación, se describen los principales mecanismos de registro de la *magnetización remanente natural* (NRM, de sus siglas en inglés: *natural remanent magnetization*).

En primer lugar, encontramos la **magnetización termorremanente o termorremanencia** (TRM por su denominación en inglés: *thermal remanent magnetization*). Ésta es adquirida cuando, después de haber calentado un material ferromagnético (*s.l.*) por encima de la temperatura de Curie, éste se enfría en presencia de un campo magnético.

Es importante introducir el concepto de temperatura de bloqueo [T_B], que guarda relación directa con la ecuación que mencionábamos en el epígrafe anterior (**Ecuación 1.1**). Cuando se alcanza la temperatura bloqueo, el tiempo de relajación del grano ferromagnético se reduce y es del orden de la duración de la experimentación de laboratorio (10^2 - 10^3 segundos). La T_B es siempre menor que la T_C y está influenciada por el tamaño del grano ferromagnético y su forma. Cuando se calientan los granos por encima de la T_B pero por debajo de la T_C , éstos se comportan como superparamagnéticos debido al efecto de la agitación térmica y a la reducción del tiempo de relajación. Al enfriarse por debajo de la temperatura de bloqueo en presencia de un campo magnético, los momentos magnéticos de los granos ferromagnéticos quedan bloqueados (su tiempo de relajación vuelve a

aumentar al reducirse la temperatura) orientados paralelamente a la dirección de dicho campo. (Fig. 2.9).

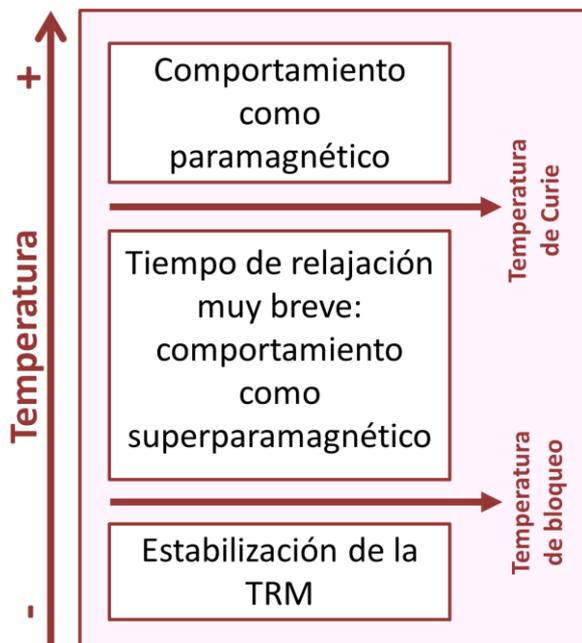


Fig. 2.9. Esquema en el que se resume el comportamiento de los ferromagnéticos (*s.l.*) en relación a la temperatura durante el proceso de adquisición de la termorremanencia.

Si la temperatura máxima alcanzada por un material al adquirir la remanencia supera la T_c , hablamos de una termorremanencia completa (TRM). Sin embargo, si no se ha alcanzado la T_c , hablamos de una termorremanencia parcial (pTRM).

Otro mecanismo de registro es la **magnetización remanente química (CRM, *chemical remanent magnetization*)**. En este caso, la magnetización se adquiere cuando se genera un nuevo mineral ferromagnético (Butler, 2004; Tauxe, 2008) en presencia de un campo magnético, debido a la alteración de un mineral preexistente o por precipitación de minerales ferromagnéticos desde una solución. El mecanismo es similar al de la termorremanencia, sólo que en este caso se asume que la temperatura es constante y lo que cambia es el volumen. Cuando el grano alcanza cierto volumen denominado volumen crítico, el tiempo de relajación aumenta bruscamente bloqueándose la magnetización. (Dunlop y Özdemir, 1997) prefieren llamar a este mecanismo magnetización remanente cristalina (*Crystallization remanent magnetization*), pues no necesariamente han de darse cambios químicos propiamente dichos para que tenga lugar este mecanismo.

Dunlop y Özdemir (1997) mencionan otro mecanismo de registro que denominan **magnetización remanente termoquímica (TCRM, *thermo-chemical remanent magnetization*)**. Este mecanismo se asocia a materiales que han sido calentados y que experimentan un aumento del volumen de los granos ferromagnéticos por debajo de la T_c durante el proceso de enfriamiento. El registro

direcciona asociado a este tipo de magnetización no queda comprometido, pues tiene lugar durante proceso de enfriamiento, al igual que el aumento de volumen de granos.

Durante el depósito y consolidación de materiales sedimentarios se da otro tipo de mecanismo denominado **magnetización remanente detrítica (DRM, detrital remanent magnetization)**. Ésta se adquiere cuando los granos ferromagnéticos que en el futuro formarán una roca sedimentaria se depositan en un ambiente que permite cierta libertad de movimiento (por ejemplo, en aguas tranquilas) en presencia del campo magnético terrestre (Fig. 2.10). Debido a la adaptación del grano a la superficie donde se deposita, se puede dar una reducción sistemática de la inclinación. Cuando hay una reorientación de los granos entre el depósito y la consolidación del sedimento en el que se incluyen, se habla de magnetización remanente post-deposicional (pDRM).

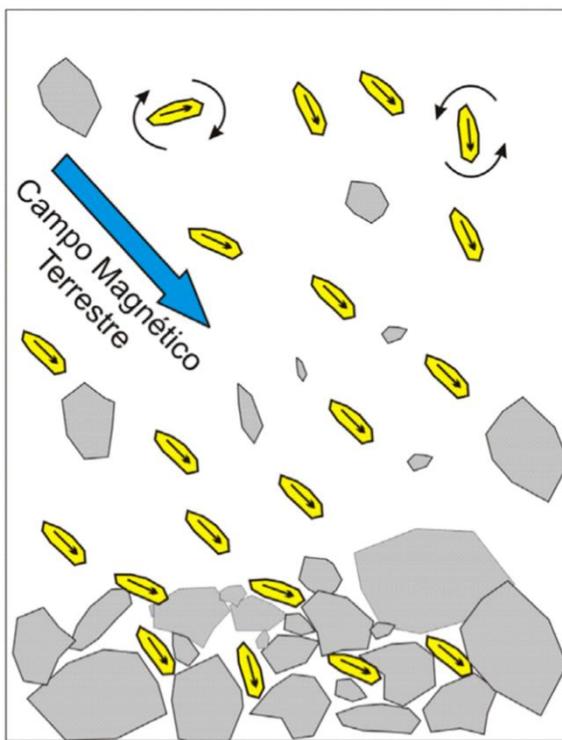


Fig. 2.10. Representación esquemática del modelo de adquisición de la magnetización remanente detrítica. [Tomado de Villalaín Santamaría (2016a)]

Por último, encontramos la **magnetización remanente viscosa (VRM, viscous remanent magnetization)**. Aquí el registro se adquiere por la exposición de los materiales a un campo magnético débil a lo largo del tiempo a temperatura constante. Por ejemplo, si un determinado material está expuesto al campo magnético terrestre durante cierto tiempo, los granos con tiempos de relajación menores que ese tiempo se desbloquearán y se reorientarán a favor de dicho campo.

Centrándonos ahora en el caso concreto de los materiales arqueológicos quemados, la termorremanencia -completa o parcial- es el mecanismo más común.

Sin embargo, como se comentaba al inicio de este epígrafe, es frecuente que, debido al efecto del calor, se produzcan cambios químicos que den lugar a una magnetización química o termoquímica. Si el cambio químico se produce durante el calentamiento (ya sea por encima o por debajo de la temperatura de Curie), la dirección registrada será la misma que si sólo tuviera lugar un mecanismo térmico sin cambio químico. Incluso si se diera un cambio químico durante el enfriamiento, esto tampoco comprometería el registro direccional, pues el enfriamiento de estos materiales es breve y la dirección del campo magnético terrestre no varía de manera significativa en ese período de tiempo. Estas características son las que hacen que los materiales arqueológicos sean muy útiles para detectar y evaluar los cambios vinculados al fenómeno de la variación secular (SV): su registro corresponde a un momento muy concreto en el tiempo, cuya fecha puede ser conocida con bastante precisión en muchos casos mediante dataciones independientes (radiocarbono, termoluminiscencia, etc.).

3. Metodología

3.1. Trabajo de campo

3.2. Trabajo de laboratorio

3.2.1. Preparación de muestras

3.2.1.1. Muestras extraídas con dispositivo de materiales blandos

3.2.1.2. Bloques de mano

3.2.1.3. Muestra suelta

3.2.2. Análisis paleomagnéticos

3.2.3. Estudio de las propiedades magnéticas

3.2.3.1. Susceptibilidad magnética

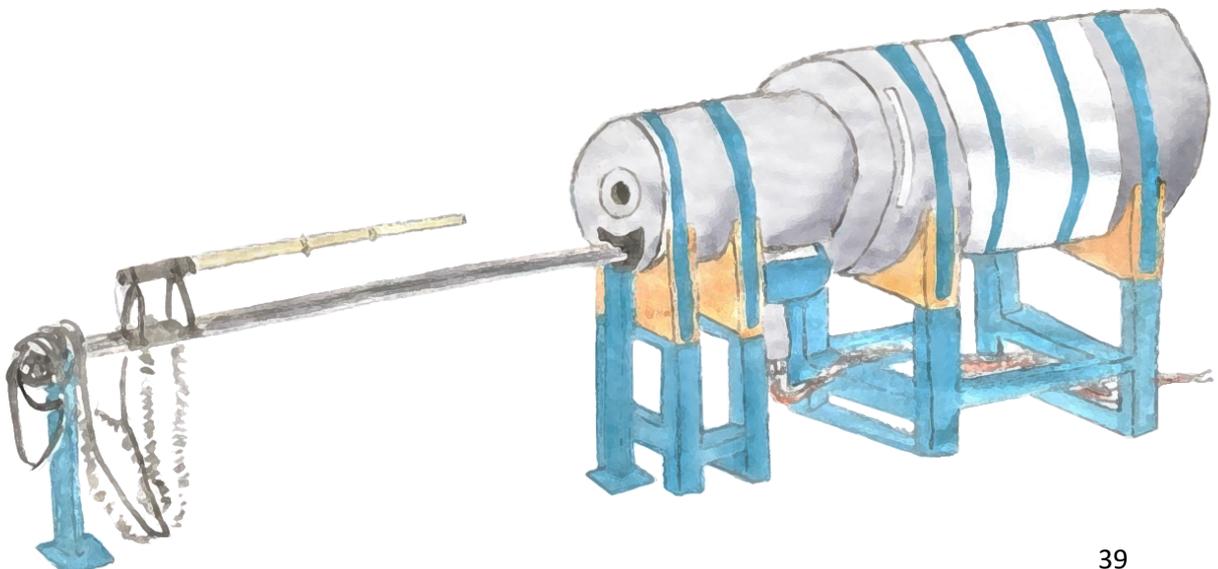
3.2.3.2. Anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM)

3.2.3.3. Adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM) y curvas de *backfield*

3.2.3.4. Anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (ARM)

3.2.3.5. Ciclos de histéresis

3.2.3.6. Curvas termomagnéticas



3.1 Trabajo de campo

Para el desarrollo de la presente tesis ha sido necesaria la realización del trabajo de campo para la recogida de muestras y la evaluación en detalle los distintos contextos estudiados.

Se ha recogido tanto muestra suelta como muestra orientada. En el primero de los casos, las muestras consisten en unos pocos gramos de material que se destinan a experimentos de magnetismo de las rocas. Por su parte, la finalidad de las muestras orientadas es la desmagnetización de la magnetización remanente natural (NRM) para la obtención de datos direccionales. En este caso, se han seguido dos técnicas de extracción. La elección de una u otra ha dependido de la accesibilidad de los materiales.

La primera técnica para la extracción de muestras orientadas consiste en el uso de un dispositivo diseñado específicamente para materiales blandos (Fig. 3.1), basado en un diseño previo del profesor Friedrich Heller e implementado durante los trabajos de la tesis del Dr. Ángel Carrancho (Carrancho, 2010). Este dispositivo se utilizó para recoger materiales que aparecen expuestos en perfiles. Para ello, se presiona el tubo del dispositivo contra la zona de interés y con la ayuda de la brújula que lleva incorporada se toma el azimut. El propio nivel de burbuja de la brújula permite también hacer que la inclinación de la perforación sea sistemáticamente 0° .

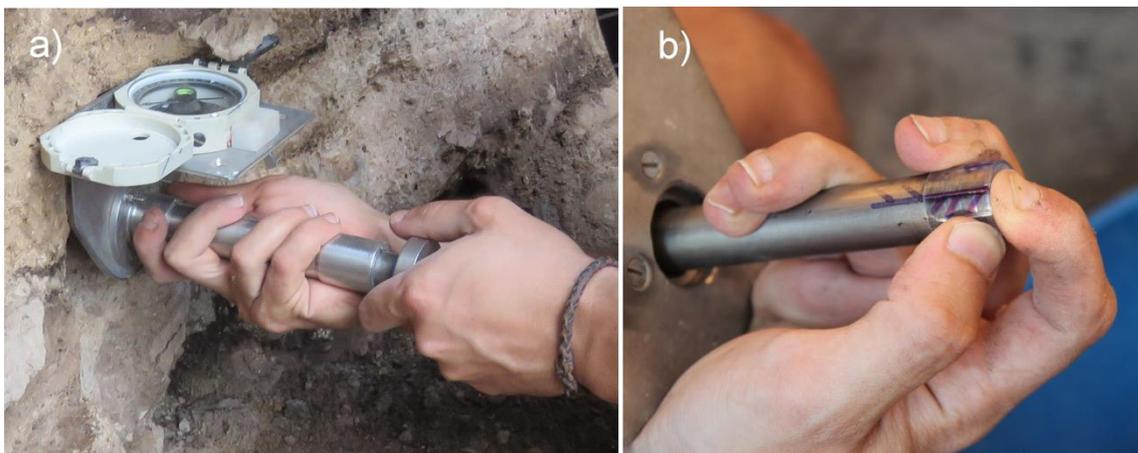


Fig. 3.1. (a) Dispositivo utilizado para el muestreo de materiales expuestos en perfiles estratigráficos. La brújula adosada permite hacer la lectura del Azimut. (b) Proceso de inyección de una muestra en una cápsula, donde se puede ver cómo se hace coincidir el eje Z del tubo del dispositivo con el de la cápsula. [Fotos cortesía de equipo investigador de El Salt (a) y Sven Kleinhapl (b)].

3. Metodología

Las muestras extraídas con este dispositivo fueron inyectadas en cápsulas cilíndricas de aproximadamente 3.6 cm³. Según si los especímenes iban a ser desmagnetizados por campos alternos o térmicamente, se introdujeron en cápsulas de plástico o cuarzo, respectivamente (Fig. 3.2). Puesto que las cápsulas de cuarzo no disponen de tapa, los materiales encapsulados en ellas fueron en muchos casos consolidados en el propio yacimiento con ayuda de una solución de silicato de Sodio (75%) y agua (25%) pulverizada, facilitando así su conservación durante el traslado al laboratorio.

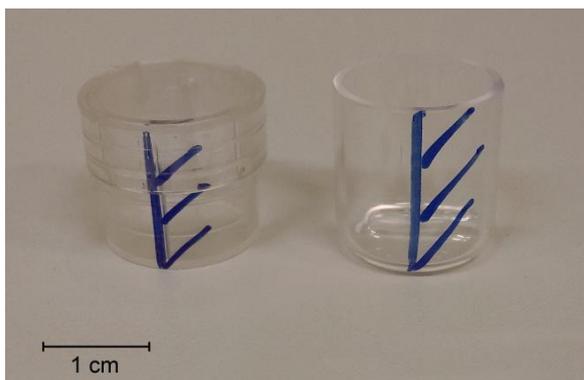


Fig. 3.2. Cápsulas utilizadas para inyectar los materiales extraídos con el dispositivo para muestrear materiales blandos. A la izquierda, cápsula de plástico; a la derecha, cápsula de cuarzo).

Para algunas muestras destinadas a la desmagnetización térmica (en concreto, las del Abrigo de La Castañera, Cantabria) no se disponía de cápsulas de cuarzo y se utilizaron cubitos de escayola realizados en el laboratorio antes del trabajo de campo (Fig. 3.3).



Fig. 3.3. Proceso de creación de cubos de escayola para insertar muestras tomadas con el dispositivo de blandos: (a) moldes cúbicos; (b) molde de silicona replicando el interior de las cápsulas de plástico; (c) cubo en proceso, donde se ve el molde de silicona inmerso en la escayola. Una vez que esta se seca un poco, se extrae el molde de silicona, quedando impreso su negativo (que es donde se introducirá la muestra). [Modificado a partir de Carrancho (2010)]

Para crearlos, se comienza por verter un poco de escayola en un molde cúbico de cartón (cuyo interior corresponde a un volumen total de unos 8-10 cm³ aproximadamente, Fig. 3.3a) para crear una base. Se deja secar un poco y se introduce una pieza de silicona que replica el interior de las cápsulas de plástico (Fig. 3.3b). Se vuelve a verter escayola hasta el límite superior de la silicona (Fig. 3.3c). De esta manera, cuando la escayola fragua, se extrae el molde de silicona

quedando su negativo, que es donde se inyecta la muestra. Antes de su uso en el campo, los cubos fueron desmagnetizados mediante la aplicación de campos alternos decrecientes con un campo de pico de al menos 60-70 mT, para reducir el efecto de posibles impurezas de la escayola. Este proceso fue implementado también durante el desarrollo de la tesis del Dr. Ángel Carrancho (para más detalles, véase: Carrancho, 2010).

La otra técnica para tomar muestras orientadas consistió en la extracción de bloques de mano y se utilizó para muestrear materiales que aparecían en un plano horizontal o subhorizontal. Para extraer los bloques de mano, en primer lugar, hay que delimitar el área de interés y, a continuación, excavar a su alrededor hasta que dicha área quede aislada (Fig. 3.4a). Después, se cubre con escayola (Fig. 3.4b), nivelando el plano superior hasta garantizar un plano horizontal (inclinación de 0°) con ayuda de una plancha de metacrilato y un nivel de burbuja (Fig. 3.4c). Cuando la escayola se ha secado, se marca un vector de referencia en el plano superior y se anota su Azimut. En este trabajo se ha registrado sistemáticamente un vector de referencia con azimut de 0° (es decir, se marcó el norte magnético). Llegados a este punto, el bloque ya está listo para ser extraído (Fig. 3.4d).

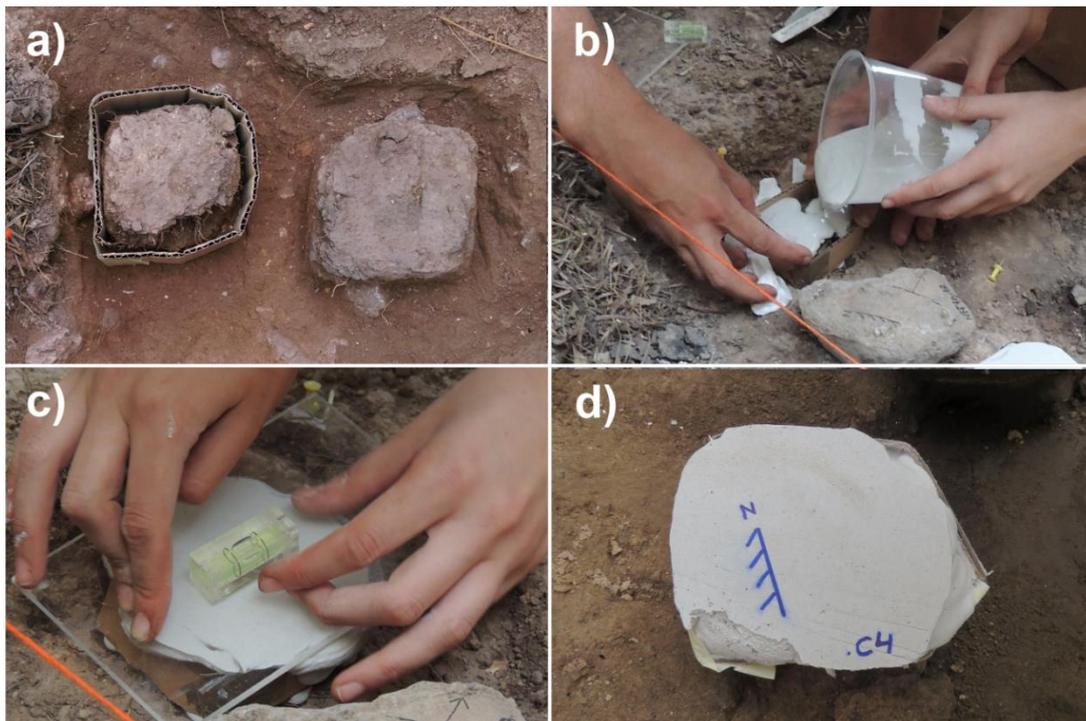


Fig. 3.4. Proceso de extracción de bloques de mano: (a) delimitación del área de extracción de dos bloques de mano, (b) vertido de escayola, (c) nivelado del plano superior y (d) bloque preparado para la extracción. [Imágenes (b), (c) y (d) cortesía del Equipo Investigador de El Salt]

3.2. Trabajo de laboratorio

3.2.1. Preparación de muestras

No todas las muestras extraídas requirieron de preparación al llegar al laboratorio. Sin embargo, algunas de ellas debieron de ser sometidas a determinados tratamientos antes de poder proceder a su análisis. A continuación se describen los distintos procesos llevados a cabo.

3.2.1.1. Muestras extraídas con dispositivo de materiales blandos

Las muestras inyectadas en cubos de escayola tuvieron que ser tapadas con una pequeña cantidad de escayola para poder ser colocadas en el magnetómetro sin que los materiales se desparramaran. Por su parte, las muestras en cápsulas de cuarzo requirieron en ocasiones de un procesado previo a los análisis. Inicialmente, se colocaba una pequeña tapa de escayola, al igual que se hacía con los cubos. Pero esta técnica no siempre resultaba exitosa, pues la escayola no se adhiere bien al cuarzo, permitiendo su caída (con la consiguiente pérdida, en la mayoría de los casos, de los materiales que había dentro de la cápsula). Posteriormente, se observó que consolidando los materiales con una mezcla de silicato de sodio y agua (75% y 25% respectivamente), los materiales se endurecían lo suficiente como para no derramarse, de modo que no era necesaria una tapa. Como se comentó en el apartado anterior, el proceso de consolidación pasó con frecuencia a ser realizado directamente en el campo con ayuda de un pulverizador, aunque algunas veces, las muestras tuvieron que ser impregnadas en el laboratorio (bien porque no fueron tratadas en el campo o bien porque se decidió hacer una segunda consolidación debido a su fragilidad). Las cápsulas de plástico no necesitaron de ningún tipo de tratamiento puesto que tenían tapas a medida y, además, la desmagnetización por campos alternos afecta menos su preservación.

3.2.1.2. Bloques de mano

Los bloques de mano necesitaron un mayor procesado en el laboratorio y el protocolo fue variando durante el desarrollo del trabajo. Inicialmente, al llegar al laboratorio, simplemente se cubrían con escayola las zonas en las que las facies muestreadas habían quedado expuestas y directamente se procedía a cortar los bloques hasta obtener cubos. El cortado se realizó en seco para evitar la disgregación de los materiales. El azimut sirvió de referencia para generar cortes paralelos y perpendiculares que permitieran obtener cubos de unos 10 cm³. Este

proceso entrañaba un importante riesgo de pérdida de muestras. Además, debido a la forma irregular de los bloques, el cortado siguiendo el Azimut era complejo. Por estas razones, a medida que el trabajo de investigación se fue desarrollando, se decidió modificar este procedimiento, siguiendo los consejos de la Dra. Alicia Palencia Ortás. En primer lugar, se comenzó por consolidar los bloques de mano, que fueron sumergidos en una mezcla de silicato de sodio (75%) y agua (25%) durante periodos variables según su comportamiento durante la inmersión (generalmente fueron períodos menores de una hora). Este paso se realizó nada más llegar del campo, sin realizar ninguna acción previa. Una vez que los bloques consolidados estuvieron bien secos, fueron introducidos en unos moldes hechos a medida en los que se vertió escayola para generar paralelepípedos perfectos (Fig. 3.5a). De esta manera, el corte del bloque y la generación de cubos era mucho más sencillo al poder tomar los lados del paralelepípedo como referencia. Puesto que los bloques originales eran irregulares y el vector trazado en el campo no siempre pudo ser colocado de manera paralela a alguno de los lados del paralelepípedo, se recalculó el nuevo azimut de las paredes del bloque en los casos en que fue necesario (Fig. 3.5b). Al implementar este nuevo procedimiento en el que los bloques son consolidados, se pudo utilizar agua para refrigerar el disco de la cortadora. En los casos en que se observó que el consolidante se había diluido parcialmente debido al agua utilizado para cortar, se sumergió nuevamente el material en la solución de silicato de sodio y agua (bien en la misma proporción utilizada en la primera inmersión o bien aumentando la proporción de silicato, según las necesidades de cada material). El resultado final de todo este proceso fue la obtención de especímenes cúbicos con un volumen aproximado de 10 cm^3 ($2,2 \text{ cm} \times 2,2 \text{ cm} \times 2,2 \text{ cm}$) (Fig. 3.5c).

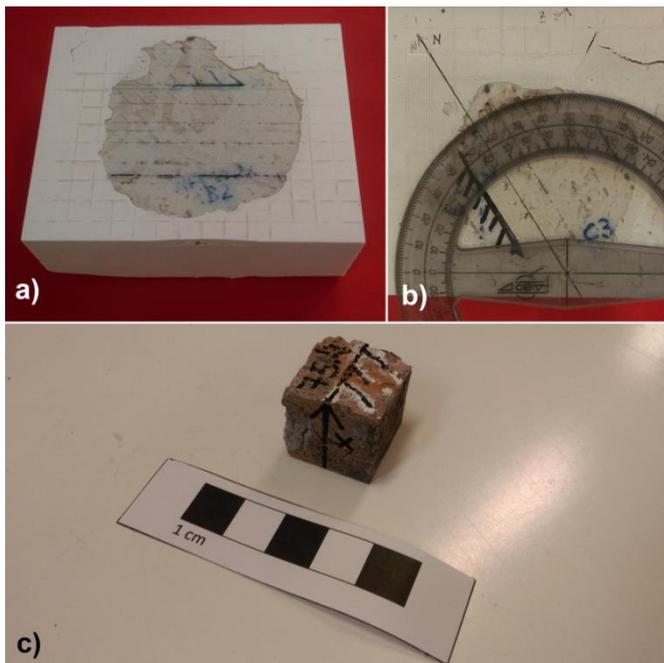


Fig. 3.5. (a) Bloque de mano preparado para ser cortado tras el re-escayolado en el laboratorio. Puesto que el vector originalmente marcado no siempre coincide con el eje que vamos a tomar como referencia durante el cortado y la posterior medida, hay que calcular el nuevo azimut de referencia (b). En la imagen (c) se puede observar uno de los especímenes cúbicos resultantes.

3. Metodología

El proceso de preparación y cortado de los bloques de mano fue llevado a cabo íntegramente en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos, con la única excepción de un par de bloques que tenían un mayor tamaño y cuyo cortado fue realizado en el Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), con ayuda del técnico Carlos Sáiz Domínguez.

3.2.1.3. Muestra suelta

La muestra suelta para la realización de experimentos de propiedades magnéticas con la balanza de traslación de campo variable no necesitó ser procesada. Sin embargo, para la realización de experimentos más específicos (ej.: adquisición muy detallada de la IRM) con el sistema robotizado acoplado al magnetómetro criogénico disponible en la Universidad de Utrecht (Países Bajos), sí se precisó de cierta preparación. Para ello, se utilizaron cápsulas de plástico de unos 10 cm³, en las que se vertió una base de carbonato de calcio (la cantidad justa para cubrir la base de la cápsula) y la cantidad deseada de muestra pulverizada a medir. Esto se mezcló con resina epoxi y se dejó secar. Después, estas muestras fueron fijadas con silicona a unos portamuestras cúbicos diseñados a medida en el laboratorio de paleomagnetismo Fort Hoofddijk de la Universidad de Utrecht (Fig. 3.6). Toda la preparación de estas muestras tuvo lugar en dicho laboratorio.



Fig. 3.6. Muestras preparadas dentro de los portamuestras correspondientes para la adquisición de la IRM con el sistema robotizado acoplado al magnetómetro criogénico.

3.2.2. Análisis paleomagnéticos

Con el fin de obtener datos direccionales, se llevó a cabo la desmagnetización de la magnetización remanente natural (NRM) de las muestras orientadas. La NRM es la suma de la remanencia magnética portada por cada uno de los granos ferromagnéticos que aparecen dentro de un determinado material. Paradójicamente, cuando queremos identificar las componentes paleomagnéticas registradas en un determinado material necesitamos destruir progresiva y selectivamente la NRM para así poder aislar la remanencia portada por las distintas poblaciones de granos.

En este trabajo se han usado dos técnicas de desmagnetización: la desmagnetización térmica y la desmagnetización por campos alternos decrecientes.

Para la desmagnetización por campos alternos (AF por su denominación en inglés: *alternating fields*) se aplica una serie de pasos de campos alternos decrecientes cuyos máximos son progresivamente mayores. En cada paso, se aplica un campo máximo (campo de pico) en un determinado sentido, y después en el opuesto y así sucesivamente, reduciéndose progresivamente la magnitud con cada cambio de sentido (Fig. 3.7). De esta manera, los granos con coercitividad menores que el campo aplicado se van orientando progresivamente a favor de los campos alternos, quedando compensados unos con otros. Con cada nuevo paso se incrementa el campo de pico, y así se va destruyendo la magnetización remanente de poblaciones de granos con coercitividades cada vez mayores.

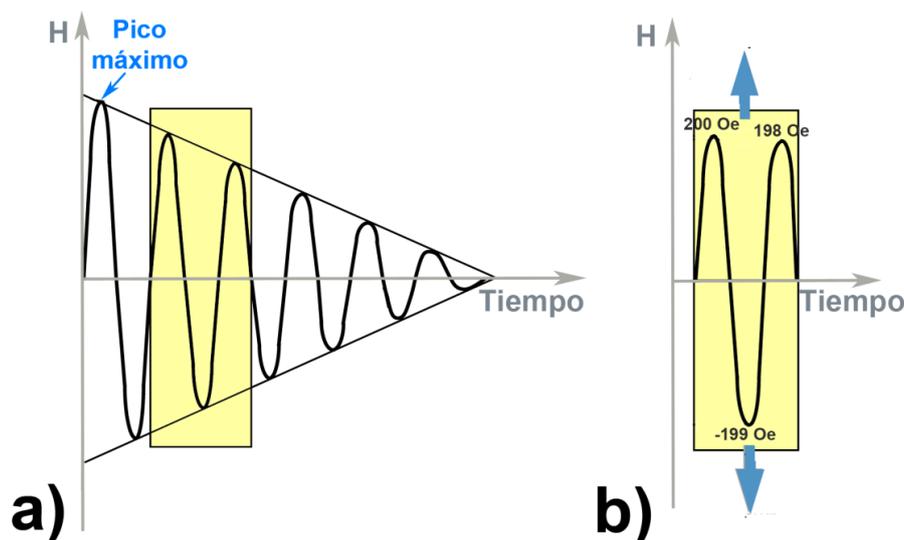


Fig. 3.7. a) Representación gráfica del proceso de desmagnetización por campos alternos. En la imagen (b) se muestra en detalle la zona coloreada en amarillo en la imagen (a). [Modificado a partir de Butler (2004)]

3. Metodología

Para realizar este experimento se utilizó un magnetómetro criogénico 2G-755 con una unidad de AF acoplada en línea en el laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (Fig. 3.8). El campo máximo utilizado en las desmagnetizaciones por AF fue 100 mT, lo cual es suficiente para desmagnetizar minerales de bajas coercitvidades como la magnetita o la maghemita, que son los minerales más comunes en los materiales estudiados.

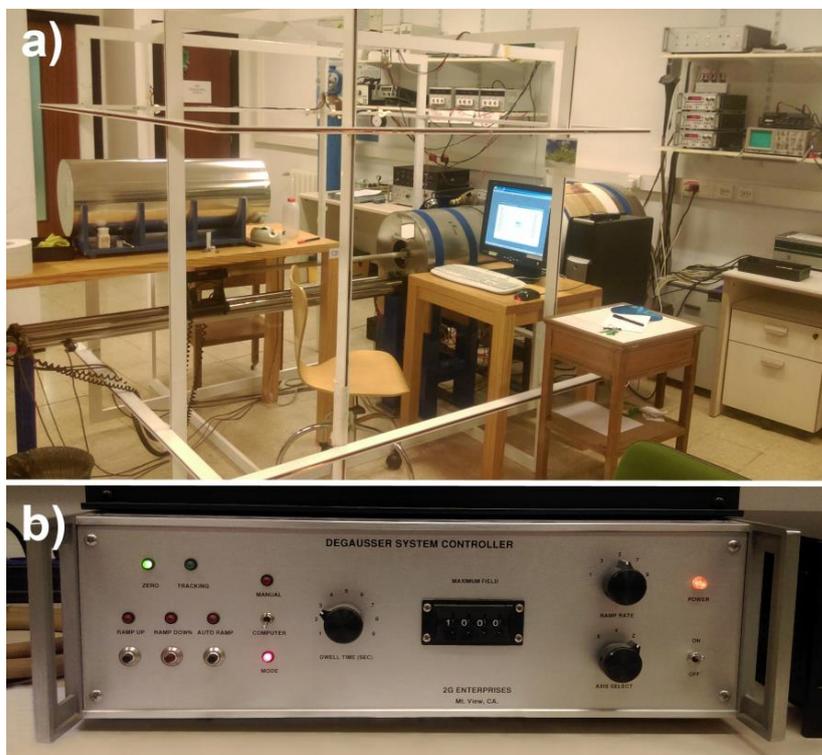


Fig. 3.8. (a) Magnetómetro criogénico 2G-755 del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos y (b) unidad de control de AF.

Por su parte, la desmagnetización térmica consiste en la aplicación de sucesivos pasos de calentamiento con su correspondiente enfriamiento en campo nulo, incrementando la temperatura a cada paso. En este caso, en lugar de espectros de coercitividad, hablamos de temperaturas de desbloqueo de los granos ferromagnéticos. Como comentamos en el anterior capítulo, como efecto de un calentamiento, el tiempo de relajación de los granos ferromagnéticos se puede reducir drásticamente y pueden ser *desbloqueados* en cientos o miles de segundos. Por tanto, si calentamos lo suficiente los granos y los enfriamos en campo nulo en la cámara del horno durante ese tiempo, éstos quedarán orientados aleatoriamente. Considerando que en un material existen distintas poblaciones de granos con distintas temperaturas de desbloqueo (T_{UB}), aquellos granos con temperaturas de desbloqueo inferiores a la temperatura máxima aplicada en un determinado paso quedarán reorganizados al azar y su contribución a la NRM pasará a ser nula. Esta destrucción progresiva de la NRM nos permite nuevamente conocer la contribución a la remanencia de las distintas poblaciones de granos. Es por ello que, tras cada paso de calentamiento/enfriamiento, se mide la NRM con ayuda del magnetómetro criogénico.

Para realizar la desmagnetización térmica se usaron dos hornos: un TD48-SD de ASC con una única cámara (Fig. 3.9a) y un TD48-DC de ASC con doble cámara (una para calentamiento y otra para enfriamiento) (Fig. 3.9b). Esta técnica permite desmagnetizar completamente minerales como la hematites y/o goetita que, debido a su alta coercitividad, quedan sin desmagnetizar cuando se usan campos alternos. Otra ventaja de esta técnica es que permite aislar mejor las termorremanencias parciales que pueden aparecer en los materiales arqueológicos quemados (con la AF es frecuente que se produzcan solapamientos).

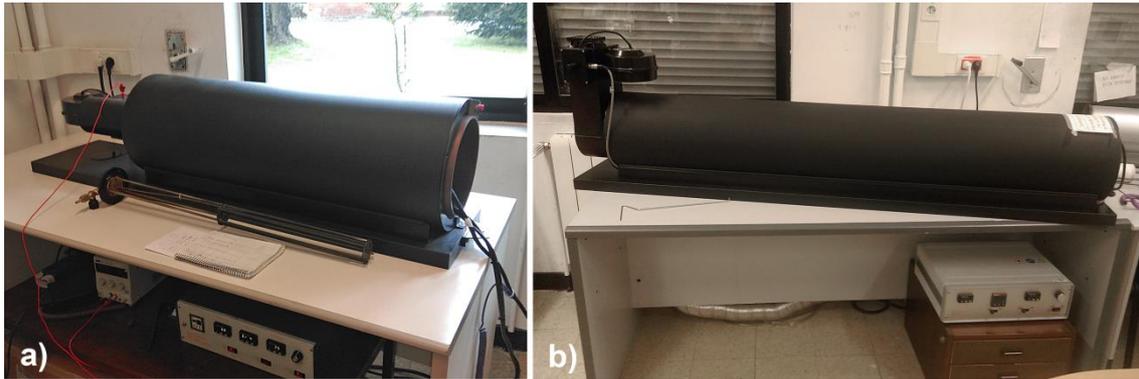


Fig. 3.9. (a) Hornos TD48-SC y (b) TD48-DC del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos.

Todos los análisis paleomagnéticos se llevaron a cabo en el laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos. Para procesar los datos resultantes, se ha utilizado el programa *Remasoft 3.0* (Chadima y Hroudá, 2006).

3.2.3. Estudio de las propiedades magnéticas

El calentamiento experimentado por los materiales quemados tiene efectos determinantes en la mineralogía magnética y en el tipo de mecanismo de registro de la magnetización remanente, por lo que conocer bien las propiedades magnéticas es importante para entender e interpretar la señal resultante (véanse p.e.: Jordanova, 2017; Jordanova et al., 2001). Con este objetivo, se han realizado distintos experimentos que se resumen en los siguientes epígrafes.

3.2.3.1. Susceptibilidad magnética

Cuando se aplica un campo magnético a un material observamos que la expresión de la magnetización inducida es:

(2.1)

$$\mathbf{M} = \chi\mathbf{H}$$

donde H es el campo magnético externo aplicado y χ es la susceptibilidad magnética. La susceptibilidad magnética cuantifica la capacidad que tiene un material para magnetizarse [*"magnetizability"*, en palabras de Butler (2004)].

Recordando las propiedades magnéticas de los sólidos explicadas en el capítulo anterior (apartado 2.3.1.), los minerales diamagnéticos adquieren una pequeña magnetización inducida en sentido contrario al campo aplicado. Esto se traduce en una susceptibilidad magnética pequeña y negativa, independiente de la temperatura. Por su parte, los paramagnéticos adquieren una magnetización inducida algo mayor y a favor del campo aplicado, lo cual implica una susceptibilidad positiva y mayor que la de los diamagnéticos. Además, disminuye cuando se aumenta la temperatura. Por último, los ferromagnéticos adquieren una magnetización inducida mayor a favor del campo magnético aplicado. En este caso, la susceptibilidad también es positiva pero de mayor orden de magnitud que la de los paramagnéticos. De esto se extrae que, cuando medimos la susceptibilidad magnética, la totalidad de los minerales presentes en nuestra muestra (diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos) están aportando su contribución. Sin embargo, debido a las diferencias en la magnitud de la susceptibilidad magnética de diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos, este parámetro es útil para evaluar la concentración de minerales ferromagnéticos. Puesto que la neoformación de minerales ferromagnéticos es muy frecuente cuando existe un proceso térmico, la susceptibilidad magnética puede ayudar a la identificación de materiales quemados y/o distintos grados de alteración térmica (Bellomo, 1993; Jordanova et al., 2001; Morinaga et al., 1999; Zhang et al., 2014).

Para medir la susceptibilidad magnética se ha usado el puente de susceptibilidad Kappabridge KLY-4S de AGICO disponible en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (Fig. 3.10).

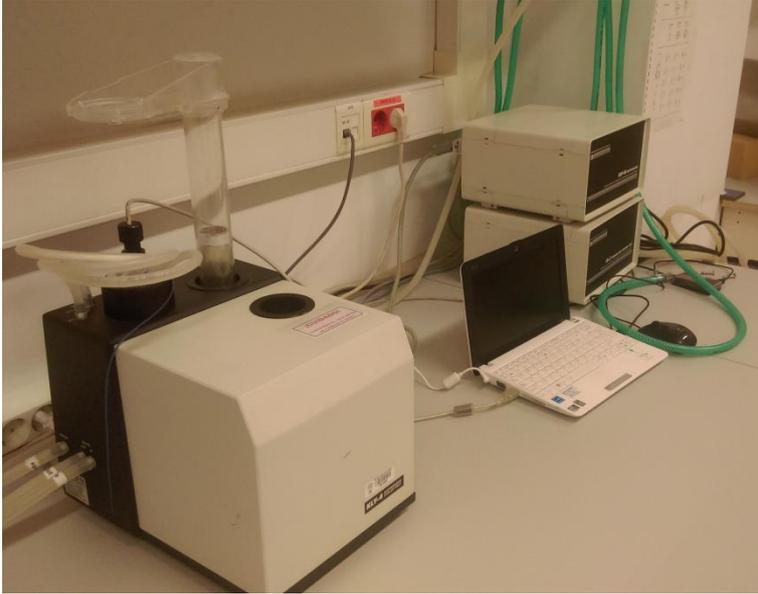


Fig. 3.10. Puente de susceptibilidad KLY-4S (AGICO) del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos.

3.2.3.2. Anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM)

En la mayoría de los casos, los granos de los minerales no se magnetizan de la misma manera dependiendo de la dirección en la que apliquemos el campo. Esto es lo que llamamos anisotropía. Las fuentes de la anisotropía a la escala del grano son fundamentalmente la anisotropía magnetocristalina (su origen está en la propia estructura cristalina) y la anisotropía de forma (depende de la forma del grano y de cómo se distribuyen los momentos magnéticos a lo largo de su superficie del mismo). Si los ejes cristalinos o los ejes de elongación de los granos se distribuyen aleatoriamente en el material, no se observa anisotropía a la escala de la muestra. Sin embargo, si esos ejes tienen una distribución organizada, la muestra manifestará anisotropía magnética (fábrica magnética) que puede interpretarse en términos de ese ordenamiento (textura).

Para evaluar si existen ejes de magnetización preferente y cuál es su orientación (es decir, para conocer lo que llamamos fábrica magnética), se puede medir la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM). Este experimento consiste en la medición de la susceptibilidad magnética de una misma muestra en distintas posiciones, lo cual permite posteriormente calcular el tensor de la susceptibilidad. Hay que recordar que, como comentábamos en el apartado anterior, todos los materiales -diamagnéticos, paramagnéticos o ferromagnéticos- contribuyen a la susceptibilidad magnética. Por consiguiente, todos ellos tendrán su influencia en la anisotropía. Si quisiéramos evaluar sólo la contribución de los

3. Metodología

minerales ferromagnéticos (es decir, únicamente de los minerales que portan la remanencia), deberíamos hacer análisis específicos de anisotropía de la remanencia como la anisotropía de la magnetización termorremanente (ATRM), anisotropía de la magnetización remanente isoterma (AIRM) o anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (AARM).

Cuando se estudia la ASM se analizan las direcciones de tres ejes ortogonales que describen el llamado elipsoide de la susceptibilidad magnética y que, en resumen, es la representación gráfica del tensor de la anisotropía: el eje en el que el valor de susceptibilidad es máximo ($K1$), el eje intermedio ($K2$) y el eje de mínima susceptibilidad ($K3$) (Fig. 3.11). $K1$, $K2$ y $K3$ son los autovalores del tensor. Si estuviésemos ante un material isótropo, la susceptibilidad sería la misma independientemente de la dirección del campo aplicado y, por tanto, $k1 \approx k2 \approx k3$. El elipsoide en este caso tendría forma esférica. No ocurre esto en los materiales en los que existe anisotropía y el valor de susceptibilidad es diferente según la dirección del campo aplicado.

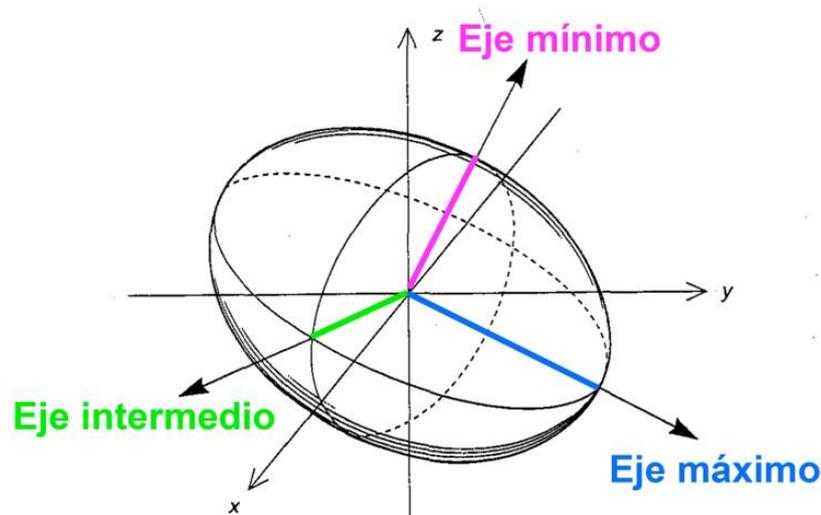


Fig. 3.11. Ejes para definir el elipsoide de susceptibilidad magnética. [Modificado a partir de Tarling y Hrouda (1993)]

Comúnmente se usan tres tipologías basadas en la diferencia entre los autovalores $K1$, $K2$ y $K3$ para describir la morfología del elipsoide de susceptibilidad de los materiales anisótropos:

* $K1 > K2 > K3 \rightarrow$ elipsoide triaxial (Fig. 3.12a)

* $K1 > K2 \approx K3 \rightarrow$ *elipsoide prolato* (Fig. 3.12b)

* $K1 \approx K2 > K3 \rightarrow$ elipsoide oblongo (Fig. 3.12c)

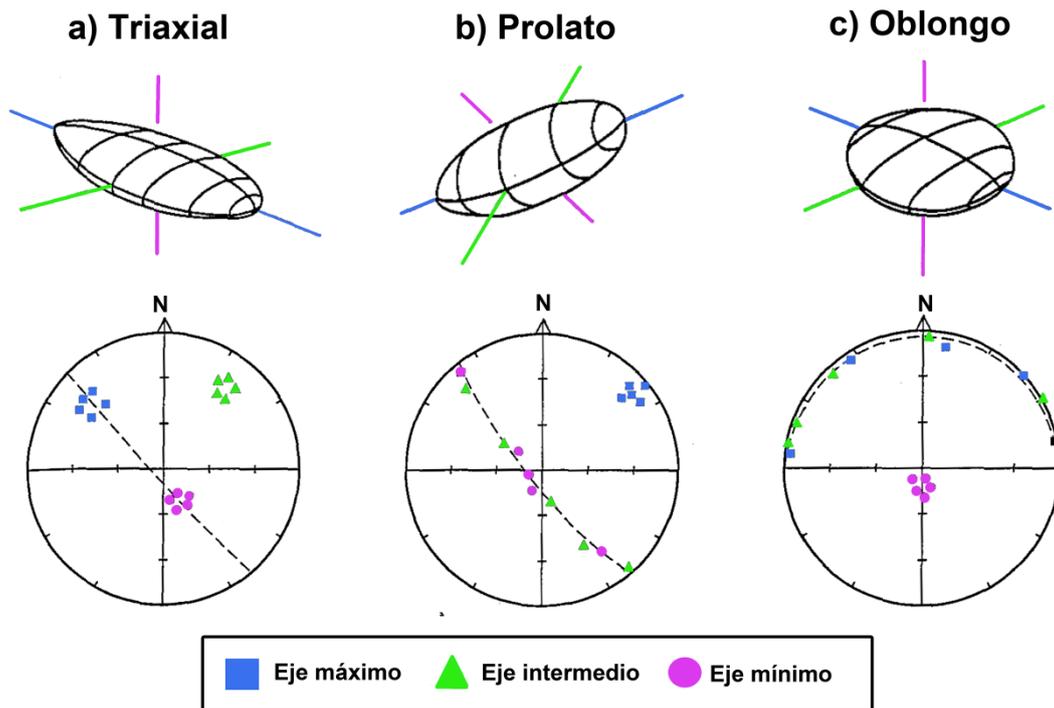


Fig. 3.12. Morfologías del elipsoide de la susceptibilidad magnética: (a) elipsoide triaxial, (b) elipsoide prolato y (c) elipsoide oblongo. Para representar la orientación de los ejes del elipsoide, se utiliza la proyección estereográfica, donde el perímetro de la circunferencia representa el ángulo en el plano horizontal (el Norte está en la parte superior de la circunferencia) y la distancia respecto al centro representa el ángulo de inmersión del eje (0° en el contorno y 90° en el centro). [Modificado a partir de Tarling y Hrouda (1993)]

Además, existen algunos parámetros basados en los autovalores K_1 , K_2 y K_3 que permiten evaluar distintos aspectos como, por ejemplo, el grado de anisotropía (P_j - Jelinek, 1981). [Para más detalles, se puede encontrar un listado con los distintos parámetros reunidos en Tarling y Hrouda (1993)]

La anisotropía de la susceptibilidad magnética permite evaluar diversos procesos que han podido afectar al ordenamiento de los granos en los materiales de estudio, y por tanto su anisotropía, como por ejemplo, paleo-corrientes (en donde lo más frecuente es que haya una orientación del eje máximo paralela sentido del flujo, (Borradaile y Henry, 1997; Hrouda, 1982) o procesos de compactación (donde cabe esperar una orientación preferente del eje mínimo en la vertical). En el caso de los materiales aquí estudiados, se espera que predomine una fábrica sedimentaria, con el eje mínimo perpendicular al plano horizontal, como el representado en la Fig. 3.12c. Debido a la volatilidad de facies como las cenizas, este parámetro resulta de interés para poder evaluar la presencia de alteraciones mecánicas post-deposicionales.

3. Metodología

Las medidas de la anisotropía de la susceptibilidad magnética han sido realizadas con ayuda del puente de susceptibilidad Kappabridge KLY-4S (AGICO) del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos. Para la interpretación de los datos resultantes se utilizó el programa *Anisoft 4.2* (Chadima y Jelinek, 2008).

3.2.3.3. Adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM) y curvas de backfield

Otro experimento de utilidad para la caracterización de las propiedades magnéticas es la adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM). Para realizar este procedimiento, se aplican campos magnéticos cada vez mayores a la muestra, midiendo la remanencia tras la aplicación de cada uno de ellos. De esta manera, se puede llegar a obtener el valor de la *magnetización remanente de saturación* (M_{RS}) (Fig. 3.13). Este parámetro corresponde a la máxima magnetización remanente que puede alcanzar un determinado material. Aunque incrementáramos más el campo aplicado, ésta no aumentaría más. La magnetización remanente de saturación está relacionada con la coercitividad de los minerales presentes en nuestra muestra: si la saturación se alcanza pronto (ej.: en un rango entre 100 y 300 mT), estamos ante minerales de baja coercitividad; si cuesta (o incluso no se consigue) saturar la muestra a pesar de aplicar campos elevados (> 0.5 T), estamos ante minerales de alta coercitividad. Además de esto, la adquisición de la IRM puede ser útil también para evaluar la concentración de minerales ferromagnéticos.

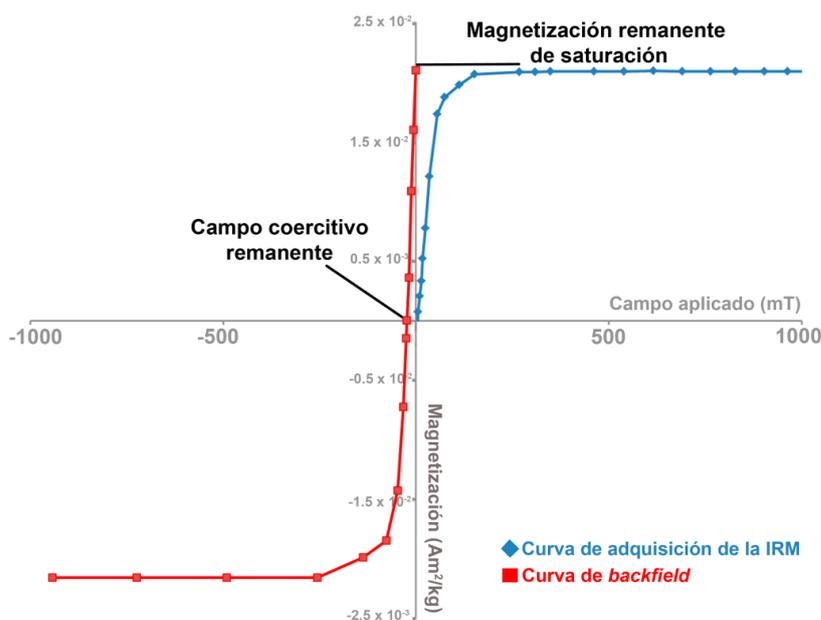


Fig. 3.13. Curva de adquisición de la magnetización remanente isoterma (IRM) y su respectiva curva de *backfield*, mostrando los principales parámetros.

Además de la IRM, podemos realizar otro experimento adicional similar que es la curva de *backfield*. Este procedimiento consiste simplemente en saturar la muestra o aplicar el campo máximo disponible en un sentido (B), e inmediatamente después realizar la adquisición progresiva de la IRM pero aplicando el campo en el sentido opuesto (-B) (Fig. 3.13). Al realizar este experimento, habrá un momento en que la magnetización se reduzca a 0. El campo aplicado para conseguir ese valor es el llamado *campo coercitivo remanente* (B_{CR}) (Fig. 3.13).

Para la adquisición de la IRM se han utilizado dos instrumentos diferentes. Por un lado, se han realizado curvas de adquisición hasta 1 T con la balanza de traslación de campo variable del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (Magnetic Measurements Variable Field Translation Balance) (Fig. 3.14).

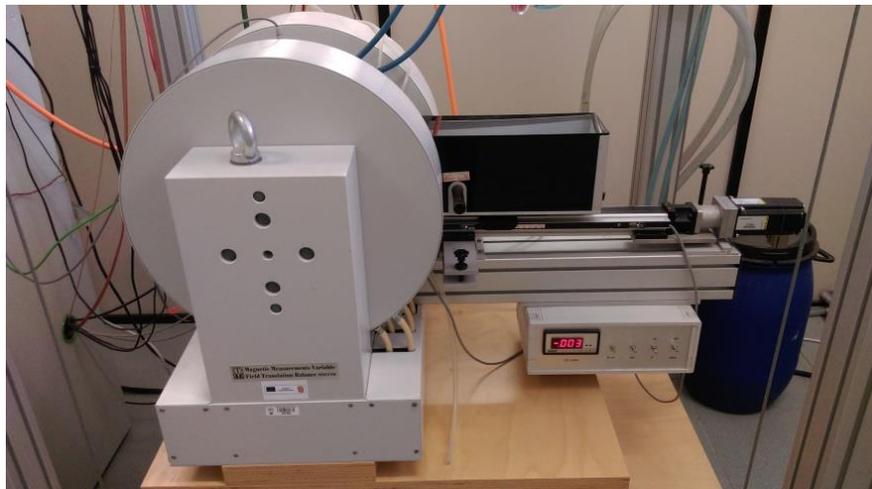


Fig. 3.14. Balanza de traslación de campo variable (Magnetic Measurements Variable Field Translation Balance) del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos.

Por otro lado, se ha utilizado el sistema robotizado implementado en el magnetómetro criogénico DC-SQUID de 2G del Paleomagnetic Laboratory “Fort Hoofddijk” de la Universidad de Utrecht (Fig. 3.15). Este sistema robotizado está equipado con una bobina de pulsos (“*pulse-field coil*”) para la adquisición progresiva de la IRM hasta 700 mT, a lo cual se le añade un sistema neumático que recoge y coloca las muestras (Mullender et al., 2016). Este instrumento genera curvas de IRM más detalladas y menos ruidosas que la balanza de traslación, por lo que sus mediciones son mejores candidatas para la descomposición de componentes de coercitividad.

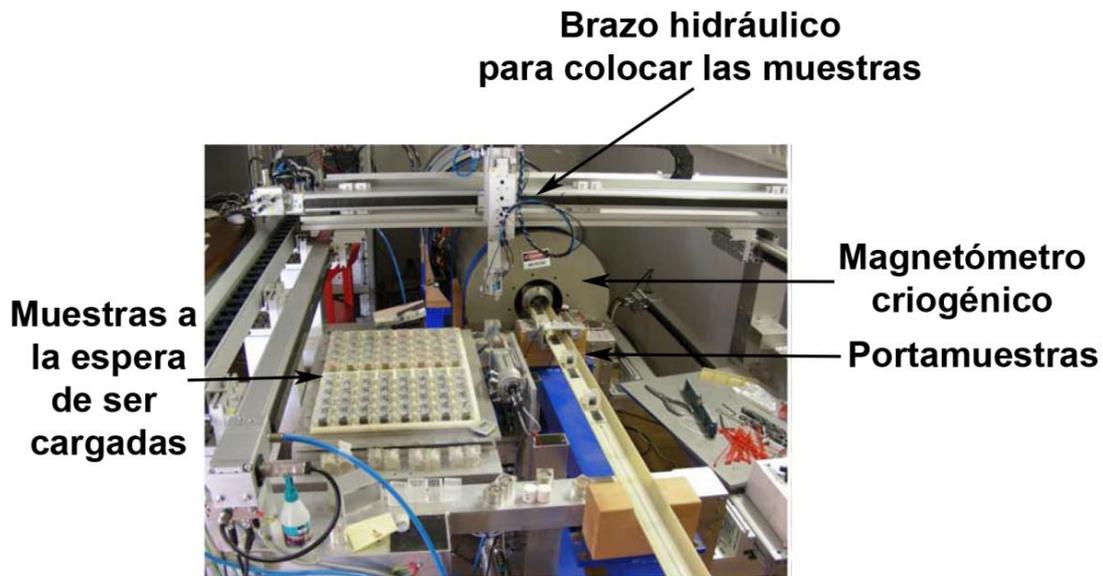


Fig. 3.15. Sistema robotizado implementado en el magnetómetro 2G-DC-SQUID del Fort Hoofddijk de la Universidad de Utrecht. [Modificada a partir de Mullender et al. (2016)]

Todas las curvas de *backfield* incluidas en este trabajo fueron realizadas con la balanza de traslación de campo variable del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos.

Para interpretar tanto los datos de la adquisición de la IRM obtenidos con la balanza de traslación como los de las curvas de *backfield* se ha utilizado el programa *RockMag Analyzer* (Leonhardt, 2006). Además, se ha utilizado el programa diseñado por (Kruiver et al., 2001) para realizar la descomposición de componentes de coercitividad de las muestras medidas con el magnetómetro 2G con sistema robotizado en Utrecht.

3.2.3.4. Anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (ARM)

La magnetización remanente anhisterética (ARM) es un tipo de remanencia que sólo puede adquirirse en el laboratorio. El procedimiento de adquisición consiste en la aplicación de un campo magnético alterno decreciente (AF) y simultáneamente, un campo constante de baja intensidad (en el caso de las medidas realizadas aquí 40 μ T, similar a la intensidad del campo magnético terrestre) en la misma dirección del campo alterno. Debido a la pequeña asimetría que genera el campo constante, los minerales ferromagnéticos con coercitividades

iguales o por debajo del pico máximo de campo alterno quedarán magnetizados a favor de la dirección del campo magnético constante (Fig. 3.16).

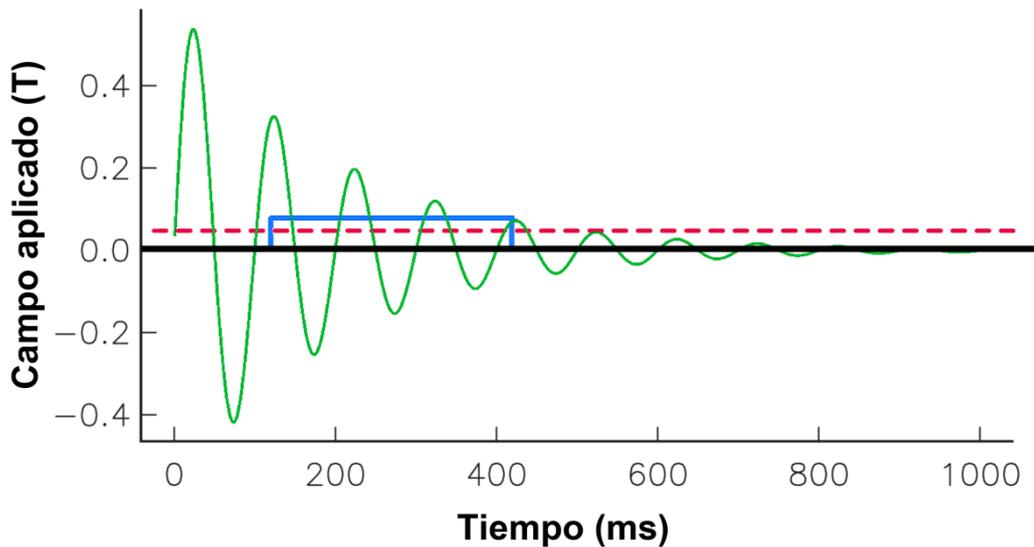


Fig. 3.16. Representación gráfica del proceso de adquisición de la magnetización remanente anhisterética (ARM). La línea de puntos roja representa la adquisición de una ARM total (es decir, manteniendo el campo constante durante todo el tiempo en el que se aplica el campo alterno). La línea continua azul representa una ARM parcial (sólo se aplica el campo constante en determinados momentos de la aplicación de los campos alternos) [Modificado a partir de Tauxe (2008)]

Una aplicación muy interesante y que se ha empleado en este trabajo es la medida de la anisotropía de la ARM (AARM). Si la ARM se aplica en distintas posiciones (al menos 6), se puede calcular el tensor de la anisotropía de la ARM (AARM) (véase p. ej.: McCabe y Jackson, 1985). Esto permite caracterizar la fábrica magnética, tal y como ocurre con la ASM, pero en este caso, la respuesta es exclusivamente portada por los minerales que preservan magnetización remanente (ferromagnéticos). Es decir, los diamagnéticos y paramagnéticos no contribuyen, como sí ocurre en la ASM. En el presente trabajo se ha medido la AARM aplicando la ARM en las nueve direcciones propuestas por (Girdler, 1961) para la ASM (Fig. 3.17) después de haber desmagnetizado los especímenes por campos alternos hasta 100 mT. El campo continuo coaxial aplicado fue de 0.05 mT, y el campo alterno de 50 mT. Tras la aplicación y medida de la ARM en cada posición, se aplicó una AF de 100 mT antes de pasar a la siguiente posición para borrar lo adquirido previamente. La medida de la AARM en 9 posiciones se hizo con un portamuestras específicamente diseñado al efecto en el laboratorio de paleomagnetismo de la UBU. Este experimento se llevó a cabo con ayuda del sistema de inducción de ARM acoplado al magnetómetro criogénico (2G-755) del laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos. El análisis de los

datos ha sido realizado con una hoja de cálculo diseñada por el Dr. Mike Jackson (Institute of Rock Magnetism, Universidad de Minnesota).

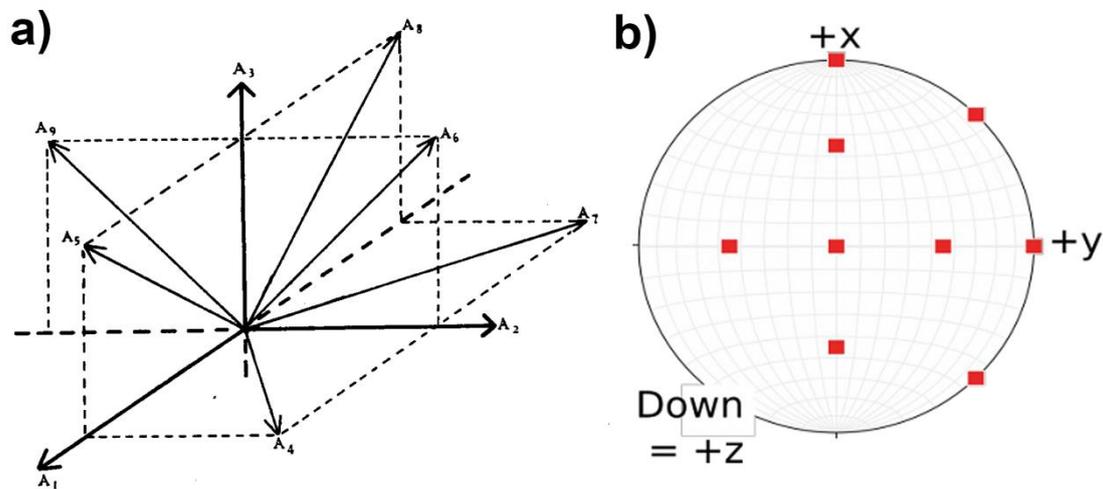


Fig. 3.17. (a) Posiciones de medida propuestas por Girdler (1961) para la anisotropía de la susceptibilidad magnética; (b) representación de las posiciones utilizadas para medir la AARM en este trabajo en una proyección de igual área. [Imagen (a) tomada de Girdler (1961); imagen (b) tomada de Calvin Ballester (2018)]

3.2.3.5. Ciclos de histéresis

Los ciclos de histéresis muestran la variación de la magnetización inducida en función del campo magnético que se aplica en un material. Las mediciones de los ciclos comienzan con la aplicación de un campo magnético progresivamente más intenso (H) con el fin de intentar alcanzar la *magnetización de saturación*, M_s (Fig. 3.18). Este parámetro corresponde a la máxima imanación inducida que puede alcanzar un material, la cual no crecería más incluso si siguiésemos aumentando el campo aplicado. Al igual que ocurre cuando realizamos la adquisición progresiva de la IRM, no siempre es posible alcanzar la magnetización de saturación debido a las limitaciones instrumentales. Cuando se alcanza ese campo intenso, se va reduciendo hasta cero. La magnetización resultante cuando el campo aplicado es 0 corresponde a la *magnetización remanente* (o *magnetización remanente de saturación*, M_{RS} , si se ha alcanzado la saturación) (Fig. 3.18). Entonces, se vuelve a saturar la muestra pero aplicando un campo progresivamente mayor en sentido contrario ($-H$). Cuando se aplica $-H$, hay un momento en el que la magnetización es 0. El valor del campo aplicado justo en ese momento corresponde al *campo coercitivo* (B_c).

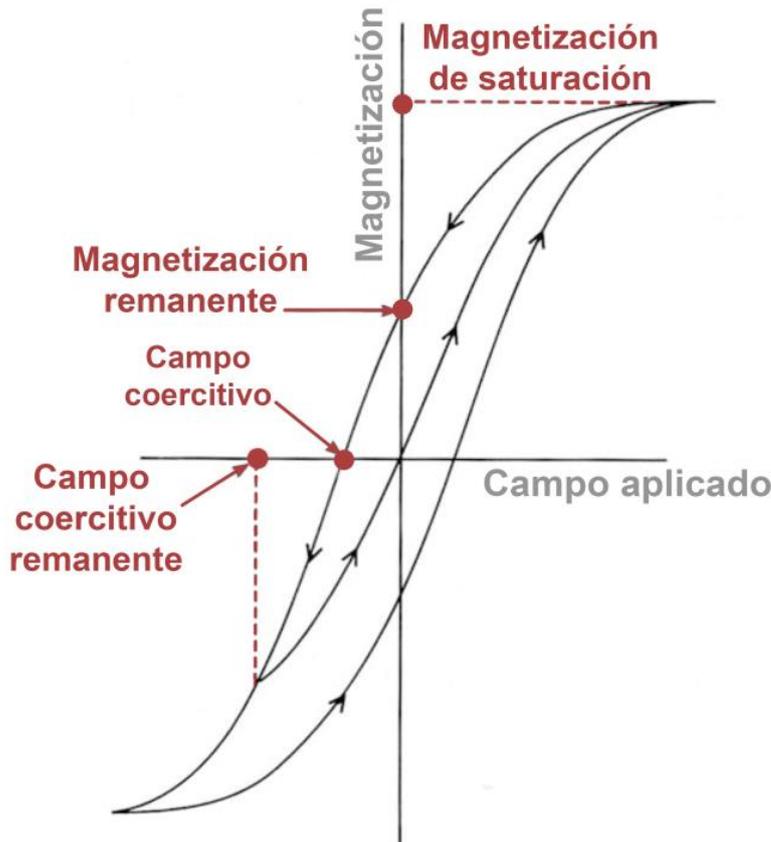


Fig. 3.18. Ciclo de histéresis en el que se indican los parámetros más importantes [Modificado a partir de Carrancho (2010)]

Los parámetros obtenidos a partir de los ciclos de histéresis (M_s , M_{rs} y B_c), junto con el *campo coercitivo remanente* (B_{cr}) obtenido a partir de las curvas de *backfield*, permiten calcular varios ratios (magnetización remanente de saturación *versus* magnetización de saturación M_{rs}/M_s ; campo coercitivo remanente *versus* campo coercitivo, B_{cr}/B_c ; ratio de coercitividad, B_{rh}/B_{cr}) que son útiles para evaluar el estado de dominios, y de ahí la granulometría de los materiales estudiados (Day et al., 1977; Dunlop, 2002; Fabian, 2003). Además de esto, los ciclos de histéresis pueden ayudar a visualizar la contribución de los minerales diamagnéticos y paramagnéticos.

Se han realizado ciclos de histéresis con ayuda de la balanza de traslación de campo variable del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (Magnetic Measurements Variable Field Translation Balance), que permite aplicar campos de $\pm 1\text{T}$. Para obtener e interpretar los parámetros de los ratios de histéresis de las medidas realizadas con la balanza de traslación se ha utilizado el programa *RockMag Analyzer* (Leonhardt, 2006).

3.2.3.6. Curvas termomagnéticas

Las curvas termomagnéticas consisten en el calentamiento y posterior enfriamiento de una muestra en presencia de un determinado campo magnético a altas (hasta 800 °C) o bajas temperaturas (hasta -196 °C). Este experimento nos permite evaluar la magnetización inducida en relación a la temperatura aplicada. Su importancia principal radica en que permite calcular la llamada temperatura de Curie (o de Néel si estamos ante minerales antiferromagnéticos). Por encima de dicha temperatura, los minerales ferromagnéticos (*s.l*) se transforman en paramagnéticos y por lo tanto, cuando realizamos curvas termomagnéticas, este parámetro puede ser identificado por una reducción drástica de la magnetización, una caída en la magnetización. Puesto que la temperatura de Curie es diferente para cada mineral ferromagnético, este experimento permite identificar cuál o cuáles son los principales portadores de la remanencia en nuestras muestras. Además permite observar cambios químicos y de fase cristalográfica en los minerales ferromagnéticos, lo que permite evaluar de la estabilidad termoquímica de la muestra.

Todas las curvas termomagnéticas presentadas en este trabajo han sido realizadas con la balanza de traslación de campo variable del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos aplicando un campo de 38 mT, previa aplicación de un campo de 1 T antes de comenzar el calentamiento. La interpretación de las curvas ha sido realizada con ayuda del programa *RockMag Analyzer* (Leonhardt, 2006).

4. Materiales de estudio e hipótesis de trabajo

4.1. Las estructuras de combustión prehistóricas: características y tipos.

4.2. Recreaciones experimentales del proyecto “Neanderthal Fire Technology”

4.2.1. Descripción de las estructuras

4.2.2. Observaciones tafonómicas

4.2.3. Observaciones durante la excavación

4.2.4. Materiales estudiados de los hogares experimentales

4.3. Estructuras de combustión del Paleolítico medio de El Salt.

4.3.1. Estudios previos en la unidad X de El Salt

4.3.2. Arqueomagnetismo aplicado a la disección de palimpsestos: hipótesis de trabajo

4.3.3. Materiales estudiados de la unidad X de El Salt

4.3.4. Contribuciones a la identificación de materiales potencialmente quemados

4.4. Episodios de combustión antrópicos holocenos en cueva: depósitos de *fumiers*.

4.4.1. Abrigo de La Castañera

4.4.2. Cueva del Mirador

4.4.3. Abrigo de San Cristóbal

4.4.4. Cueva del Estillín



Todos los materiales estudiados en esta tesis proceden de la península ibérica. Se enmarcan en contextos prehistóricos, si bien es cierto que también se han estudiado algunas recreaciones experimentales que simulan estructuras de combustión prehistóricas. Los materiales se presentan agrupados en tres bloques atendiendo al interés de estudio y al contexto de cada uno de ellos: (i) recreaciones experimentales del proyecto “*Neandertal Fire Technology*”, (ii) materiales paleolíticos de El Salt y (iii) episodios de combustión holocenos procedentes de secuencias de *fumiers*. En este capítulo se realiza un repaso general de las características de las estructuras de combustión prehistóricas y se especifican las características de los distintos materiales estudiados.

4.1. Las estructuras de combustión prehistóricas: características y tipos.

Las estructuras de combustión pueden ser definidas como depósitos sedimentarios que contienen los restos físicos de un fuego (Mallol et al., 2017). En general, las facies que componen las estructuras intactas forman una secuencia sedimentaria que tiene en su parte superior una capa con los residuos de la quema (cenizas, carbones, etc.) e inmediatamente por debajo el sustrato afectado por el fuego (Leierer et al., 2019; Mallol et al., 2017, 2013b) (Fig. 4.1). Si el sustrato original es rico en materia orgánica, suele adquirir un aspecto negruzco debido a la carbonización de dicha materia orgánica en una atmósfera reductora (Mallol et al., 2017, 2013b). En ocasiones, pueden aparecer también parches rojizos o rubefacción (Canti y Linford, 2000; Mallol et al., 2017).

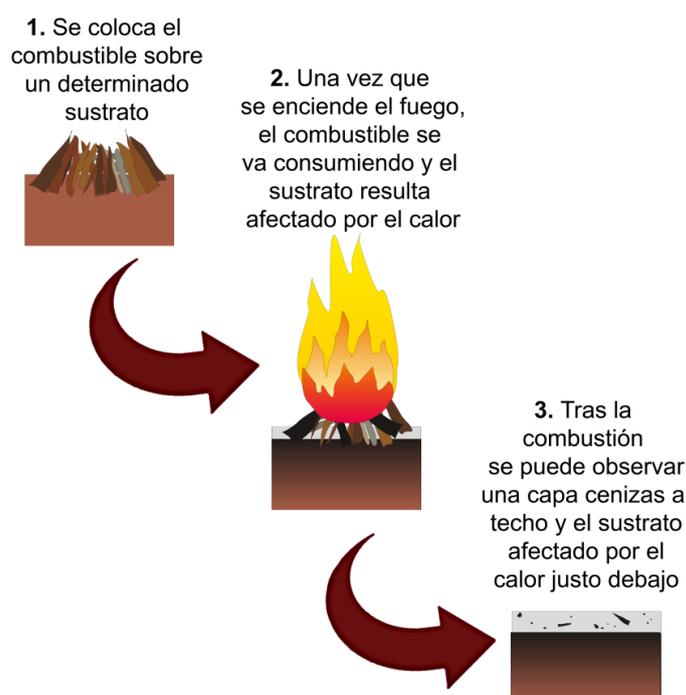


Fig. 4.1. Esquema del proceso de formación de las facies de las estructuras de combustión.

4. Materiales e hipótesis de trabajo

Mallol et al. (2017) describieron siete tipologías para los depósitos de combustión en posición primaria, divididas en dos grupos según tuvieran o no algún tipo de contención (Tabla 4.1). Los materiales estudiados en esta tesis se pueden incluir en las categorías de hogares [*“Open hearths”*] (recreaciones experimentales del proyecto *“Neandertal Fire Technology”* (NFT) y fuegos paleolíticos de El Salt, véanse los apartados 4.2 y 4.3 respectivamente) y fuegos de mantenimiento y limpieza (*fumiers*, véase el apartado 4.4).

<p>a) Estructuras sin contención:</p>
<p>1. Depósitos de fuegos naturales (“Natural fire deposits”), como incendios forestales, fuegos producidos por rayos y combustión espontánea.</p> <p>2. Horizontes destructivos en poblados o zonas urbanas (“Destruction layers”). Pueden ser resultado de una quema accidental o intencional.</p> <p>3. Fuegos de mantenimiento y limpieza (“Maintenance and cleaning fires”).</p>
<p>b) Estructuras con contención:</p>
<p>4. Hogares (“Open hearths”). La limitación lateral del combustible sirve de contención. Dentro de esta categoría aparecen dos tipos de estructuras: (a) hogares simples, que no presentan ningún tipo de revestimiento o preparación en el sustrato, (aunque pueden presentar una ligera excavación superficial intencional o como resultado del mantenimiento de la estructura), y (b) hogares con rocas perimetrales.</p> <p>5. Superficies de quema preparadas (“Prepared burning surfaces”).</p> <p>6. Estructuras en fosa (“Pit structures”). Se utiliza el propio sustrato para contener el fuego y la combustión se produce en profundidad. De esta manera, se pueden controlar las condiciones de oxigenación.</p> <p>7. Instalaciones píricas complejas (“Fire installations”). Se trata de estructuras más elaboradas, que tienen superficies preparadas, muros y/o techos hechos específicamente para contener el calor, e incluso sistemas de ventilación incluidos en dichos elementos.”</p>

Tabla 4.1. Tipos de depósitos de combustión propuestos por Mallol et al. (2017)

4.2. Recreaciones experimentales del proyecto “Neanderthal Fire Technology”

En el año 2010, se puso en marcha el proyecto “*Neanderthal Fire Technology*”. Con la Dra. Carolina Mallol (Instituto Universitario de Bio-Orgánica Antonio González / Dpto. de Geografía e Historia, Área de Prehistoria; Universidad de la Laguna) como investigadora principal, la propuesta recibió una primera *General Grant* de la fundación estadounidense *The Leakey Foundation*. Este proyecto multidisciplinar nació directamente vinculado al yacimiento de El Salt (Alcoy, Alicante; Lat.: 38° 41' 13" N, Long.: 00° 30' 33" O; Fig. 4.2.), el cual conserva una gran cantidad de estructuras de combustión del Paleolítico medio (ca. 250 – 40 ka BP). El objetivo principal del proyecto era generar un conjunto de datos experimentales y etnoarqueológicos que ayudaran a interpretar cómo se formaron esas estructuras de combustión vinculadas a grupos neandertales. Para ello, se realizó algo más de una veintena de estructuras de combustión experimentales (hogares) en cueva y al aire libre bajo condiciones controladas. Algunos de los parámetros tenidos en cuenta fueron el tipo de sustrato sobre el que se hizo el fuego, el tipo y la cantidad añadida de combustible, las temperaturas alcanzadas y la forma de extinción del fuego. También se llevaron a cabo distintas acciones durante y después del fuego, como por ejemplo cocinado o pisoteo (*trampling*). Todas estas acciones fueron registradas con detalle. Algunas estructuras fueron excavadas ese mismo año, mientras que otras se preservaron para observar los efectos de los procesos tafonómicos a lo largo del tiempo.



Fig. 4.2. Mapa de la península ibérica indicando la localización del yacimiento de El Salt.
[Mapa tomado de Google Earth Pro]

4. Materiales e hipótesis de trabajo

En 2012, *The Leakey Foundation* concedió una segunda ayuda a la investigación al proyecto *Neanderthal Fire Technology*. Se realizaron nuevas estructuras de combustión que principalmente simulaban aquellas del Abric del Pastor (Barrac del Sint, Alicante). Nuevamente, se excavaron algunas de las nuevas estructuras de combustión y otras quedaron expuestas a los agentes tafonómicos.

Finalmente, en 2015, *The Leakey Foundation* destinó una tercera ayuda a la investigación al proyecto *Neanderthal Fire Technology*. Aprovechando esto, se excavó un buen número de estructuras de combustión que habían estado expuestas entre 2 y 5 años desde su última quema. Es precisamente durante esta campaña de excavación, desarrollada en verano de 2015, durante la que se recogen las muestras estudiadas en esta tesis. Además de esto, se replicaron nuevos fuegos encima de otros que ya habían sido hechos en los años anteriores y se hicieron otros en nuevas zonas.

En total se ha contabilizado cerca de una cuarentena de experimentos (Fig. 4.3) que han generado un ingente corpus de datos (p. ej.: Mallol et al., 2013b, 2013a; Pérez et al., 2017; Pérez, 2015). Para el análisis se ha recurrido, entre otras técnicas, a la espectroscopia de infrarrojos (Fourier-transform Infrared Spectroscopy, FTIR), análisis espacial, micromorfología de suelos y análisis de química orgánica.

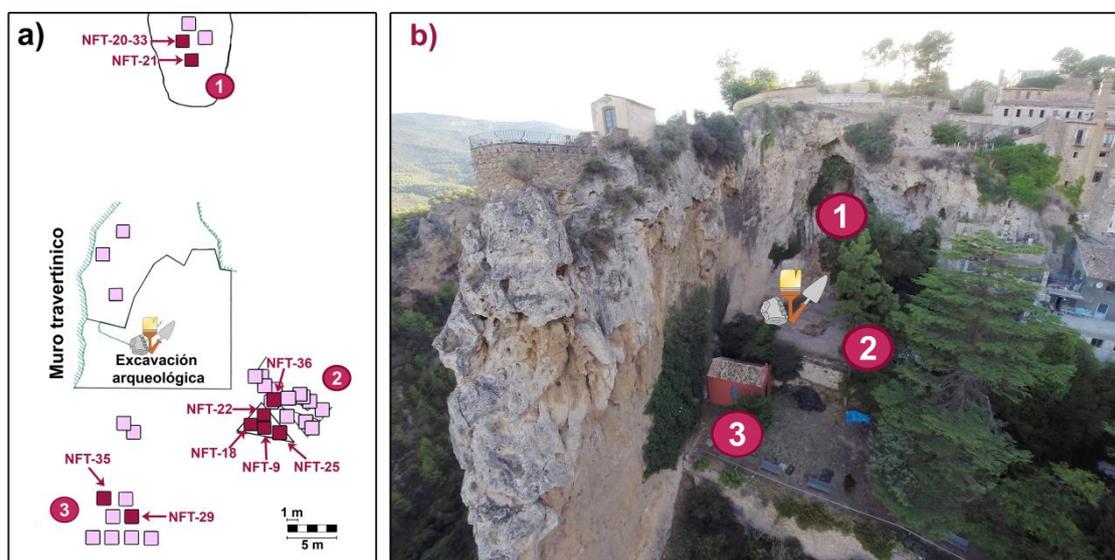


Fig. 4.3. (a) Plano con todas las estructuras del proyecto *Neanderthal Fire Technology*. Los cuadrados oscuros representan las estructuras estudiadas en esta tesis. Los números dentro de círculos corresponden a las zonas de experimentación. (b) Foto aérea en la que se indican las áreas de experimentación, así como la zona de excavación. [Foto (b) cortesía del equipo de investigación de El Salt]

La realización y exposición durante varios años de las estructuras experimentales supuso una oportunidad única para la realización de estudios arqueomagnéticos, puesto que ha permitido evaluar el registro direccional del campo magnético terrestre bajo determinadas condiciones tafonómicas. Existen algunos estudios experimentales que se centran en distintas cuestiones del registro arqueomagnético, como por ejemplo los mecanismos de magnetización (Carrancho y Villalaín, 2011), la influencia de los métodos de muestreo (Smith, 1990) o el peso de distintas variables como la temperatura y la duración del calentamiento en la eficiencia del registro (Hathaway, 1990b), y un trabajo reciente en el que se estudian los cambios de la susceptibilidad magnética de fuegos experimentales e incendios forestales a lo largo de tres años (Jordanova et al., 2019). Sin embargo, no se habían publicado trabajos en los que se estudiaran estructuras de combustión prehistóricas recreadas a través de la arqueología experimental con un control de múltiples variables y expuestas a distintos procesos tafonómicos durante un período tan largo. Además, la existencia de algunas estructuras con reencendidos separados por varios años permite también la posibilidad de explorar la utilidad de los análisis arqueomagnéticos para identificar este fenómeno de gran interés arqueológico. En resumen, el estudio de estos fuegos experimentales supone un paso importante para comprender mejor el comportamiento magnético de las estructuras de combustión prehistóricas.

4.2.1. Descripción de las estructuras

Con el fin de evaluar la preservación del registro arqueomagnético y los efectos de los procesos tafonómicos, se estudiaron cinco estructuras (hogares): NFT-9, NFT-18, NFT-20-33, NFT-21 y NFT-22 (Fig. 4.3.). La configuración de las cinco es bastante similar, pues en todas ellas el combustible y los demás materiales añadidos antes de la combustión (si los hubo) fueron colocados directamente en la superficie del sustrato, sin que éste fuera preparado de manera previa. Las características específicas de cada una de estas estructuras se describen a continuación y se resumen en la Tabla 4.2.

Las estructuras NFT-9, NFT-18 y NFT-22 fueron realizadas al aire libre justo al lado del yacimiento de El Salt (zona 2 en Fig. 4.3), sobre un sustrato seco prácticamente sin vegetación -salvo algunas hierbas aisladas- y con limo suelto en la superficie. La presencia de calizas angulosas centimétricas (1-3 cm) era frecuente. Las tres estructuras de combustión fueron realizadas en 2010.

Para la realización de NFT-9 se usaron *Pinus nigra* y hiedra como combustible (un total de 16.3 kg entre la aportación inicial y la realimentación durante la combustión). Antes de la combustión se añadieron tres egagrópilas de

4. Materiales e hipótesis de trabajo

Bubo bubo, y durante la combustión se añadieron 5 kg de huesos de pollo y 2 huevos (Fig. 4.4a). Además se cocinaron dos conejos (Fig. 4.4b).



Fig. 4.4. (a) Imagen de la estructura NFT-9 durante la combustión, donde se pueden observar los huesos de pollo y uno de los huevos añadidos. (b) Cocinado de dos conejos durante la combustión de NFT-9. (c) Pisoteo de NFT-9 tras el apagado del fuego. [Imágenes cortesía del equipo del proyecto *Neanderthal Fire Technology*]

No se dispone de datos de termopares para esta estructura de combustión (NFT-9). El fuego duró unas 3-4 horas y fue extinguido de manera natural (es decir, se dejó de alimentar hasta que se apagó). Tras el apagado, se añadió hueso carbonizado de caballo procedente de otra estructura de combustión (evento 4 de NFT-6). Desde el día siguiente a su realización, NFT-9 fue pisoteada intensivamente durante 16 días (Fig. 4.4c).

En el caso de NFT-18 (aire libre), el combustible utilizado fue únicamente *Pinus nigra*, con un total de 23.5 kg empleados para la quema (incluyendo la cantidad inicial y la realimentación durante la combustión). Aparte del combustible inicial, antes del encendido se añadieron fragmentos de hueso, fragmentos de calizas/travertino y sílex local del tipo Mariola-Benimartxó. El fuego duró aproximadamente 2-3 horas y los dos termopares disponibles alcanzaron hasta 622 °C y 663 °C, respectivamente. No disponemos de información precisa sobre el área exacta donde se ubicaron los sensores, aunque sí sabemos que en ningún caso se encontraban insertos en el sustrato. Durante la combustión, se añadió más combustible y hueso de vaca. El apagado fue natural y no se realizó ninguna acción tras ello.

La estructura NFT-22 (aire libre) fue alimentada con *Pinus nigra* (19.5 kg entre el aporte inicial y la realimentación). No se añadió ningún otro material aparte del combustible y se apagó de forma natural. El fuego duró unas 5 o 6 horas. Cinco termopares ubicados en la zona superficial del sustrato registraron temperaturas máximas de 218 °C, 420 °C, 617 °C, 791 °C y 868 °C. Un sexto sensor ubicado en la zona de las brasas registró 846 °C (Tabla 4.2).

Estructura de combustión	Contexto	Tipo de sustrato ¹	Tipo y cantidad de combustible ²	Duración del fuego (horas)	Temperaturas máximas alcanzadas (°C) ³	Acciones antes de la combustión ⁴	Acciones durante la combustión	Extinción	Acciones tras la combustión ⁵	Año de experimentación	Año de muestreo
NFT-9	Aire libre	A	<i>Pinus nigra</i> y hiedra (16.3 kg)	3-4	No disponibles	Adición de tres egagrópias de buho (<i>Bubo bubo</i>)	Adición de combustible y adición de 5 kg de huesos de pollo, 2 huevos y 2 cocinado de dos conejos	Natural	Adición de hueso carbonizado de caballo y pisoteo durante 16 días.	2010	2015
NFT-18	Aire libre	A	<i>Pinus nigra</i> (23.5 kg)	2-3	622 °C 663 °C	Adición de fragments de hueso, fragmentos de calizas/travertino y sílex Mariola-Benimartxó	Adición de combustible y de hueso de vaca	Natural	-	2010	2015
NFT-20	Cueva	B	<i>Pinus nigra</i> (12 kg)	3-4	690 °C 733 °C 770 °C	Adición de sílex Serreta-Frare Biar	Adición de excremento seco de caballo	Natural	-	2010	2015
NFT-33 (reencendido de NFT-20)	Cueva	B	<i>Pinus sylvestris</i>	-	101.6 °C 592.4 °C 878.5 °C	-	-	Natural	-	2013	2015
NFT-21	Cueva	C	<i>Pinus nigra</i> (7.2 kg)	2-3	52 °C 93 °C 260 °C 508 °C 706 °C 763 °C	Adición de cantos de caliza y conglomerado.	Adición de combustible, 2 kg de ramas largas carbonizadas, y fragmentos de tibia y 9 costillas de caballo	Con sedimento	-	2010	2015
NFT-22	Aire libre	A	<i>Pinus nigra</i> (19.5 kg)	5-6	218 °C 420 °C 617 °C 791 °C 846 °C 868 °C	-	Adición de combustible	Natural	-	2010	2015

Tabla 4.2. Resumen de las principales características de las estructuras de combustión estudiadas.

¹ Tipo A: Sustrato seco sin vegetación, con limo suelto en la superficie. También aparecen fragmentos angulosos de caliza (1-3cm) y algunas hierbas aisladas.

² Tipo B: Costra carbonatada en superficie. Justo por debajo, aparece una lámina detritica, y debajo de ésta, otra capa rica en carbonatos.

³ Tipo C: Costra carbonatada en superficie. Por debajo, materiales carbonatados que incluyen oncolitos.

⁴ La masa de combustible indicada incluye tanto la cantidad inicial de como los añadidos durante la combustión.

⁵ Cada valor corresponde a un termopar diferente.

⁶ La cantidad inicial de combustible antes del encendido no se ha incluido como una acción previa a la combustión.

⁷ En este apartado se incluyen todas las acciones intencionales que se realizaron sobre las estructuras de combustión después de su apagado completo.

4. Materiales e hipótesis de trabajo

Las estructuras de combustión NFT-20-33 y NFT-21 fueron realizadas a la entrada de una pequeña cavidad localizada en la pared travertínica que protege El Salt, cuya apertura se ubica a unos 15 o 20 m de altura respecto del yacimiento (área 1 en la Fig. 4.3). El sustrato original varía según la zona de la cueva que observemos. En superficie, una costra carbonatada milimétrica cubría el suelo de la cueva. Sin embargo, las facies detectadas por debajo son diferentes. En el área de NFT-20-33 se observó una lámina detrítica (Fig. 4.5). En algunas partes, la zona superior de esta lámina (la más cercana a la costra carbonatada) parecía algo cementada (Fig. 4.5a). Justo por debajo de la lámina detrítica, aparecía de nuevo una capa de materiales ricos en carbonato (Fig. 4.5b).

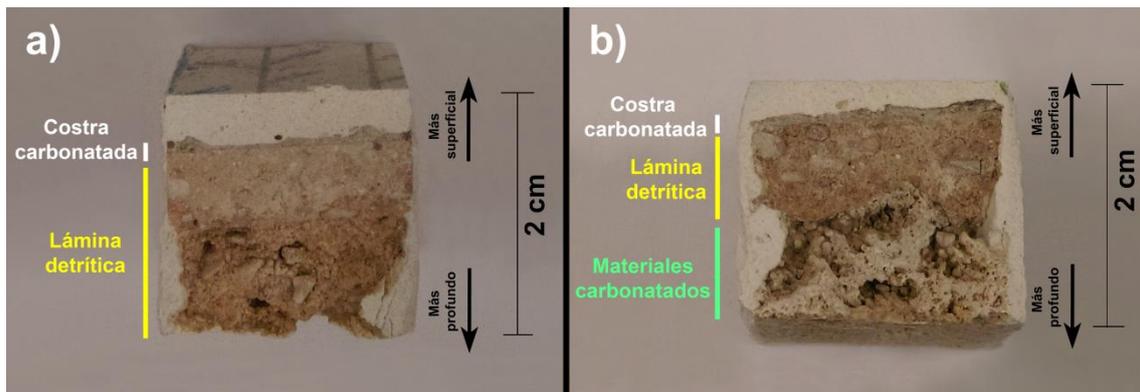


Fig. 4.5 (a-b) Imagen de dos especímenes de NFT-20-33 indicando las facies observadas en el área.

En el área de NFT-21, sin embargo, no se observó la lámina detrítica bajo la costra, sino que aparecían otros materiales carbonatados y oncolitos (Fig. 4.6).

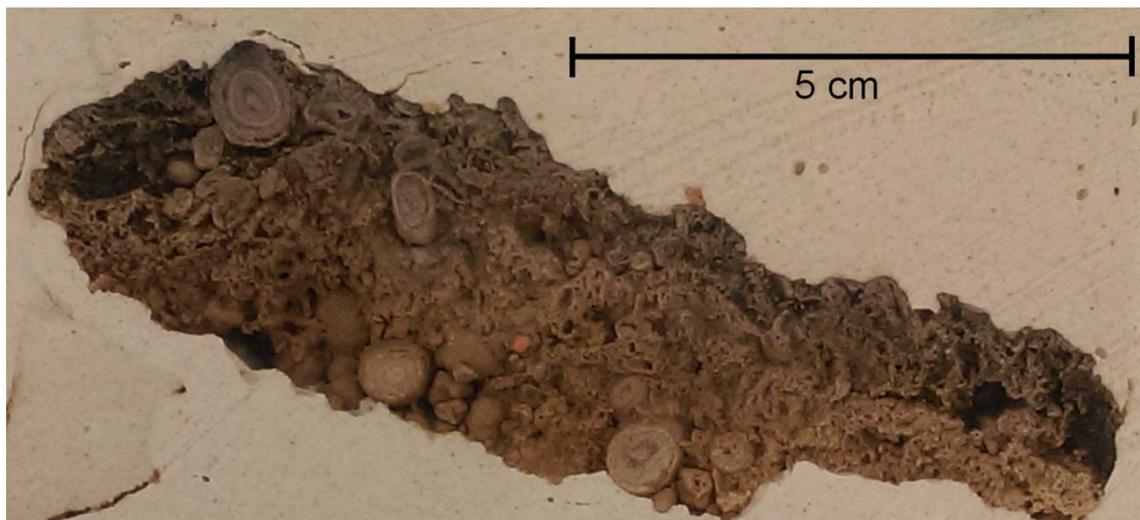


Fig. 4.6. Imagen de una sección de un bloque de mano de NFT-21 donde se puede observar la presencia de oncolitos.

NFT-20-33 corresponde a dos eventos de quema sobre una misma estructura u hogar. En primer lugar, en 2010 se realizó la quema de la estructura NFT-20. Esta estructura se alimentó con *Pinus nigra* (12 kg). Antes de iniciar la combustión, se añadieron 11 piezas de sílex local de tipo Serreta-Frere Biar. Durante la combustión, se añadió excremento seco de caballo. El fuego duró unas 3-4 horas y se apagó de forma natural. Los dos termopares disponibles registraron temperaturas máximas de 690 °C (zona de contacto entre llamas y brasas), y 733 y 770 °C (zona periférica de la superficie del sustrato). Tras el apagado, no se realizó ninguna acción hasta que en 2013 se reencendió, generando el hogar NFT-33. El combustible elegido en este caso fue *Pinus sylvestris*. Se obtuvieron temperaturas máximas de 101.6 °C, 592.4 °C, 878.5 °C. No se dispone de información detallada sobre la ubicación de los termopares. NFT-33 fue apagado de forma natural. En 2015, la estructura de combustión NFT-20-33 fue muestreada.

Para realizar NFT-21 (cueva), se usaron 7.2 kg de *Pinus nigra* como combustible. Antes de la quema, se añadieron cantos de caliza y conglomerado a los que se engancharon algunos termopares. Durante la combustión, se añadieron 2 kg de ramas grandes carbonizadas y fragmentos de una tibia y 9 costillas de caballo. Los seis termopares disponibles registraron temperaturas máximas de 53 °C, 93 °C, 260 °C, 508 °C, 706 °C y 763 °C. Esta estructura de combustión fue apagada con sedimento. NFT-21 fue realizada en 2010 y se muestreó en 2015 (Tabla 4.2).

4.2.2. Observaciones tafonómicas

Durante el tiempo transcurrido entre la realización de los fuegos y su muestreo, las condiciones en las que se encontraban las estructuras de combustión fueron documentadas anualmente. Las estructuras de la cueva (NFT-20-33 y NFT-21) parecían estar intactas, salvo por la presencia de algunas huellas y excrementos de carnívoros y telas de araña sobre las cenizas (Fig. 4.7).



Fig. 4.7. Estructura NFT-20-33 en la primavera de 2013. En la imagen se puede apreciar la presencia de telas de araña. [Imagen cortesía del equipo del proyecto Neanderthal Fire Technology]

4. Materiales e hipótesis de trabajo

Las estructuras al aire libre junto al yacimiento (NFT-9, NFT-18, NFT-22, zona 2 en Fig. 4.3) experimentaron otros procesos tafonómicos. En el primer otoño tras su realización, las hojas que cayeron de los árboles circundantes [*Celtis sp.*] taparon los fuegos (Fig. 4.8). Para la primavera siguiente, los fuegos estaban cubiertos por vegetación que había nacido sobre ellos (Fig. 4.9a).



Fig. 4.8. Área de realización de las estructuras NFT-9, NFT-18 y NFT-22 en el otoño de 2010.

[Imagen cortesía del equipo del proyecto *Neanderthal Fire Technology*]



Fig. 4.9. Imágenes del estado del área de realización de las estructuras NFT-9, NFT-18 y NFT-22 en (a) la primavera de 2011, (b) en 2012 (c) en 2013 (d) y en 2015 [Imágenes cortesía del equipo del proyecto *Neanderthal Fire Technology*]

Cuando se procedió a la excavación, fue necesario cortar de manera cuidadosa toda la cobertera vegetal que cubría los fuegos al aire libre (Fig. 4.9.d). Fue entonces cuando se detectó la presencia de una capa que incluía unos agregados gris-marronáceos, semillas y hojas de *Celtis sp.* en descomposición y fragmentos de carbones (Fig. 4.10a-c). Además, se observaron evidencias de actividad de pequeños invertebrados.

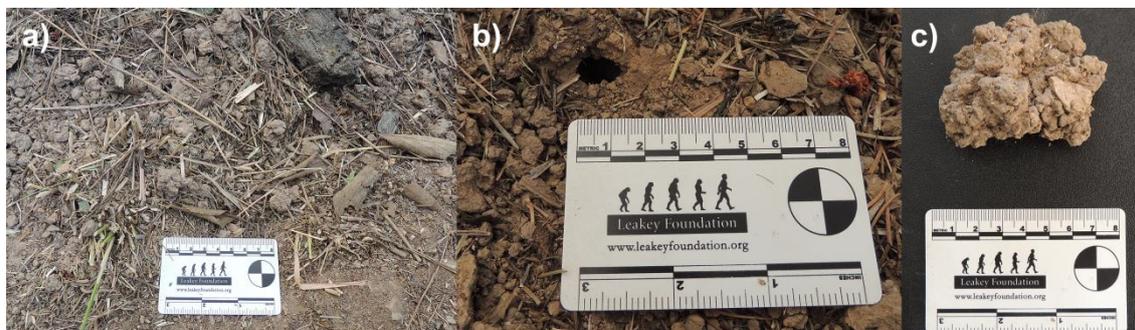


Fig. 4.10. (a) Capa observada inmediatamente por encima de los fuegos realizados al aire libre durante su excavación; (b) evidencias de actividad de pequeños invertebrados; (c) detalle de los agregados grisáceos-marronáceos [Imagen cortesía del equipo del proyecto *Neanderthal Fire Technology*]

4.2.3. Observaciones durante la excavación

Durante la excavación y muestreo de los fuegos estudiados, se localizaron fundamentalmente dos facies. En primer lugar y a techo de las estructuras, aparecía una capa de cenizas blancas o grisáceas. En las estructuras al aire libre, las cenizas no siempre fueron fáciles de observar, puesto que solían aparecer mezcladas con otras facies. Inmediatamente por debajo de las cenizas, se observa el sustrato original que había resultado alterado térmicamente debido a la combustión. En los fuegos al aire libre aparece en forma de capa negra, puesto que el sustrato original era rico en materia orgánica. En el caso de NFT-22, la capa negra fue difícil de aislar. En los fuegos en cueva, no apareció capa negra o era milimétrica (en NFT-20-33 se observó lo que se ha considerado una capa negra en superficie, con 1-2 mm de espesor y formada por un sedimento bastante suelto). Sí que se observó cierto oscurecimiento o enrojecimiento de la costra carbonatada en algunas zonas.

4.2.4. Materiales estudiados de los hogares experimentales

Se tomaron dos bloques de mano orientados por cada estructura de combustión para estudiar su NRM y obtener una dirección arqueomagnética por hogar. El muestreo se limitó a un máximo de dos bloques de mano de unos 2250 cm³ (aproximadamente, puede variar según el bloque) cada uno por estructura porque se requería material para otras analíticas. Para este tipo de análisis es necesario que los materiales se preserven estrictamente *in situ*. Puesto que las cenizas parecían alteradas a nivel macroscópico (dificiles de aislar, mezcladas con otras facies, etc.), durante la excavación se retiraron de manera cuidadosa, de tal manera que los bloques sólo incorporaban el sustrato termoalterado subyacente. Se intentó recoger los bloques de la zona más quemada de los fuegos –es decir, lo más céntrica posible- (Fig. 4.11a-e). En el caso de NFT-22, debido a la dificultad para aislar la capa negra, no se pudo localizar dicha zona con precisión. Durante el muestro del fuego NFT-21, la zona superficial (la más quemada) del bloque 1 se fragmentó y se perdió.

Adicionalmente, se recogieron dos bloques de mano orientados de sustrato sin quemar de la zona de los fuegos al aire libre y otros dos del sustrato no quemado de la cueva a modo de muestras de control. Tras el procesado en el laboratorio, se obtuvieron 88 especímenes cúbicos (72 de materiales quemados y 16 no quemados) de unos 10 cm³ cada uno, cuya procedencia se detalla en el Anexo 1. La NRM de 73 especímenes fue desmagnetizada térmicamente (entre 14 y 21 pasos hasta 585-600 °C) y los 15 restantes fueron desmagnetizados por campos alternos decrecientes (en 20 pasos hasta 100 mT) (véase Anexo 1 para más detalles).

Además de las muestras orientadas, se tomó muestra suelta representativa de las distintas facies de cada hogar. Sobre ella (~450 mg), se realizó adquisición progresiva de la IRM, ciclos de histéresis (± 1 T) curvas de *backfield* y curvas termomagnéticas (temperatura *versus* magnetización, previa saturación de la muestra a 1 T justo antes de empezar el calentamiento) con ayuda de una balanza de traslación de campo variable (Magnetic Measurements) del laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos.

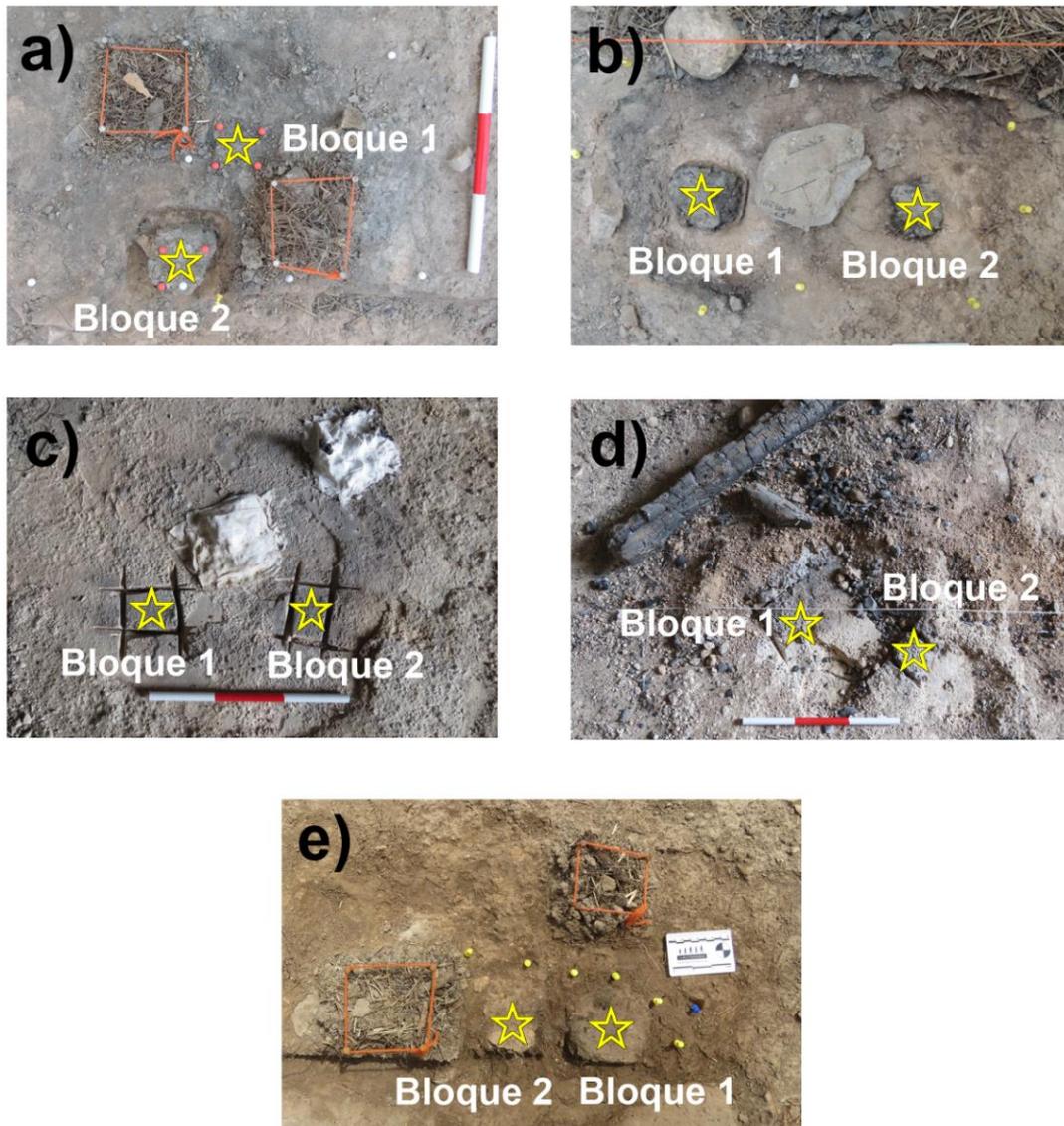


Fig. 4.11. Imágenes de las estructuras de combustión durante el proceso de excavación y muestreo: (a) NFT-9, (b) NFT-18, (c) NFT-20-33, (d) NFT-21 y (e) NFT-22. Las estrellas amarillas marcan la procedencia de los bloques de mano orientados tomados para realizar análisis direccionales.

4.3. Estructuras de combustión del Paleolítico medio de El Salt

El yacimiento de El Salt se encuentra en el municipio de Alcoy (Alicante, España; Fig. 4.2), a unos 680 metros de altitud sobre el nivel del mar [m.s.n.m.]. Se trata de un yacimiento muy rico en materiales arqueológicos que presentan un grado de preservación excepcional, entre los que se encuentra un gran número de estructuras de combustión e incluso varias piezas dentales atribuidas a un

4. Materiales e hipótesis de trabajo

individuo juvenil o adulto joven de neandertal (Garralda et al., 2014). Las primeras evidencias arqueológicas fueron descubiertas en 1959 por J. Faus Cardona, y a principios de los 60 se desarrollaron dos campañas de excavación (Galván Santos, 1992). En los años 80 se llevaron a cabo los primeros estudios de los materiales recuperados (en concreto, de la industria lítica) por parte de la Doctora Bertila Galván Santos, y en 1986 se retomaron las excavaciones. Para más información acerca de la historia del yacimiento, véanse Galván Santos (1992) y Pérez Luis (2019).

El yacimiento de El Salt está muy cerca de la confluencia entre los ríos Polop y Barchell y está protegido por un muro de 38 metros de altura, formado por calizas y cubierto por toba y travertino. Esta formación se relaciona con un salto o escarpe de falla que provocó que calizas paleocenas cabalgaran sobre conglomerados oligocenos y con posteriores procesos de formación travertínica (Dorta Pérez et al., 2010; Galván et al., 2014a, 2014b; Garralda et al., 2014; Pérez Luis, 2019) (Fig. 4.12). La pared se orienta en sentido este-oeste, protegiendo el yacimiento por el sur, pero también por el oeste, puesto que hacia esa zona cambia la trayectoria y forma un ángulo recto (Fumanal García, 1994) (Figs. 4.13). Precisamente en esa zona donde la trayectoria cambia, se abre una oquedad a unos 16 m de altura respecto del yacimiento (es en esa pequeña cueva donde se realizaron los fuegos experimentales en cueva del proyecto NFT mencionados en epígrafes anteriores, Fig. 4.3). El área donde se encuentra el yacimiento debió de estar otrora protegido por una visera que acabó derrumbándose.

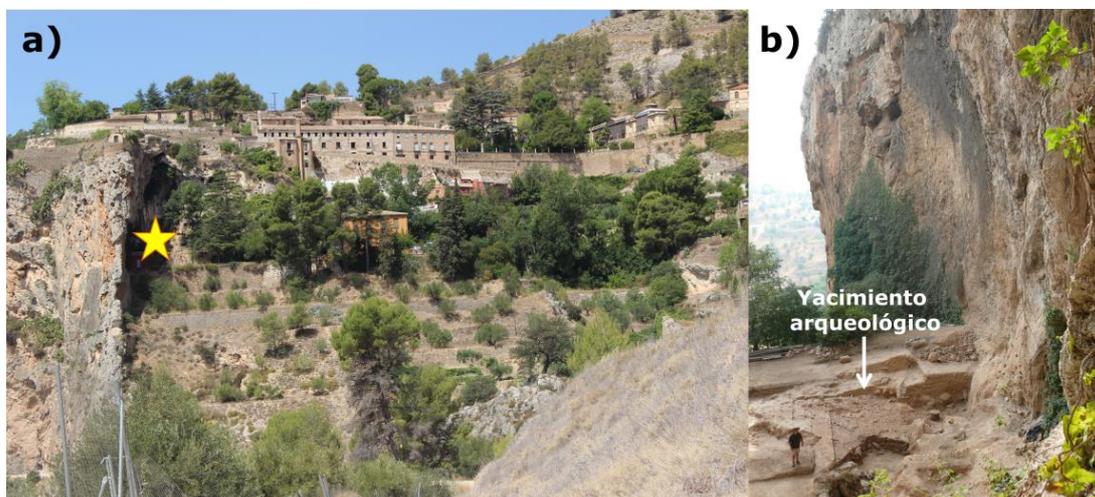


Fig. 4.12. (a) Panorámica de El Salt donde se puede apreciar a la izquierda la gran pared travertínica, que resguarda el yacimiento arqueológico (estrella amarilla). (b) Vista del yacimiento desde la cavidad que se abre en la formación travertínica. [Imágenes cortesía del equipo investigador de El Salt]

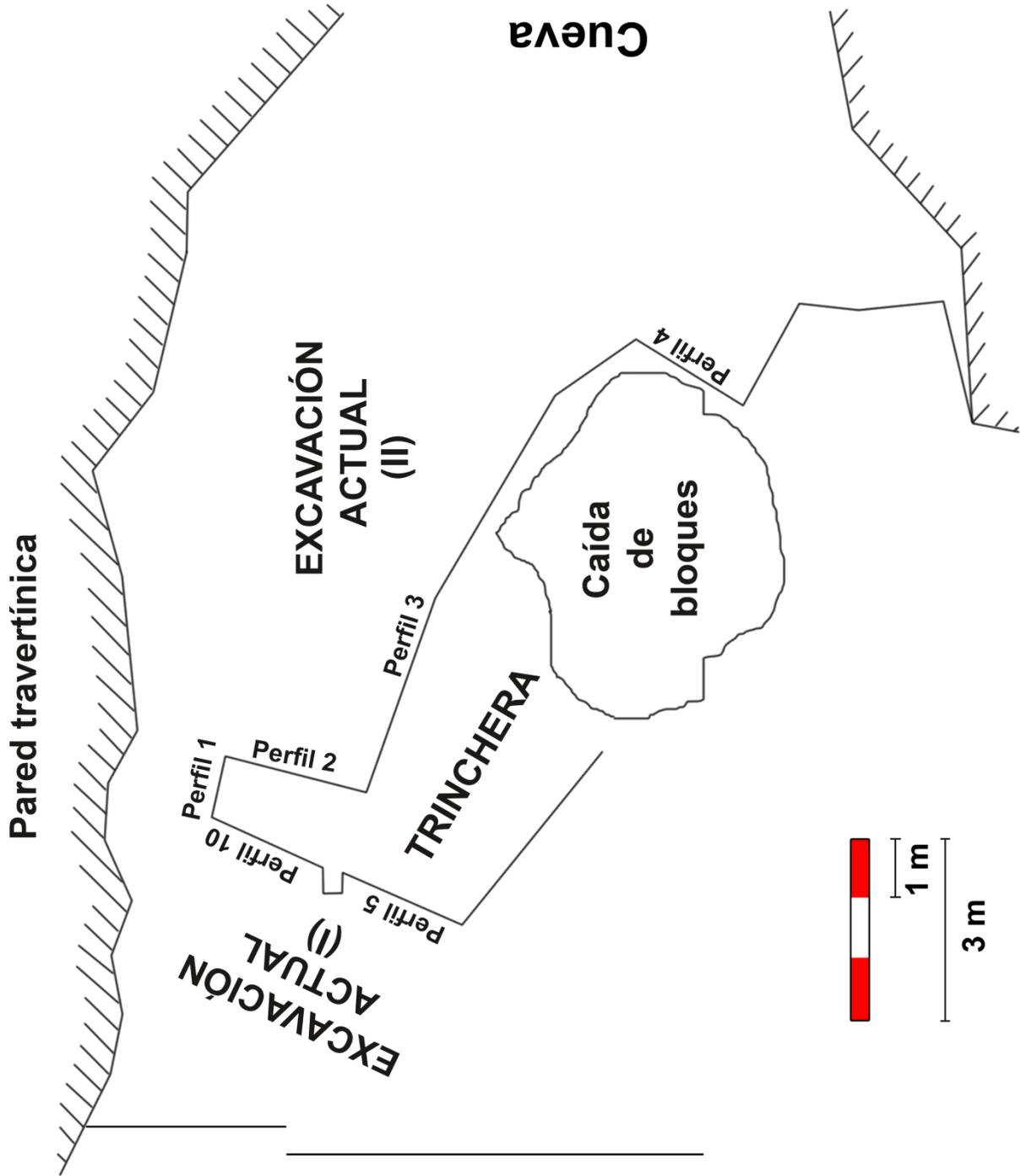


Fig. 4.13. Plano esquemático del yacimiento de El Salt en el que se destacan las zonas de interés para esta tesis.

4. Materiales e hipótesis de trabajo

La secuencia arqueosedimentaria tiene 6.3 metros de espesor y se divide en 13 unidades (Fumanal García, 1994), agrupadas según su textura evaluada a nivel macroscópico y su contenido arqueológico (Galván et al., 2014b, 2014a; Garralda et al., 2014) (Fig. 4.14). Para la base de la secuencia (unidad XII), estéril en términos arqueológicos, se dispone de dos dataciones de U/Th: 81.6 ± 2.7 Ka 80.2 ± 4 ka (U/Th, (Fumanal García, 1994). Las dataciones disponibles para la secuencia del Paleolítico Medio (unidades XII-V) la ubican entre hace 60 y hace 45 ka aproximadamente (Galván et al., 2014b). A continuación, se describen brevemente los grupos de unidades mencionados:

1. Unidad XIII. Se trata de una plataforma subhorizontal formada por materiales litoquímicos, cuyo espesor exacto se desconoce [mayor de 1.2 metros según Pérez Luis (2019)]. Aparece en la base del yacimiento y es arqueológicamente estéril, aunque en el techo de la unidad, ya en la zona de contacto con la unidad XII, se ha observado un área subcircular de unos 60 cm de diámetro que muestra alteración térmica (Galván et al., 2014a; Pérez Luis, 2019).
2. Unidades XII a IX. Estas presentan una sedimentación limosa o limo-arenosa, con un espesor medio de 1.5 metros. En la base aparece una serie de bloques de gran tamaño mezclados con otros de menor envergadura, procedentes de la antigua visera que cubría parte del sitio (Pérez Luis, 2019). Teniendo en cuenta que se apoyan directamente sobre la unidad XIII y que están cubiertos por la XII, se interpreta que la caída de bloques tuvo que ser anterior a las primeras ocupaciones humanas (Pérez Luis, 2019). En este conjunto de unidades aparece un gran número de estructuras de combustión, habitualmente asociadas a conjuntos líticos y faunísticos bastante ricos. La edad de estas unidades se ubica en torno al inicio del MIS3, antes del Evento Heinrich 5 de hace 50-47 ka BP (Galván et al., 2014b).
3. Unidades VIII a V inferior. En este caso, predomina un sedimento arenoso geogénico, con un espesor que oscila entre 1.5 y 2.8 metros. Se observa una reducción de los aportes antrópicos. En el techo de la unidad VI aparece otro grupo de bloques interpretados como una nueva caída de bloques de la visera (Pérez Luis, 2019). En la unidad V aparecieron dientes interpretados como pertenecientes a un neandertal juvenil o adulto joven (Garralda et al., 2014).
4. Unidad V superior. Presenta una sedimentación limoarenosa con una fracción gruesa de gravas heterogéneas a techo. Está afectada por un episodio erosivo holoceno. Tiene en torno a 0.5 metros de espesor y es prácticamente estéril (sólo a techo aparecieron algunos elementos arqueológicos).
5. Unidades IV a I. Se componen de facies formadas principalmente por una matriz limo-arcillosa que incorpora cantos y gravas y tiene un espesor de 1.3 metros. Suele haber un contacto erosivo entre facies y aparecen materiales arqueológicos de distintas épocas (Paleolítico Superior final, Epipaleolítico/Mesolítico y Neolítico Antiguo) mezclados.

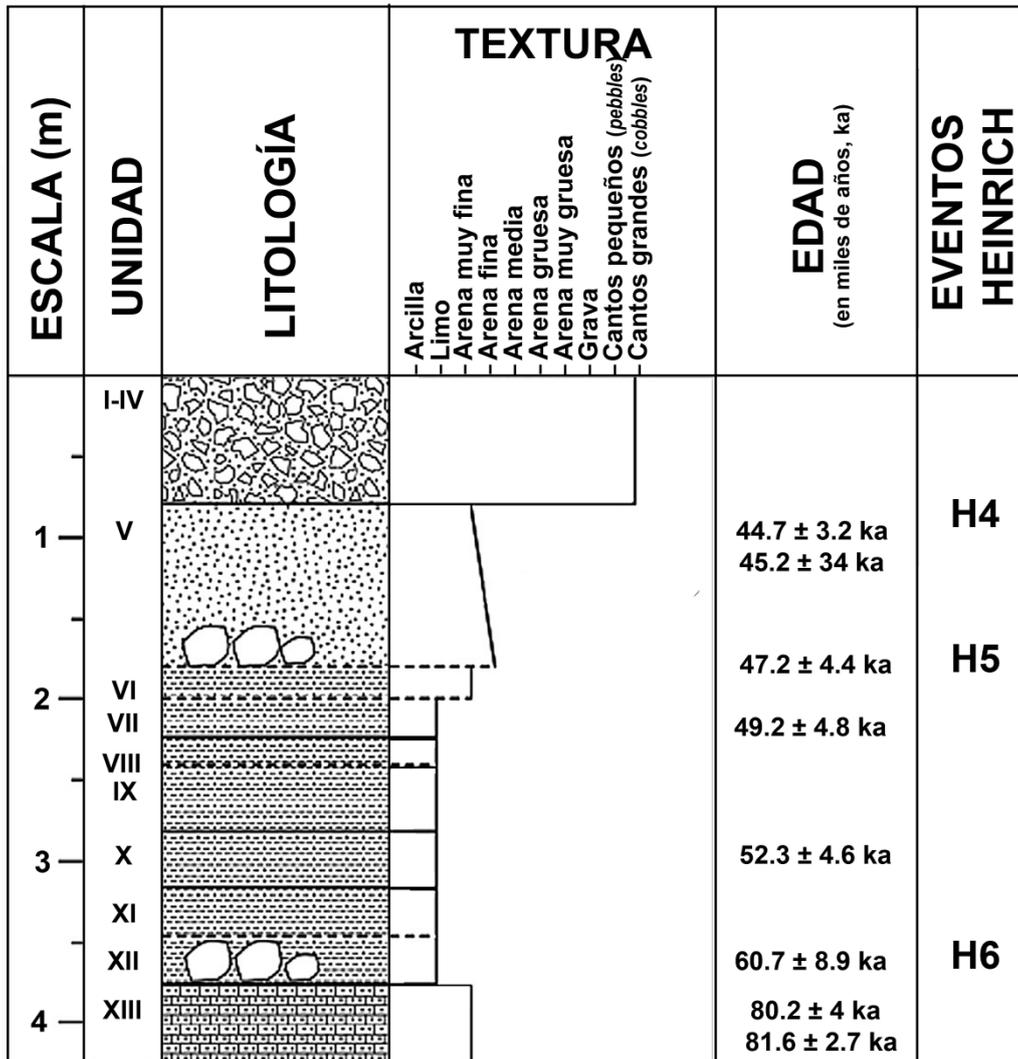


Fig. 4.14. Estratigrafía de El Salt [modificado a partir de Fagoaga et al. (2019) y Galván et al., (2014b)]

En la presente tesis se han estudiado distintos materiales y zonas del yacimiento que plantean diferentes problemáticas. Todo ello se describe en los siguientes epígrafes.

4.3.1. Estudios previos en la unidad X de El Salt

Durante el proceso de excavación de la unidad X en el área de excavación I (Fig. 4.13) ha aflorado un gran número de estructuras de combustión y una cantidad ingente de materiales líticos y faunísticos, que se caracterizan por conformar palimpsestos. Los palimpsestos son conjuntos de materiales arqueológicos acumulados durante periodos de tiempo prolongados pero que se presentan bajo una aparente sincronía (Bailey, 2007; Binford, 1981; Henry, 2012; Mallol y Hernández,

4. Materiales e hipótesis de trabajo

2016; Stern, 1993; Vaquero et al., 2012) (Fig. 4.15). Tradicionalmente, la intensidad de las ocupaciones humanas ha sido medida por la cantidad de artefactos líticos, hogares o restos óseos recuperados. Sin embargo, como se infiere de lo que se acaba de mencionar, esto no es necesariamente correcto. Por lo tanto, uno de los principales problemas en los palimpsestos de Paleolítico Medio con registros de hogares asociados es individualizar o aislar las ocupaciones, así como cuantificarlas o temporalizarlas. Debido a esta problemática, el trabajo de campo en El Salt se lleva a cabo de manera muy minuciosa y detallada. Con el fin de alcanzar la mayor resolución espacio-temporal posible, el estudio del yacimiento se realiza desde un enfoque multianalítico. Las técnicas y análisis aplicados incluyen micromorfología de suelos (Leierer et al., 2019; Mallol et al., 2013b), análisis de biomarcadores (Leierer et al., 2019), antracología (Vidal-Matutano, 2016; Vidal-Matutano et al., 2017), arqueostratigrafía, análisis espaciales y estudios líticos (Machado et al., 2016; Machado y Pérez, 2016), estudios de fitolitos (Rodríguez-Cintas y Cabanes, 2017), espectroscopía de infrarrojos (Fourier transform infrared, FTIR) (Rodríguez-Cintas y Cabanes, 2017), estudios zooarqueológicos (Pérez et al., 2015; Pérez Luis, 2019), paleoecológicos y paleoclimáticos (Fagoaga et al., 2017; Marquina et al., 2017; Pérez-Luis et al., 2017) e incluso recreaciones experimentales (Mallol et al., 2013a; Pérez et al., 2017).



Fig. 4.15. Superficie de excavación de la unidad X de El Salt. A simple vista se pueden identificar algunas estructuras de combustión, así como abundantes materiales arqueológicos (marcados con chinchetas). [Imagen cortesía del equipo investigador de El Salt]

La unidad X se caracteriza por su heterogeneidad: en ella se intercalan y solapan estructuras de combustión y facies sedimentarias variadas (Pérez Luis, 2019). Además, hay una clara diferencia entre la zona más cercana a la pared travertínica (donde aparece la mayor concentración de estructuras de combustión y materiales arqueológicos) y el área más externa, donde las inferencias arqueostratigráficas a nivel macroscópico no son posibles debido a su naturaleza masiva (Machado Gutiérrez, 2016; Vidal-Matutano, 2016). La unidad X ha sido dividida en dos subunidades (Xa y Xb), definidas según las observaciones macroscópicas de textura y color hechas en el campo. La subunidad Xa es la más superficial. Tiene una textura limo-arcillosa y presenta una tonalidad más clara que la subunidad Xb, más amarillenta (7.5 YR 3/2 Munsell soil color chart) (Leierer et al., 2019; Pérez et al., 2015; Pérez Luis, 2019). La subunidad Xb tiene una textura arcillo-limosa (es más arcillosa que Xa) y tiene un color más oscuro (Leierer et al., 2019; Pérez Luis, 2019).

Además de esta subdivisión, dentro de ellas se definió una serie de conjuntos de facies recurrentes a partir de la matriz de Harris registrada en el campo, denominados *Asociaciones de Facies Arqueosedimentarias* (AFA) (Machado et al., 2016; Pérez et al., 2015). Adicionalmente, a partir de análisis arqueostratigráficos, se han definido las llamadas *Unidades Arqueostratigráficas* (UAE o AUs por sus siglas en inglés: *Archaeostratigraphic Units*). Se trata de lechos continuos de material antrópico que están separados entre sí por segmentos de sedimentación estéril (Machado et al., 2016; Machado y Pérez, 2016; Pérez et al., 2015). El estudio de la industria lítica corroboró la coherencia estratigráfica de estas unidades, basándose en la identificación de materias primas de origen común y de remontajes dentro de los conjuntos líticos que conforman cada UAE (Machado et al., 2016). A pesar de este nivel de detalle que esta aproximación permite alcanzar, estas unidades todavía conforman conjuntos de material arqueológico tan densos que es muy difícil distinguir episodios de ocupación concretos ("*micropalimpsestos*"; Machado y Pérez, 2016; Pérez et al., 2015).

En una aproximación a la problemática de la disección de esta unidad X mediante el estudio de los restos faunísticos, Pérez et al. (2015) detectaron posibles eventos diacrónicos dentro de la UAE3 (localizada entre las AFA4 y 5 que conforman la unidad Xa) basándose en el tratamiento diferencial de animales de distintas tallas. Detectan además que existe una mayor afectación por exposición a la intemperie en los huesos de animales de talla mediana, por lo que interpretan que ese conjunto sería uno de los primeros depósitos de fauna de la UAE3. Basándose también en esta alteración tafonómica diferencial, sugieren que la UAE3 se pudo haber formado a lo largo de un periodo de tiempo "considerable a escala humana" (Pérez et al., 2015). En otro estudio de las UAE 4.1 (zona interior) y 4e (zona exterior), Machado y Pérez (2016) fueron capaces de correlacionar ambas unidades gracias a la presencia de dos piezas líticas, una en cada una de las UAE, que se correspondían a una misma unidad de materia prima. Además, los conjuntos de fauna de ambas parecían

4. Materiales e hipótesis de trabajo

complementarse bastante bien: analizaron primero por separado y luego conjuntamente los restos faunísticos de ambas unidades, y observaron, entre otras cosas, que había el mismo número mínimo de individuos independientemente de cuál de las formas de análisis se escogiera. Esto apoyaba la hipótesis de correlación (en cierto modo, sincronía) entre ambas. Sin embargo, a escala interna de cada UAE, se vuelve a evidenciar su naturaleza diacrónica. La identificación de distintas unidades de materias primas dentro de las propias UAE fue interpretada como aportes que representan acciones puntuales y que corresponderían a periodos de tiempo cortos dentro de un evento de ocupación. También apunta en esa dirección la superimposición de modificaciones antropogénicas y tafonómicas en algunas herramientas líticas (Machado y Pérez, 2016). En resumen, se trata de unidades formadas por sucesiones indefinidas de eventos deposicionales que pueden corresponder a varios episodios de ocupación (Machado y Pérez, 2016).

Mediante el estudio de biomarcadores y la micromorfología de suelos, Leierer et al. (2019) fueron capaces de detectar posibles momentos de abandono del yacimiento entre la realización de distintas estructuras de combustión de la subunidad Xb superpuestas. Esta propuesta se basa en el hecho de que, para que las capas negras de estas estructuras de combustión pudieran ser generadas con la quema, fue necesario que se formaran superficies vegetadas y con excrementos de herbívoros. Basándose en esto, identificaron al menos cuatro momentos diferentes de ocupación.

Para llegar a estas inferencias, también han sido importantes los trabajos de arqueología experimental realizados por el propio grupo de investigación de El Salt. Mallol et al. (2013b) demostraron que las capas negras de las estructuras de combustión representaban en realidad el sustrato (termoalterado) sobre el que se realizó el fuego y, por tanto, los materiales arqueológicos incluidos en dicha capa correspondían en realidad a algún momento anterior a la combustión. Pérez et al. (2017), por su parte, observaron que la cantidad de huesos quemados en las capas negras de una serie de fuegos experimentales es mayor que en las cenizas. Además, mientras que en las capas negras se podían recoger manualmente, en las cenizas fue casi imposible si no era mediante el tamizado del sedimento. Estas diferencias en la alteración pueden servir para identificar en qué momento se depositaron los huesos quemados. Además, la presencia de huesos no quemados en las capas de ceniza puede interpretarse como un aporte post-combustión.

4.3.2. Arqueomagnetismo aplicado a la disección de palimpsestos: hipótesis de trabajo

Como se puede ver a partir de lo comentado anteriormente, la interpretación de la unidad X requiere la búsqueda y el encaje de muchos y muy diversos datos para lograr reconstruir un puzzle complejo. Aunque se ha implementado una gran variedad de planteamientos y técnicas para llegar hasta la mayor resolución temporal posible, la mayoría de ellos se basan en indicadores indirectos que presentan poca resolución para aislar eventos de ocupación, por no mencionar la dificultad para determinar el tiempo que pudo transcurrir entre ellos. En este sentido, los análisis arqueomagnéticos pueden ayudar no sólo a aislar e individualizar ocupaciones prehistóricas a partir del registro magnético de hogares paleolíticos sino potencialmente a temporalizarlas.

La hipótesis de trabajo que a continuación se plantea se fundamenta en varias premisas. En primer lugar, los minerales ferromagnéticos (*s.l.*) presentes en materiales arqueológicos quemados preferentemente a altas temperaturas (> 500 – 600 °C) son susceptibles de registrar una magnetización remanente con la dirección del campo magnético terrestre en el momento en que se enfrían por última vez. En este sentido, consideramos cada estructura de combustión (cada hogar) como unidad básica de análisis cuyo registro magnético representa un momento concreto en el tiempo (en este caso, cuando se enfría por última vez). La segunda premisa se basa en el hecho de que el campo magnético terrestre experimenta cambios a lo largo del tiempo tanto en dirección como en intensidad a escala regional (reproducibles en áreas de unos 500-600 km de radio). Este fenómeno se conoce como *variación secular* y para latitudes medias como la península ibérica, sabemos que para los últimos tres mil años aproximadamente la declinación magnética ha oscilado entre 20° y -20° respecto al norte actual y la inclinación entre 40 y 70° (Molina-Cardín et al., 2018). En condiciones de preservación adecuadas, dichas variaciones direccionales pueden quedar registradas en el último calentamiento y enfriamiento de estos hogares. La hipótesis que se plantea aquí es que aquellos hogares que hayan registrado direcciones arqueomagnéticas medias diferentes fueron realizados (o al menos utilizados por última vez) en momentos diferentes. Es decir, determinar diacronía en la ocupación. En la Fig. 4.16 se ilustra gráficamente la hipótesis de trabajo planteada. Esta información ya es de gran importancia cuando trabajamos dentro de unidades/subunidades/conjuntos cuyos materiales son aparentemente sincrónicos, porque permitiría aislar o individualizar eventos de ocupación, algo crítico en arqueología paleolítica. Además de la identificación de posibles diacronías entre hogares expuestos en una misma paleosuperficie arqueológica, un aporte muy interesante que se propone a través del método arqueomagnético es tratar de estimar el tiempo transcurrido entre la quema de unos hogares y otros. Para ello es necesario conocer el tiempo mínimo necesario que permita identificar cambios direccionales debidos a la variación secular. Esto no es sencillo porque la variación secular es un

4. Materiales e hipótesis de trabajo

fenómeno errático que no sigue un patrón de cambio (dentro de un rango de dispersión) y cuya tasa de variación es irregular, siendo unas veces más rápido que otras. Dado que no existen registros detallados y de suficiente calidad (basados exclusivamente en datos termorremanentes) para estas cronologías (50 ka BP), se abordará esta cuestión comparando con modelos geomagnéticos disponibles para los últimos milenios. Esta comparación se basa en la observación de que la dispersión de la variación secular en las últimas decenas de miles de años no ha cambiado de forma importante. La posibilidad de temporalizar ocupaciones a partir del registro magnético de hogares paleolíticos es muy valiosa desde el punto de vista arqueológico, pues nos da un orden de magnitud del tiempo mínimo que puede haber sido necesario para la acumulación de materiales incluidos en la unidad/subunidad/conjunto de estudio. Este nivel de resolución no se conocía hasta ahora. Aunque el uso del arqueomagnetismo en contextos paleolíticos ha sido aplicado esporádicamente en otros yacimientos (Carrancho et al., 2016b; Sternberg y Lass, 2007; Zeigen et al., 2019), la nueva propuesta metodológica aquí presentada no había sido aplicado con anterioridad.

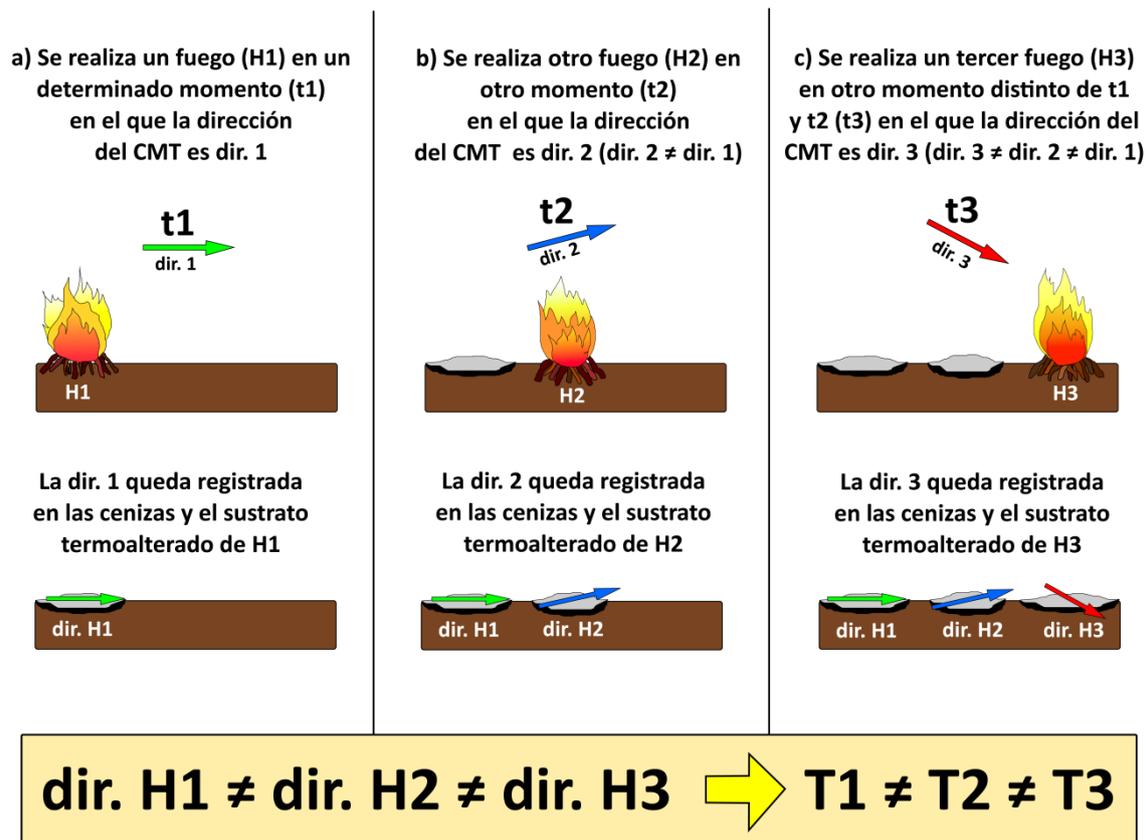
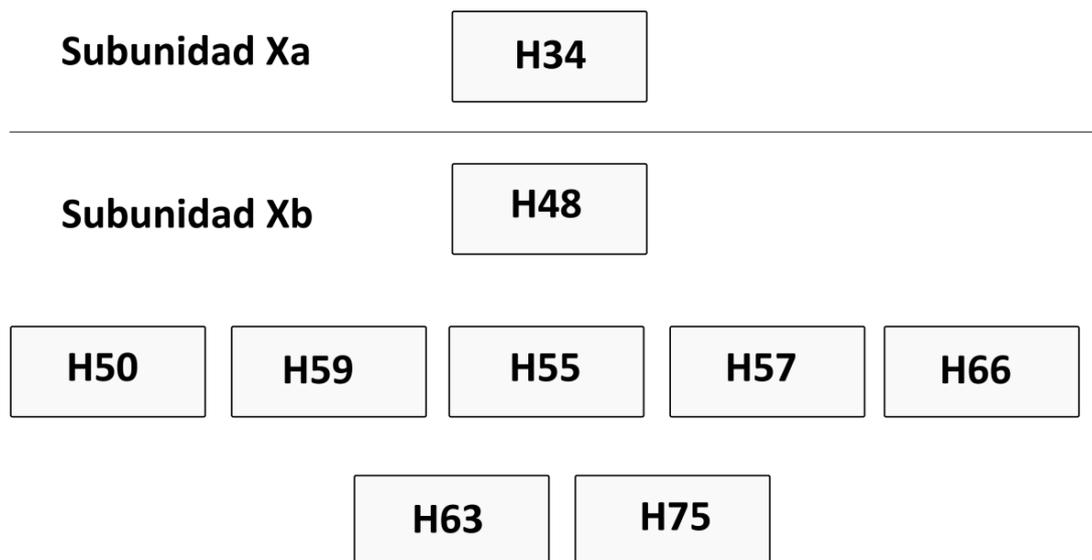


Fig. 4.16. Hipótesis de trabajo para la disección de la unidad X de El Salt a partir de las diferencias en la dirección registradas en materiales quemados a causa de la variación secular del campo magnético terrestre.

4.3.3. Materiales estudiados de la unidad X de El Salt

La recogida de materiales de la unidad X se ha extendido a lo largo de los años de forma continuada desde 2014. El muestreo se llevó a cabo sobre la actual zona de excavación (zona 1, Fig. 4.13) y sólo se pudo acceder a las estructuras (hogares) a medida que iban aflorando durante el proceso de excavación. Se han estudiado 9 estructuras de combustión: H34, H48, H50, H55, H57, H59, H63, H66 y H77. Todas ellas pertenecen a la subunidad Xb, con la única excepción de H34, que pertenece a Xa. Dentro de las estructuras de la subunidad Xb estudiadas, a partir de las observaciones realizadas en el campo, se ha interpretado que H48 sería la más superficial (la más joven) (Fig. 4.17). H50, H55, H57, H59 y H66 aparecen estratigráficamente por debajo de H48, pero no se puede establecer una correlación estratigráfica inequívoca entre ellas (Fig. 4.17). Por debajo de estas estructuras, aparecen H63 y H75, aunque nuevamente no se puede establecer correlación (Fig. 4.17).

(Más superficial)



(Más profundo)

Fig. 4.17. Relación estratigráfica propuesta para las estructuras de combustión de la unidad X estudiadas en este trabajo.

El muestro de estos fuegos se realizó mediante la recogida de bloques de mano. Fundamentalmente se recogió sustrato termoalterado, aunque no se puede descartar que en algunos casos incorporen otras facies. Los bloques de H55 y algunos

4. Materiales e hipótesis de trabajo

de H50 (C3 y C4) presentaban ceniza a techo. Y el bloque de C1 de H50 únicamente contenía ceniza.

A partir de los bloques, se obtuvo una colección de especímenes cúbicos (de unos 10 cm³ cada uno), parte de los cuales fueron seleccionados para ser desmagnetizados teniendo en cuenta su posición en profundidad (lo cual está directamente relacionado con el grado de impacto térmico) y la cantidad de escayola que contenían (se prefirió aquellos que tuvieran menos). Además de las estructuras de combustión, se recogió muestra del sustrato no quemado de la unidad X. En la Tabla 4.3 se resume la cantidad de bloques recogidos y de muestras procesadas para cada estructura de combustión. En el Anexo 2 se recoge información más detallada sobre los especímenes procesados. En total, la NRM de 138 especímenes fue desmagnetizada térmicamente (entre 14 y 22 pasos hasta 575-680 °C). Puesto que estos materiales son susceptibles de contener termorremanencias parciales y la desimación térmica generalmente permite aislar mejor las componentes, no se ha realizado la desmagnetización de especímenes mediante campos alternos. La susceptibilidad inicial a temperatura ambiente fue medida para la mayor parte de los especímenes seleccionados. Además, para buena parte de los desmagnetizados térmicamente se midió también a cada paso de calentamiento.

También se recogió muestra suelta de facies representativas para la caracterización de la mineralogía ferromagnética mediante experimentos de magnetismo de las rocas: adquisición de IRM, curvas de *backfield*, ciclos de histéresis y curvas termomagnéticas (temperatura *versus* magnetización). En los casos en los que se consideró necesario, se extrajo muestra suelta de algunos especímenes orientados que no habían sido desmagnetizados.

Estructura de combustión	Bloques de mano recogidos	Especímenes desmagnetizados
H34	2	18
H48	1	10
H50	4	29
H55	4	30
H57	1	8
H59	1	12
H63	2	10
H66	2	9
H75	2	8
Sustrato no quemado	2	4

Tabla 4.3. Bloques y especímenes muestreados por cada estructura de combustión de la unidad X de El Salt.

4.3.4. Contribuciones a la identificación de materiales potencialmente quemados

El estudio del registro magnético para la detección de materiales arqueológicos quemados ha sido aplicado en investigaciones previas (p. ej.: Bellomo, 1993; Zhang et al., 2014). Si bien es cierto que el arqueomagnetismo y el magnetismo de las rocas por sí mismos pueden no ser la solución definitiva para la identificación de materiales quemados, su combinación con otras técnicas puede ser útil para ello.

Teniendo en mente esta idea, durante la campaña de excavación de verano de 2015 se planteó la posibilidad de tomar muestras de distintos horizontes de los perfiles 1 y 2 de El Salt (Fig. 4.18 y 4.19). El objetivo en este caso era identificar con ayuda de las técnicas magnéticas (arqueomagnetismo y magnetismo de las rocas), si existía algún parámetro que permitiera identificar si se trataba de capas negras de episodios de combustión o, alternativamente, materiales húmicos (hojarasca podrida, etc.). Sin embargo, su color y aspecto visual hace difícil distinguirlo en el campo de facies oscuras termoalteradas. Otros horizontes parecían corresponder a facies de cenizas. Cabría esperar que los valores de la NRM y de la susceptibilidad magnética fuesen más altos en las facies quemadas que en las no quemadas. Por ello, utilizando el dispositivo para muestrear sedimentos blandos o no litificados, se recogieron 31 especímenes orientados (de unos 3.6 cm³ y encapsulados en cajas de plástico): 18 de la zona de muestreo P2A, localizada en el perfil 2 (Fig. 4.18) y 13 de la zona P2B localizada en el perfil 1, ya en la esquina limítrofe con el perfil 2 (Fig. 4.19). En el Anexo 3 se recoge información detallada sobre las muestras.

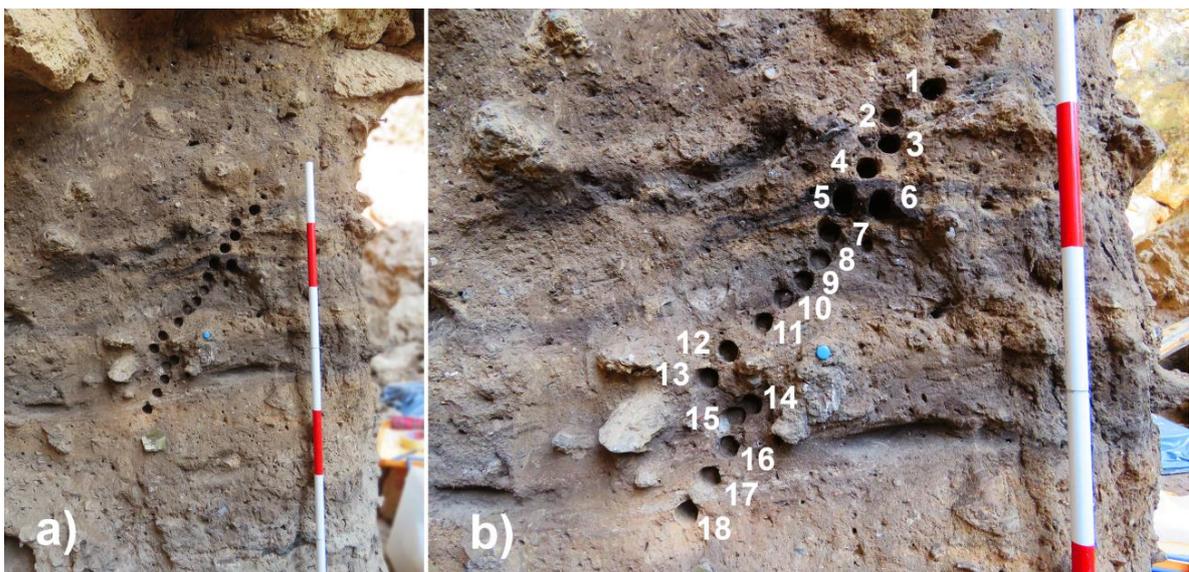


Fig. 4.18. (a) Vista general y (b) vista en detalle de la zona de muestreo P2A del perfil 2 de El Salt, donde se localizan los especímenes orientados recogidos.

4. Materiales e hipótesis de trabajo

La NRM de todos los especímenes fue desmagnetizada por campos alternos decrecientes en 20 pasos hasta 100 mT. Se midió la susceptibilidad magnética a temperatura ambiente de todos ellos. Se realizaron experimentos de magnetismo de las rocas con una balanza de traslación del campo magnético variable, similares a los descritos en apartados anteriores (curvas de adquisición de IRM, ciclos de histéresis, curvas de backfield y curvas de magnetización a alta temperatura), sobre todas las muestras orientadas después de la desmagnetización y sobre algunas muestras sueltas adicionales que también fueron recogidas (P2B-13 y P2B-14, Fig. 4.19).

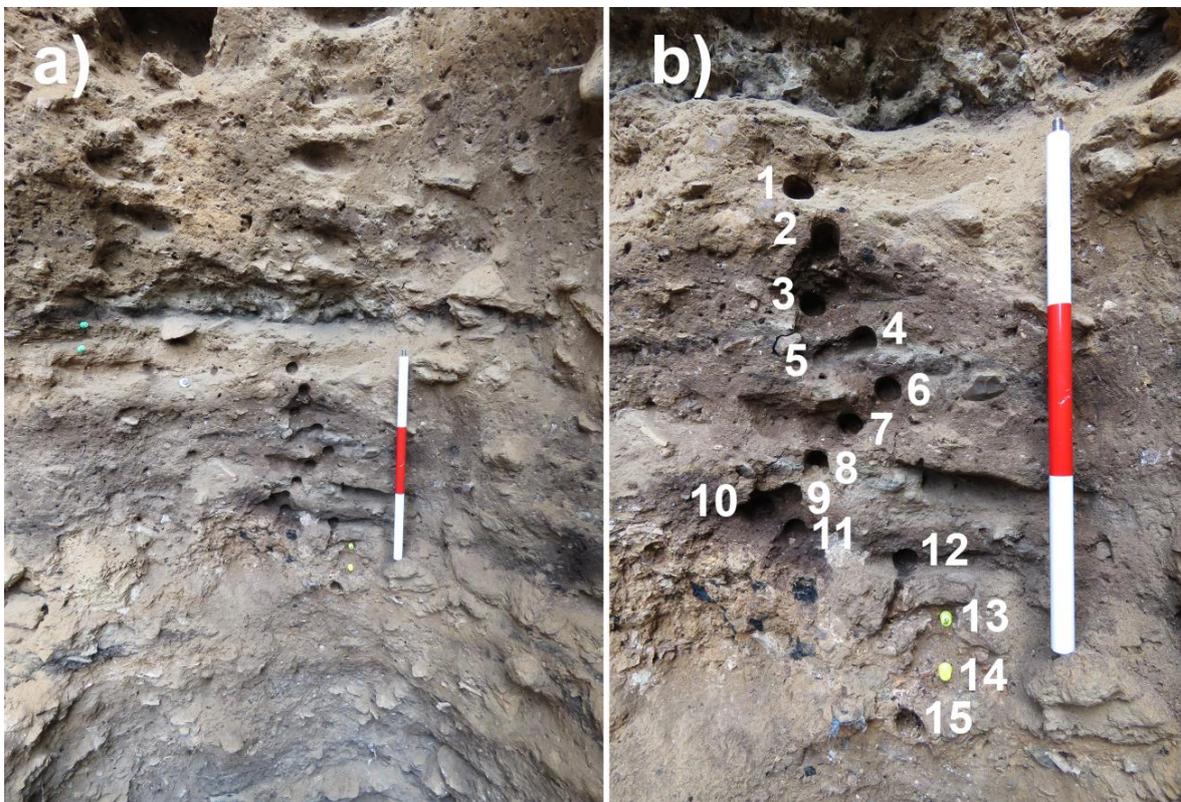


Fig. 4.19. (a) Vista general de P2B -perfil 1 de El Salt- y (b) vista en detalle donde se puede ver la localización de las muestras extraídas (todas ellas son especímenes orientados, con la única excepción de 13 y 14, que corresponden a muestra suelta). Cada tramo del jalón representa 10 cm.

4.4. Episodios de combustión antrópica holocenos en cueva: depósitos de *fumiers*.

Los *fumiers* son depósitos de origen antrópico vinculados al apilamiento y la quema periódica de excrementos de animales y restos vegetales en cuevas redil (Angelucci et al., 2009; Brochier, 2002; Brochier et al., 1992; J. E. Brochier, 1983; Carrancho, 2010; Vergès et al., 2016a). En estos depósitos se intercalan capas quemadas y capas poco o nada quemadas de estiércol y material vegetal, todas ellas generalmente estratificadas sub-horizontalmente o siguiendo la topografía del sustrato (Angelucci et al., 2009). Aparecen principalmente en la Europa mediterránea entre el Neolítico y la Edad del Hierro, aunque puede que su distribución original fuese más amplia y que la disposición actual esté condicionada por cuestiones de preservación y del desarrollo mismo de las investigaciones arqueológicas (Angelucci et al., 2009). Teniendo en cuenta que para cronologías de la prehistoria reciente (ca. VI-I milenio a.C) existe una importante carencia de datos direccionales en la península ibérica (véase la Fig. 1.1. del capítulo 1), estos materiales son candidatos óptimos para la mejora y extensión temporal de las curvas de variación secular y modelos geomagnéticos.

El registro arqueomagnético de estos materiales ha sido evaluado en estudios previos (Carrancho et al., 2009, 2012, 2013, Kapper et al., 2014a, 2014b) y se han podido obtener datos direccionales de algunos episodios que, por estar bien datados radiométricamente (C^{14}) de manera independiente, han contribuido a la generación de la primera curva de variación paleosecular europea que abarca desde el año 1000 a.C. hasta el 6000 a.C. (Carrancho et al., 2013).

En este trabajo se han estudiado 26 nuevos episodios de combustión provenientes de cuatro yacimientos diferentes ubicados dentro de la península ibérica: el Abrigo de La Castañera (Cantabria), la Cueva de El Mirador (Burgos), el Abrigo de San Cristóbal (Álava) y la Cueva de El Estillín (Burgos) (Fig. 4.20).

Para delimitar los episodios de combustión, se ha tenido en cuenta la presencia recurrente de facies quemadas que éstos presentan. A techo aparecen facies con cenizas (generalmente blancas y/o grises) de espesor variable, que marcan el límite superior del episodio de combustión. En algunos sitios como en la Cueva de El Mirador (Angelucci et al., 2009) o el abrigo de San Cristóbal (Polo-Díaz et al., 2016) se han realizado estudios geoarqueológicos detallados en los que se ha mostrado que existen distintas facies de cenizas pero para los propósitos de este trabajo, y puesto que no poseemos de análisis en detalle de todos los episodios estudiados, hablamos de cenizas de una manera genérica. Inmediatamente por debajo aparece la facies carbonosa (de color oscuro, negro) y/o la rubefacción (de color pardo-rojizo), generalmente de no más de 2 cm de espesor. En el estudio arqueomagnético de *fumiers* que llevó a cabo Carrancho (2010), se llamó rubefacción a la capa negra que

4. Materiales e hipótesis de trabajo

ahora llamamos facies carbonosa. No tienen por qué aparecer las dos conjuntamente, pero sea sólo una de ellas o sean ambas, se consideran el límite inferior del episodio de combustión. Siguiendo los criterios de calidad establecidos por Carrancho et al. (2013), solo se muestrearon episodios de combustión que preservaran tanto cenizas como facies carbonosa/rubefacción. Fundamentalmente, se han tomado muestras de cenizas, aunque también se han recogido algunas muestras de facies carbonosas (para más detalles, véase Anexo 4). Diversas imágenes ilustrativas de estos episodios se muestran en el presente capítulo.

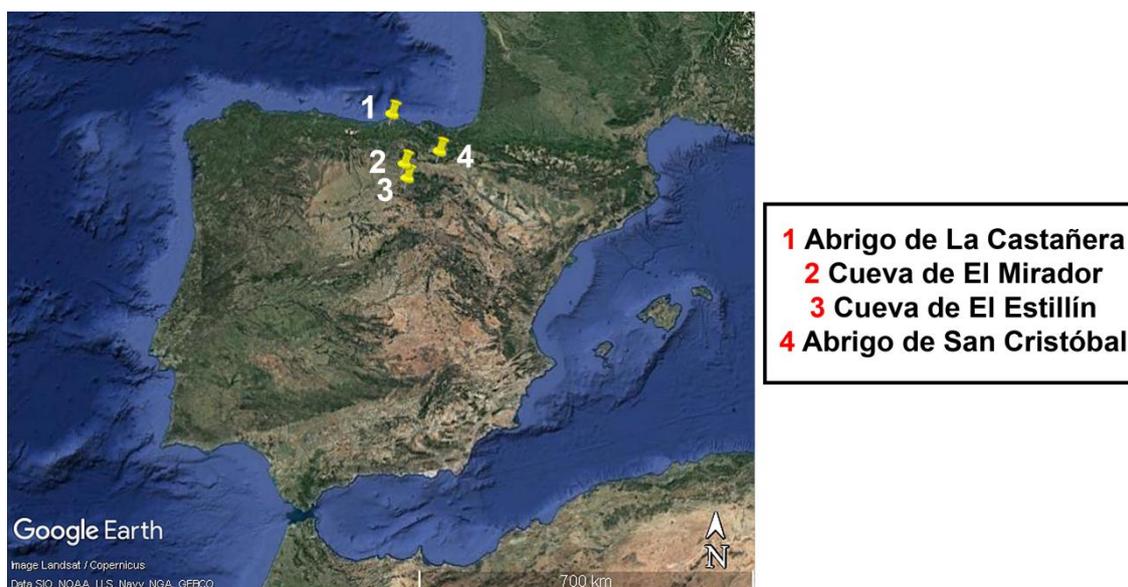


Fig. 4.20. Mapa de la península ibérica donde se señala la localización de los cuatro yacimientos con depósitos de *fumières* estudiados en este trabajo. [Mapa tomado de Google Earth Pro]

4.4.1. Abrigo de La Castañera

El Abrigo de la Castañera se encuentra en Obregón (Villaescusa, Cantabria; Lat.: 43° 21' 20" N, Long.: 03° 51' 26" O; Fig. 4.20). Han sido varias las intervenciones desarrolladas en el abrigo desde mediados del siglo XX aproximadamente hasta llegar a los trabajos más recientes, dirigidos por la Dra. Cristina Vega (Universidad de Cantabria), cuyo principal objetivo ha sido evaluar la estratigrafía del yacimiento y la integridad del registro arqueológico (Vega Maeso, 2015). La correlación entre unidades estratigráficas de las distintas zonas excavadas es compleja, pero las unidades observadas se pueden inscribir en cuatro grandes grupos según el período cultural al que se adscriben: (1) niveles con alteraciones recientes correspondientes a episodios de excavaciones legales e ilegales del siglo XX, (2) niveles de la Edad del Bronce, (3) niveles calcolíticos y (4) niveles neolíticos (Vega-Maeso et al., 2015). Los niveles que aquí nos interesan corresponden al Calcolítico y se subdividen en dos fases: una primera fase en la que el abrigo se usa como zona de hábitat y una segunda

en la que se usa como corral de ganado (Vega-Maeso et al., 2015) (Fig. 4.21). Precisamente en esa segunda fase aparecen depósitos de *fumiers*.

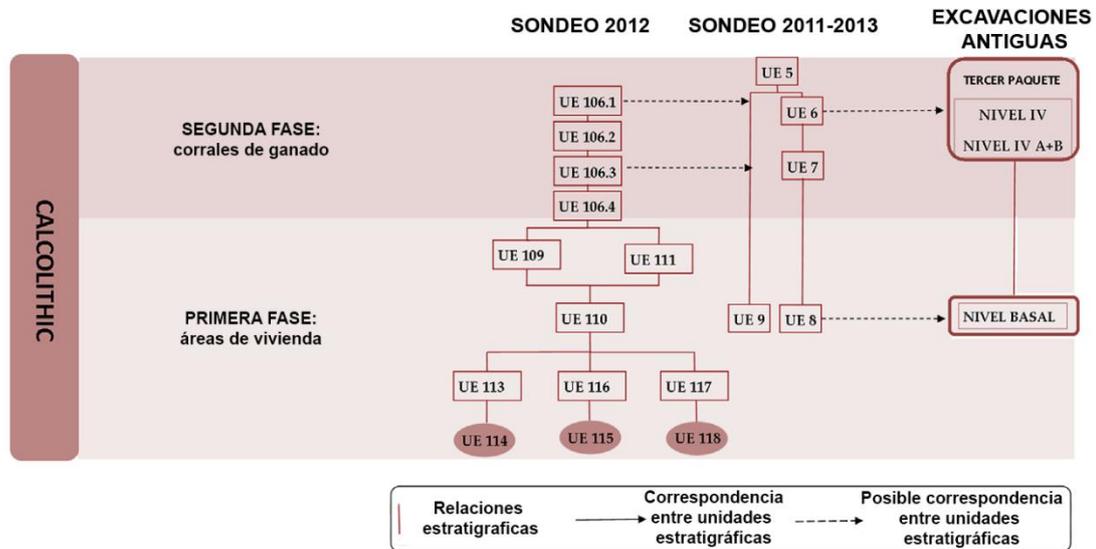


Fig. 4.21. Matriz de Harris de los niveles calcolíticos del Abrigo de La Castañera. En ella puede ver la correlación estratigráfica de las unidades de las distintas zonas de excavación. [Modificado a partir de Vega-Maeso et al. (2015)]

Se han estudiado cuatro episodios de combustión: CA1, CA2, CA3 y CA4 (Fig. 4.22). Todos ellos corresponden a la segunda fase del Calcolítico, cuya datación radiocarbónica (proveniente de la unidad estratigráfica 5, la más reciente; Fig. 4.21) es 4100 ± 25 BP (2860-2574 cal. BC al 95.4% de probabilidad; Vega-Maeso et al., 2015). Cabe la posibilidad de que el evento de combustión CA4 sea en realidad parte de CA3, pero en el campo no se observaba continuidad lateral y fueron considerados como dos episodios independientes. En total se muestrearon 58 especímenes orientados de unos 3.6 cm^3 (Tabla 4.4 y Anexo 4) con ayuda del dispositivo para tomar materiales expuestos en perfiles (véase el apartado 3.1 del capítulo 3). 21 de los especímenes fueron introducidos en cubos de escayola y su NRM fue desmagnetizada térmicamente (entre 13 y 17 pasos hasta 580-660 °C). Los demás especímenes fueron introducidos en cápsulas de plástico y su NRM fue desmagnetizada por campos alternos decrecientes (18 pasos hasta 100 mT). Además, se midió a temperatura ambiente la susceptibilidad magnética inicial y la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM). Por otro lado, se recogió muestra suelta de facies representativas de cada evento de combustión para la realización de experimentos de magnetismo de las rocas (curvas de adquisición progresiva de IRM, ciclos de histéresis, curvas de *backfield* y curvas termomagnéticas).

4. Materiales e hipótesis de trabajo

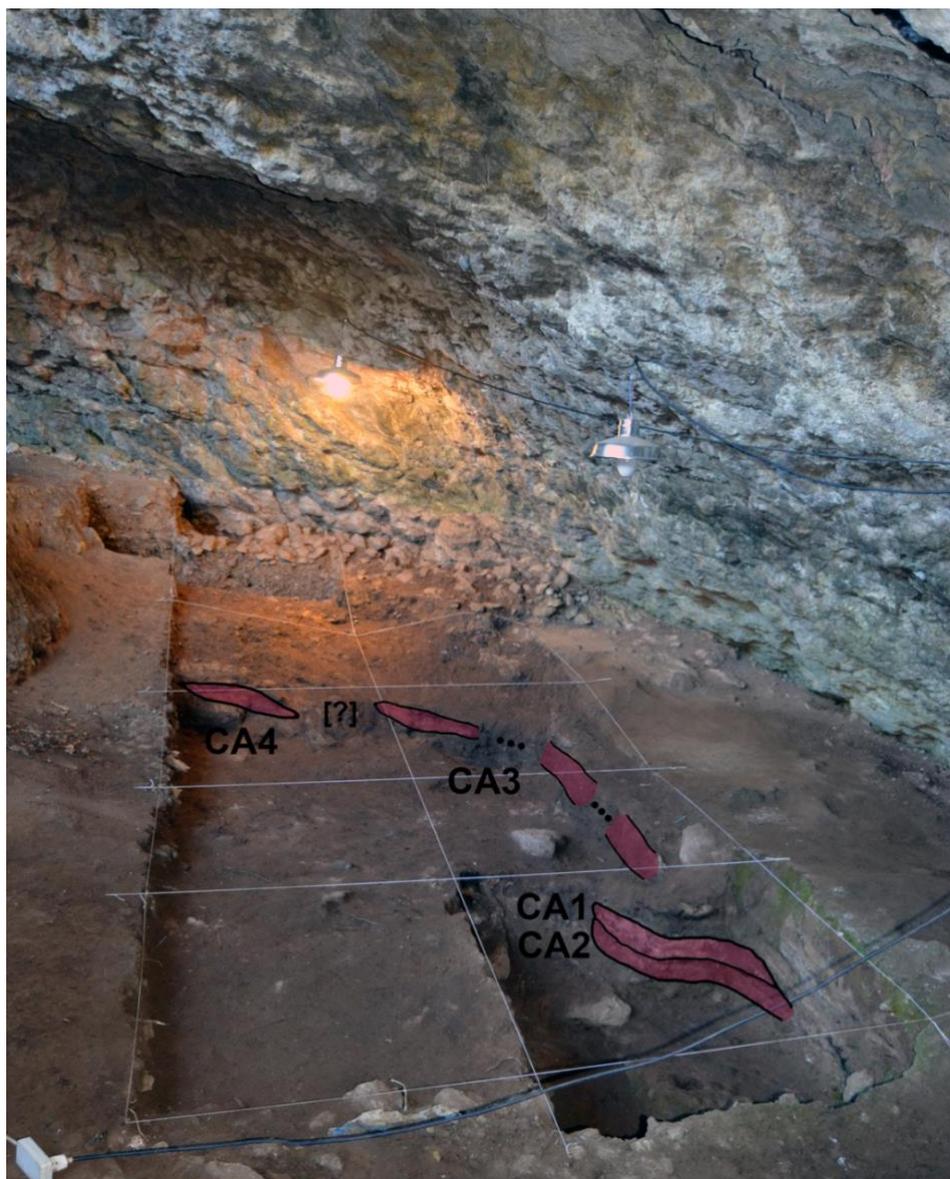


Fig. 4.22. Imagen del Abrigo de la Castañera (Cantabria) donde se muestra la localización de los cuatro episodios de combustión muestreados.

Episodio de combustión	Número de especímenes orientados recogidos	Edad sin calibrar (BP)	Datación en años de calendario calibrados (cal BC)
CA1	19	4100 ± 25	2860-2574
CA2	13	4100 ± 25	2860-2574
CA3	12	4100 ± 25	2860-2574
CA4	14	4100 ± 25	2860-2574

Tabla 4.4. Episodios de combustión estudiados en el Abrigo de la Castañera (Cantabria), número de especímenes orientados recogidos para cada episodio y edades correspondientes (Vega-Maeso et al., 2015).

4.4.2. Cueva de El Mirador

La Cueva de El Mirador se encuentra dentro del sistema kárstico de la Sierra de Atapuerca (Ibeas de Juarros, Burgos; Lat.: 42° 20' 58" N, Long.: 03° 30' 33" O; Fig. 4.20). Se trata de una cavidad cuya boca se abre hacia el sureste y mide unos 23 metros de anchura, 4 metros de altura y 15 metros de profundidad. La morfología actual corresponde al colapso de parte de su bóveda en momentos antiguos (Vergès et al., 2016b, 2008, 2002).

En los 70 hubo una primera intervención arqueológica por parte del Grupo Espeleológico Edelweiss, que mostró la existencia de diversos materiales arqueológicos (Vergès et al., 2002) y posteriormente sufrió los efectos de la actividad furtiva. Ya en 1999 se comenzó a excavar un sondeo de 6 m² que permitiera después planificar la excavación en extensión (Vergès et al., 2002). Este sondeo reveló una secuencia de una veintena de metros de profundidad que incluye 6 metros de depósito holoceno y 14 metros de depósito pleistoceno (Vergès et al., 2016b) (Fig. 4.23). El depósito holoceno contiene ocupaciones neolíticas (4 metros; unidades estratigráficas de MIR24 a MIR6) y de la Edad del Bronce (2 metros; unidades estratigráficas MIR4 y MIR3A) (Vergès et al., 2016b). Es en la secuencia holocena donde se documentan los depósitos tipo *fumiers*. Algunos de esos episodios de combustión fueron objeto de estudios arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas y mostraron el potencial de estos materiales para este tipo de análisis (Carrancho et al., 2016a; Carrancho, 2010; Carrancho et al., 2013, 2009). Precisamente a partir de esta secuencia se obtuvieron 15 nuevas direcciones que, junto con otros nuevos datos procedentes también de la península ibérica, contribuyeron a la generación de la primera curva direccional de Variación Secular para Europa que llegaba hasta el Neolítico basada exclusivamente en datos arqueomagnéticos (Carrancho et al., 2013).

En la actualidad, el sondeo que se abrió en 1999 permanece sellado desde hace varias campañas, pero se continúa excavando en otros dos sectores distintos de la cueva: el sector 100 (al suroeste) y el sector 200 (al noreste) (Fig. 4.24a). Entre los nuevos hallazgos, cabe destacar la localización de restos humanos (más de una veintena de individuos como mínimo) en la cámara natural que conforma el sector 200, correspondientes a un episodio de enterramiento colectivo calcolítico, que permitió la realización de análisis genéticos (Gómez-Sánchez et al., 2014; Vergès et al., 2016b). Pero lo que más nos interesa aquí es la aparición de nuevos depósitos de *fumiers* en el sector 100, parte de los cuales han sido estudiados en el presente trabajo.

4. Materiales e hipótesis de trabajo

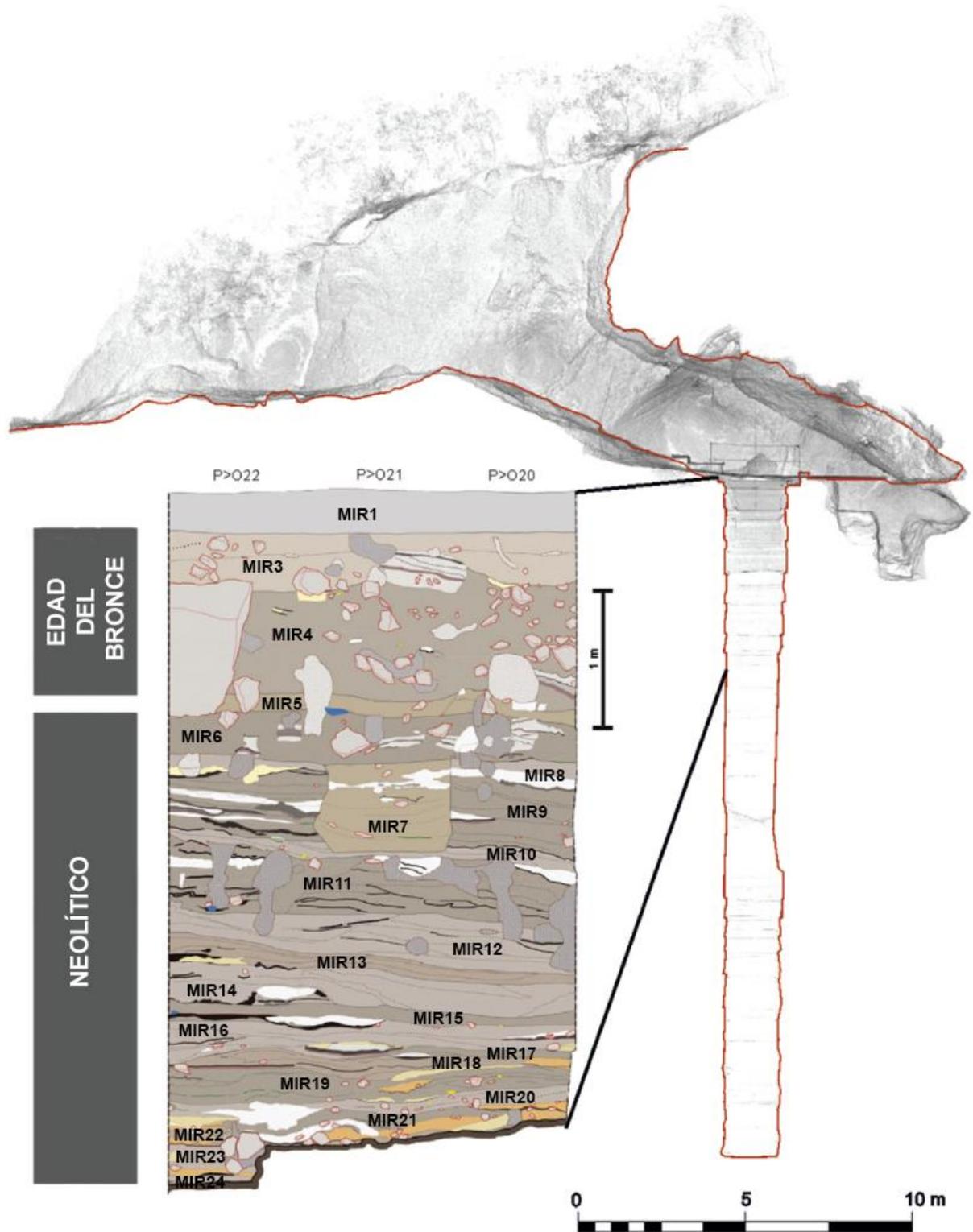


Fig. 4.23. Estratigrafía del sondeo de la Cueva del Mirador [modificado a partir de Vergès et al. (2016b)]

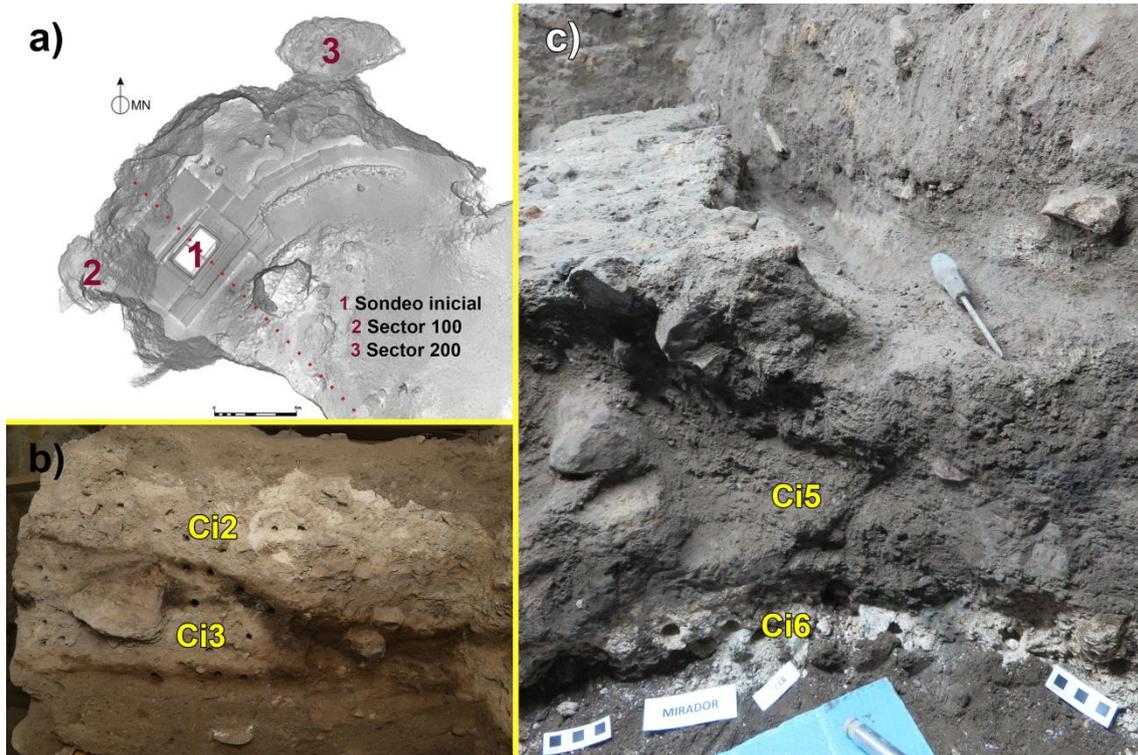


Fig. 4.24. (a) Plano de la Cueva de El Mirador, en el que se marcan las distintas zonas de excavación; (b) episodios de combustión Ci2 y Ci3 (sector 100); (c) episodios de combustión Ci5 y Ci6. Ci7 no se ve en la imagen, pero se ubica debajo de Ci6, todos del sector 100. [Imagen (a) modificada a partir de Vergès et al. (2016b), imágenes (b) y (c) cortesía del equipo investigador de la Cueva de El Mirador]

Se han estudiado cinco episodios de combustión del sector 100 de la Cueva de El Mirador: Ci2, Ci3, Ci5, Ci6 y Ci7 (Fig. 4.24a). Ci2 y Ci3 pertenecen a la unidad MIR104, para la que se tiene una datación C^{14} (AMS) de 3350 ± 30 BP (1710-1510 cal. BC) (Vergès et al., 2016b). Ci2 se encuentra inmediatamente por encima de Ci3 (Fig. 4.24b). Las cenizas de ambos episodios tienen un color grisáceo en el caso de Ci2, y algo más pardo en el de Ci3. En algunas zonas de Ci2 aparecía una facies blanquecina. Las cenizas de estos episodios presentan un espesor considerable (hasta unos 10-20 cm en las zonas más espesas; Fig. 4.24b) y en ocasiones aparecen clastos y bloques insertos en ellas (véase, p. ej. Ci3 en Fig. 4.24b). La facies carbonosa subyacente es bastante oscura, con un espesor de unos 2 cm, y se acuña en algunas zonas, dando la sensación de que quizás podría existir un episodio intermedio (Fig. 4.24). Ci5, Ci6 y Ci7 están estratigráficamente por debajo de Ci2 y Ci3 y se engloban dentro de la unidad MIR107. La datación disponible para esta unidad es de 5640 ± 30 años BP [4542 - 4441 cal BC al 79.1% de probabilidad y 4425 - 4371 cal BC al 16.3% de probabilidad según el método de rango de densidad de alta probabilidad o HPD y utilizando INTCAL13 (Reimer et al., 2013) para la calibración] (Josep Maria Vergès, comunicación personal). En esta unidad aparecieron 4 episodios de combustión, de los cuales 3 fueron muestreados. Ci5 se encuentra inmediatamente por encima de Ci6

4. Materiales e hipótesis de trabajo

y éste último, a su vez, se encuentra inmediatamente por encima de Ci7 (Fig. 4.24c). Las cenizas de Ci5 son grises, las de Ci6 algo más blanquecinas y las de Ci7 presentan un color más pardo-rojizo (Fig. 4.24c). Ci6 parecía tener sus granos bastante sueltos. En total, se cuenta con 127 especímenes orientados de aproximadamente 3.6cm³ (Tabla 4.5 y Anexo 4), tomados con el dispositivo para muestrear en perfiles estratigráficos. 21 de ellos fueron encapsulados en cajas de cuarzo. Su NRM se desmagnetizó térmicamente (entre 15 y 19 pasos hasta 580-625 °C). Los restantes fueron introducidos en cajas de plástico y desmagnetizados por campos alternos decrecientes (entre 18 y 21 pasos hasta 80-100 mT). Se midió también la susceptibilidad magnética inicial a temperatura ambiente en la mayor parte de la colección, así como la ASM. Además, se tomó muestra suelta de facies representativas de cada evento de combustión para realizar los experimentos de magnetismo de las rocas, que incluyeron adquisición progresiva de IRM, ciclos de histéresis, curvas de *backfield* y curvas termomagnéticas.

Episodio de combustión	Número de especímenes	Unidad estratigráfica	Edad sin calibrar (BP)	Intervalo de datación en años de calendario calibrados (cal BC) [entre paréntesis la probabilidad correspondiente]
Ci2	42	MIR104	3350 ± 30	1710-1510 cal. BC (2σ)
Ci3	41	MIR104	3350 ± 30	1710-1510 cal. BC (2σ)
Ci5	16	MIR107	5640 ± 30	4542 - 4441 cal. BC (79.1%) 4425 - 4371 cal. BC (16.3%)
Ci6	16	MIR107	5640 ± 30	4542 - 4441 cal. BC (79.1%) 4425 - 4371 cal. BC (16.3%)
Ci7	12	MIR107	5640 ± 30	4542 - 4441 cal. BC (79.1%) 4425 - 4371 cal. BC (16.3%)

Tabla 4.5. Episodio de combustión muestreados en la Cueva de El Mirador (Burgos), número de especímenes orientados recogidos para cada episodio, unidad estratigráfica a la que pertenecen y edades correspondientes (Vergès et al., 2016b y Josep Maria Vergès, comunicación personal).

4.4.3. Abrigo de San Cristóbal

El Abrigo de San Cristóbal se encuentra localizado en la Sierra de Cantabria (Laguardia, Álava; Lat.: 42° 36' 00" N, Long.: 02° 36' 37" W, Fig. 4.20). Su secuencia estratigráfica contiene trece niveles que abarcan desde Neolítico Antiguo hasta la Edad del Bronce y, además, en los siglos XV-XVI fue usado como eremitorio (Fernández-Eraso et al., 2017; Polo-Díaz et al., 2016).

De este yacimiento se han estudiado 11 episodios de combustión expuestos en un sondeo de 9 m², cuyas fechas radiocarbónicas calibradas oscilan entre 5410±30 (4340–4230 cal BC; nivel XI) y 4030±40 (2820-2470 cal BC; nivel IV) (Tabla 4.6) (Fernández-Eraso, 2012, 2011, 2010, 2009, 2002; Polo-Díaz et al., 2016). Los episodios del SC-1 al SC-8 fueron muestreados en el perfil oeste (Fig. 4.25), mientras que los episodios SC-9, SC-10 y SC-11 provienen del perfil este (Fig. 4.26).

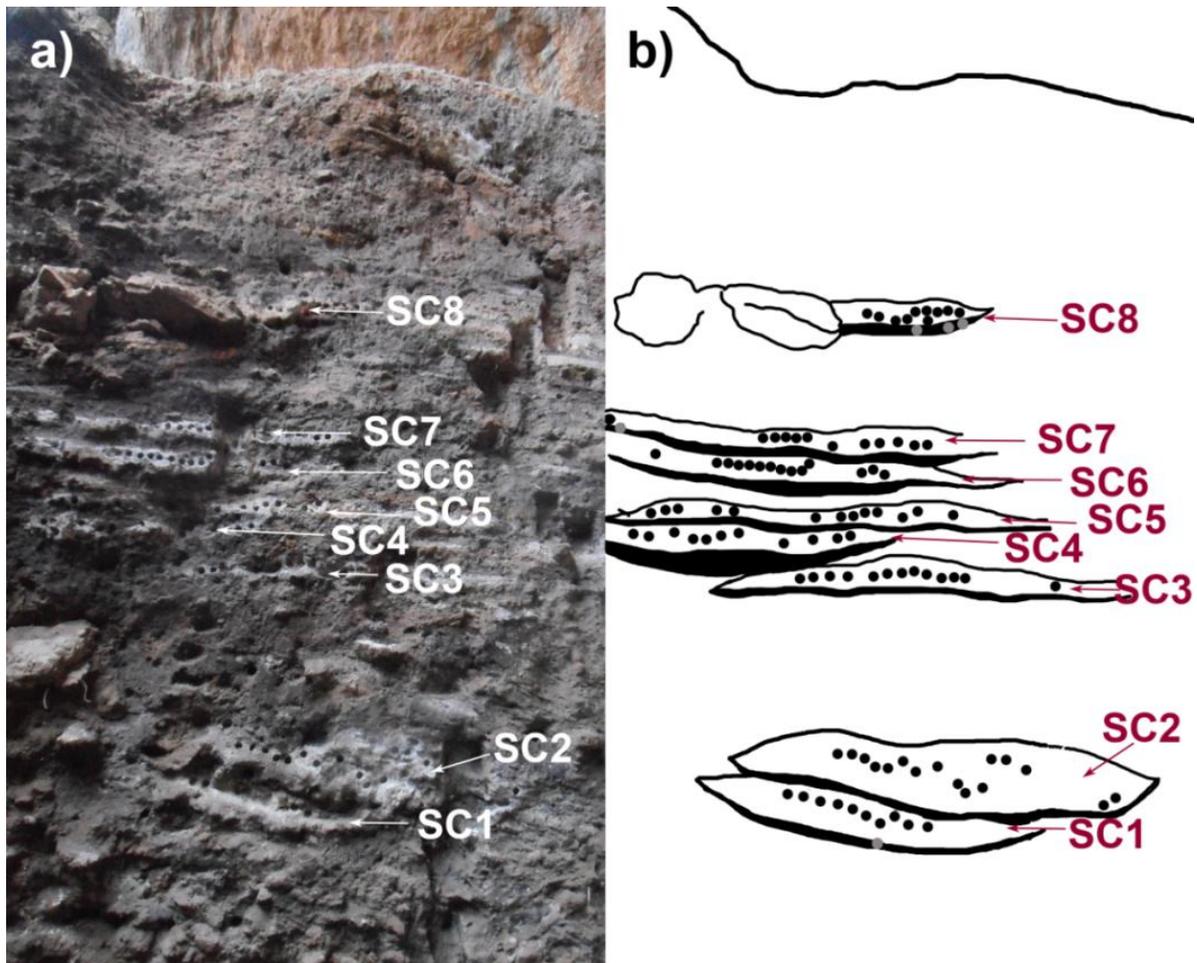


Fig. 4.25. (a) Imagen del perfil oeste del yacimiento de San Cristóbal (Álava) donde se marcan los episodios de combustión muestreados y (b) representación esquemática de la procedencia aproximada de cada uno de los especímenes.

El episodio SC11 corresponde a un gran apilamiento de ceniza bastante inusual por su espesor y que presentaba marcas de poste. La parte superior del perfil está cortada por una fosa, producida por algún proceso post-deposicional que habría distorsionado parcialmente esta parte de la estratigrafía (Polo-Díaz et al., 2016); Fig. 4.26).

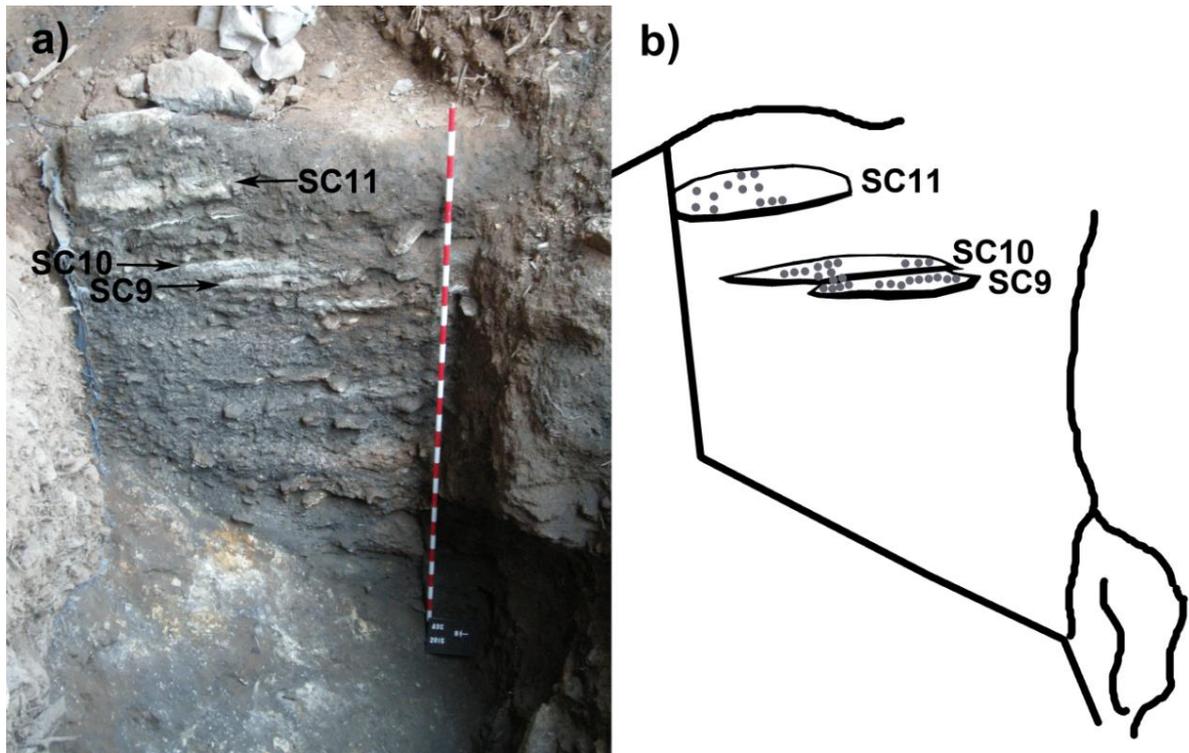


Fig. 4.26. (a) Imagen del perfil este del yacimiento de San Cristóbal donde se marcan los episodios de combustión muestreados y (b) representación esquemática de la procedencia aproximada de cada uno de los especímenes.

En total se han procesado 150 especímenes orientados de unos 3.6 cm^3 (Tabla 4.6 y Anexo 4), tomados en el campo con ayuda del dispositivo para muestrear en perfiles estratigráficos. 42 especímenes fueron introducidos en cápsulas de cuarzo y su NRM fue desmagnetizada térmicamente (entre 16 y 18 pasos hasta $585\text{-}625 \text{ }^\circ\text{C}$). Los 108 especímenes restantes fueron introducidos en cajas de plástico y su NRM fue desmagnetizada por campos alternos decrecientes (20 pasos hasta 100 mT). Además, se midió la susceptibilidad inicial y la ASM. Adicionalmente, se recogió muestra suelta de facies representativas de todos los episodios de combustión para la realización de los experimentos de magnetismo de las rocas (adquisición de la IRM, ciclos de histéresis, curvas de *backfield*, curvas termomagnéticas).

Episodio de combustión	N° de especímenes orientados procesados	Nivel	Perfil en que se muestreó	Profundidad (cm desde la superficie)	Edad sin calibrar (BP)	Datación en años de calendario calibrados (cal BC)
SC1	12	XI	Oeste	381	5410 \pm 30	4340-4230
SC2	16	XI	Oeste	374	5320 \pm 30	4250-4040
SC3	14	VIII	Oeste	330	4470 \pm 40	3350-3020
SC4	12	VIII	Oeste	310	4470 \pm 40	3350-3020
SC5	14	VIII	Oeste	306	4470 \pm 40	3350-3020
SC9	14	VII	Este	301	4260 \pm 40	2920-2870
SC6	14	VII	Oeste	296	4260 \pm 40	2920-2870
SC10	14	VII	Este	294	4260 \pm 40	2920-2870
SC7	14	VI	Oeste	283	4100 \pm 40	2870-2800 2780-2560 2520-2500
					4170 \pm 40	2890-2620
SC11	12	IV	Oeste	260	4030 \pm 40	2830-2820 2630-2470
SC8	14	IV	Este	247	4030 \pm 40	2830-2820 2630-2470

Tabla 4.6. Información cronoestratigráfica sobre los episodios de combustión muestreados en el Abrigo de San Cristóbal (Álava). Se indica (de izquierda a derecha): episodio de combustión, número de especímenes muestreados, nivel y perfil estratigráfico, profundidad y dataciones radiocarbónicas sin calibrar (BP) y calibradas (BC). (Fernández-Eraso, 2012, 2011, 2010, 2009, 2002; Polo-Díaz et al., 2016) y Fernández-Eraso, comunicación personal).

4.4.4. Cueva del Estillín

La Cueva del Estillín está localizada en Hortigüela (Valle del Arlanza, Burgos; Lat.: 42° 03' 22" N, Long.: 03° 26' 51" O; Fig. 4.20), justo enfrente -y unos metros por debajo- del yacimiento musteriense de Cueva Millán. Está orientado hacia el suroeste. En la actualidad se encuentra en los primeros estadios de investigación, por lo que aún no se dispone de mucha información. Durante las excavaciones iniciadas en 2017, dirigidas por el Dr. Policarpo Sánchez (Universidad de Valladolid) y que implicaron la

4. Materiales e hipótesis de trabajo

realización de un pequeño sondeo de aproximadamente 2 x 1.5 x 1.1 m, han aparecido múltiples episodios de combustión en muy buen estado de conservación. Por ello, fueron considerados para este trabajo.

Se han estudiado 6 episodios de combustión (CE6, CE7, CE8, CE9, CE10 y CE11). Sus cenizas tienen bastante espesor (hasta 5-10 cm aproximadamente) y su color varía entre gris, pardo y blanquecino. Estos episodios se caracterizan por presentar un plano sedimentario horizontal, y aunque se identificó la presencia ocasional de posibles madrigueras, las zonas donde aparecían fueron evitadas para el muestreo con el fin de evitar procesos de bioturbación. Los episodios de combustión se suelen extender por varios de los perfiles expuestos. Dos dataciones ^{14}C (AMS) sobre carbones extraídos de la facies carbonosa que aparece inmediatamente por encima de las cenizas de CE6 (CERC1; Fig. 4.27b) y de la facies carbonosa de CE11 (CERC3; Fig. 4.27b) ubican los episodios de combustión estudiados entre 4840 ± 30 BP [3696 - 3628 cal BC al 65.1% de probabilidad o 3583 - 3532 cal BC al 30.3% de probabilidad según el método de rango de densidad de alta probabilidad o HPD y utilizando INTCAL13 (Reimer et al., 2013) para la calibración; Beta - 552756] y 5700 ± 30 BP [4616 - 4457 cal BC al 94.9% de probabilidad o 4649 - 4644 cal BC al 0.5% de probabilidad según el método HPD y usando INTCAL13 (Reimer et al., 2013) para calibrar; Beta - 552757].

Para extraer las muestras se accedió a los episodios de combustión a través de un pequeño sondeo de unos 3 metros cuadrados que se dividía en dos partes, cada una de ellas excavada hasta una profundidad diferente (aproximadamente una mitad del sondeo se excavó hasta una profundidad de 0.5 m y la otra hasta 1 m; Fig. 4.27a-b). El muestreo se realizó en los cuatro perfiles expuestos en el sondeo (Fig. 4.27, Fig. 4.28, Fig. 4.29 y Fig. 4.30). Éstos fueron denominados perfil derecho, perfil fondo, perfil izquierdo y perfil boca según su orientación. Los perfiles fondo y boca se corresponden a la zona más interna y a la más exterior de la cueva respectivamente. A su vez, los perfiles derecho e izquierdo fueron denominados dando al fondo de la cueva y mirando hacia el exterior. Con ayuda del dispositivo para muestrear materiales expuestos en perfiles estratigráficos se tomaron 123 especímenes orientados (Tabla 4.7 y Anexo 4), de unos 3.6 cm³ cada uno. Excepto tres especímenes encapsulados en cajas de cuarzo y desmagnetizados térmicamente (19 pasos hasta 585 °C), los demás fueron introducidos en cajas de plástico y desmagnetizados por campos alternos (20-22 pasos hasta 90-105 mT).

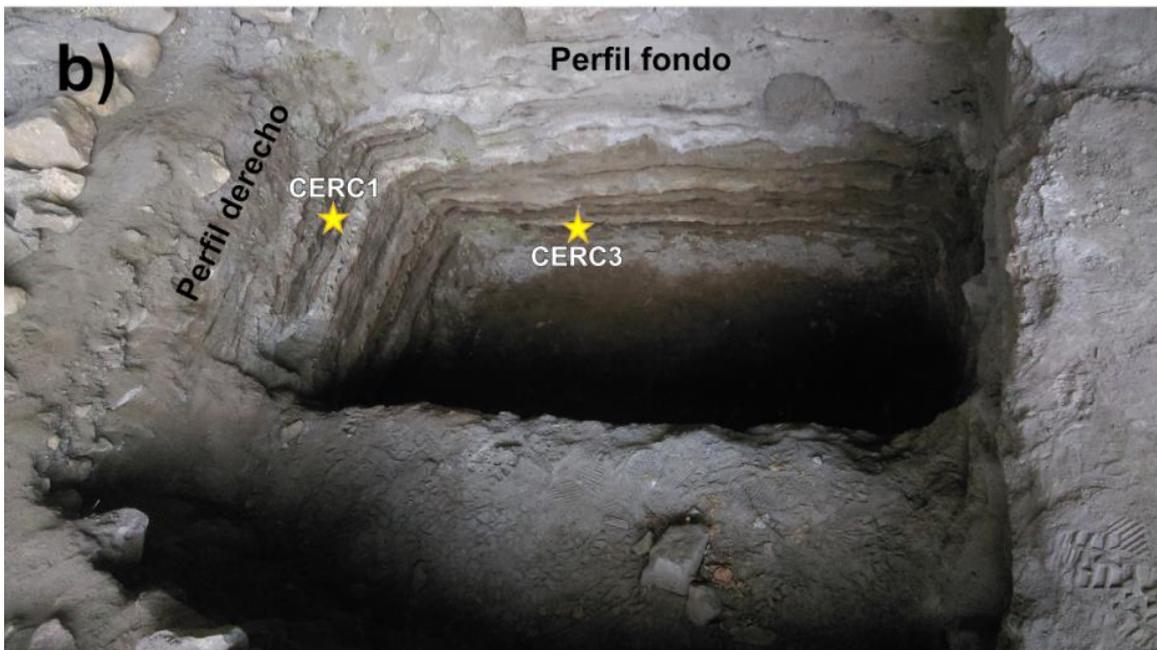
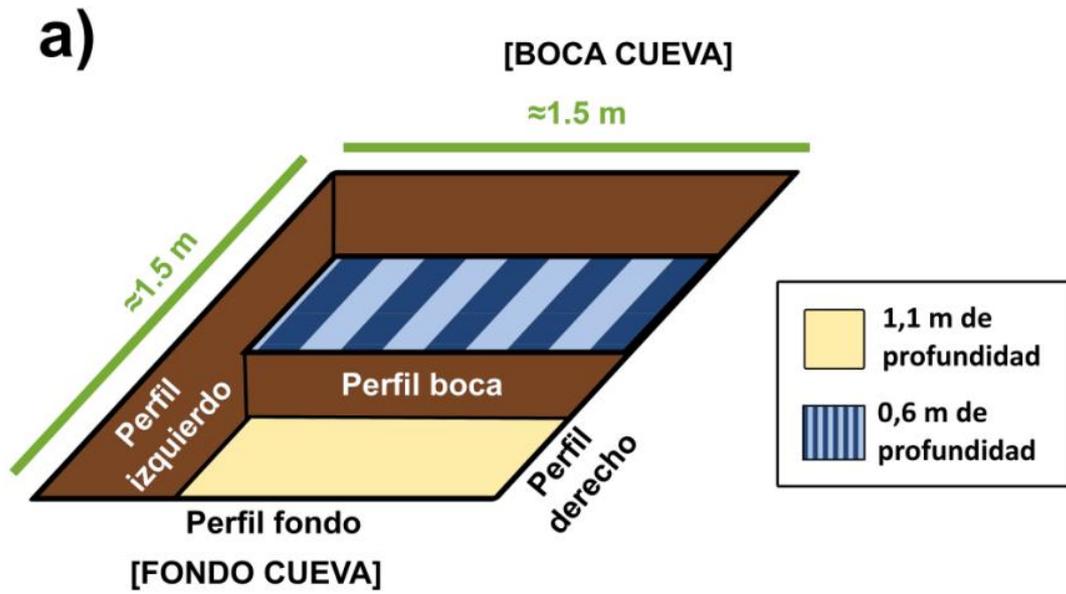


Fig. 4.27. (a) Plano esquemático del sondeo de la Cueva de El Estillín (Burgos), indicando los perfiles estudiados); (b) vista general del sondeo del sondeo. Las estrellas amarillas marcan las zonas aproximadas donde se tomaron los carbones para datar mediante radiocarbono.

4. Materiales e hipótesis de trabajo

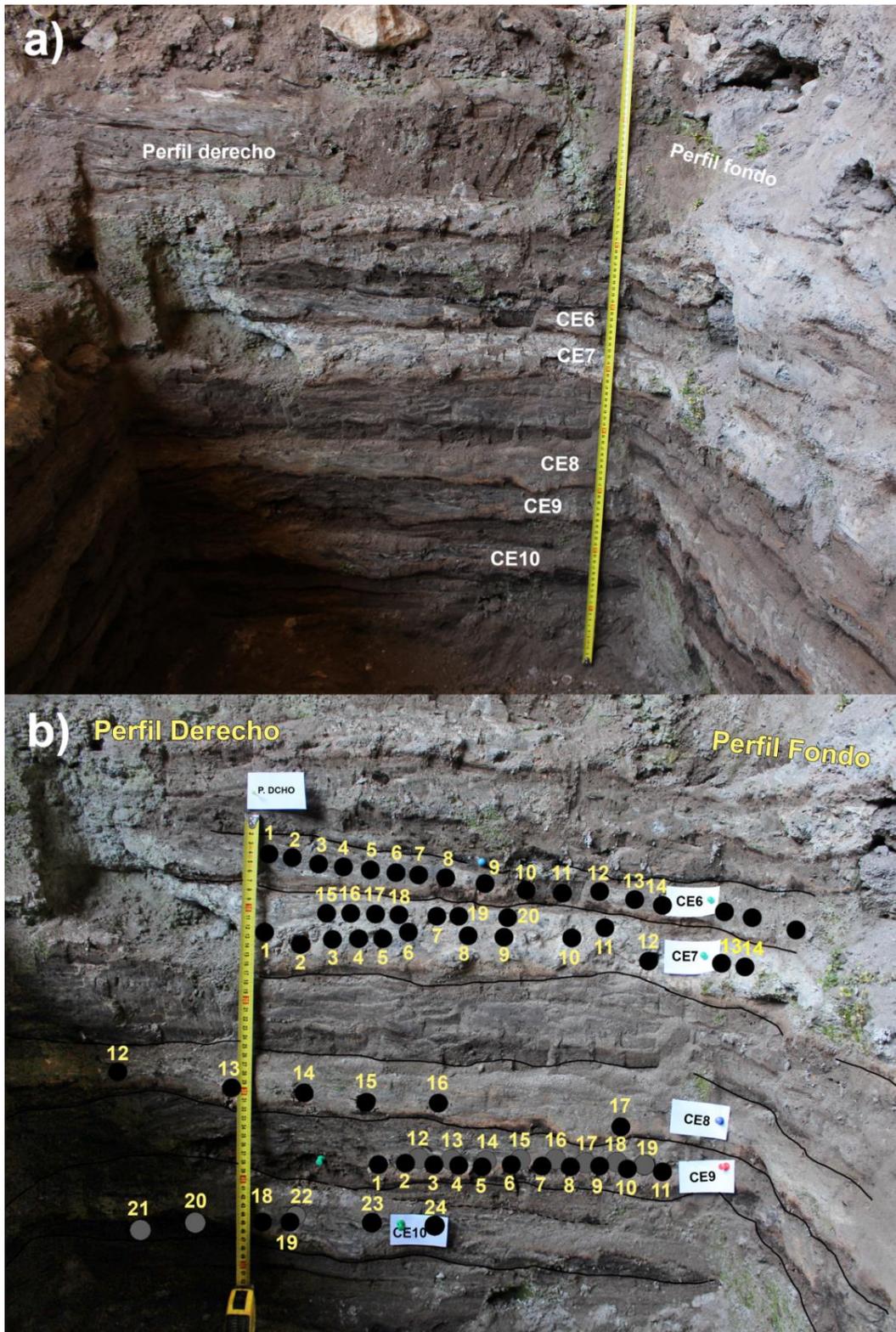


Fig. 4.28. Imágenes del perfil derecho del sondeo de El Estillín (Burgos) (a) antes y (b) después del muestreo arqueomagnético. En la imagen (b) se muestra la procedencia de los especímenes orientados extraídos en ese perfil. Las etiquetas indican los episodios muestreados (ver Tabla 4.7)

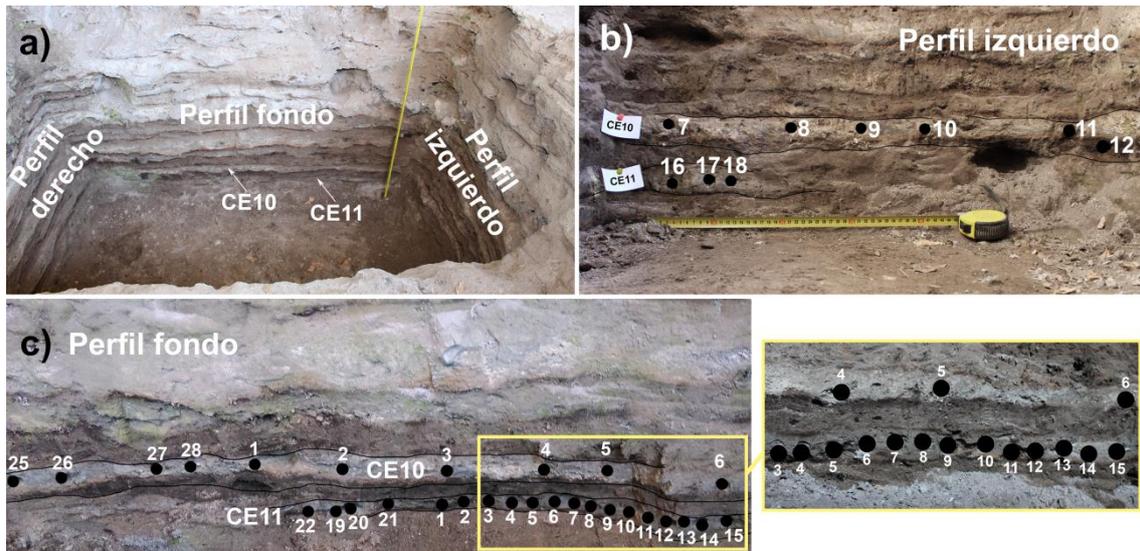


Fig. 4.29. Imágenes del muestreo en los perfiles fondo e izquierdo de la Cueva de El Estillín. (a) Vista completa del perfil fondo y vista parcial de los perfiles izquierdo y derecho. Se indica la ubicación de los episodios CE10 y CE11. (b) Detalle del perfil izquierdo mostrando los límites de los episodios CE10 (arriba) y CE11 (debajo) y la procedencia de algunos especímenes orientados. (c) Detalle del muestreo de los episodios CE10 y CE11 en el perfil fondo. A la izquierda se indica la localización de los especímenes orientados de manera aproximada. A la derecha se incluye una ampliación del área marcada por el cuadro amarillo en la imagen (c), mostrando las facies que separan los episodios CE10 y CE11.

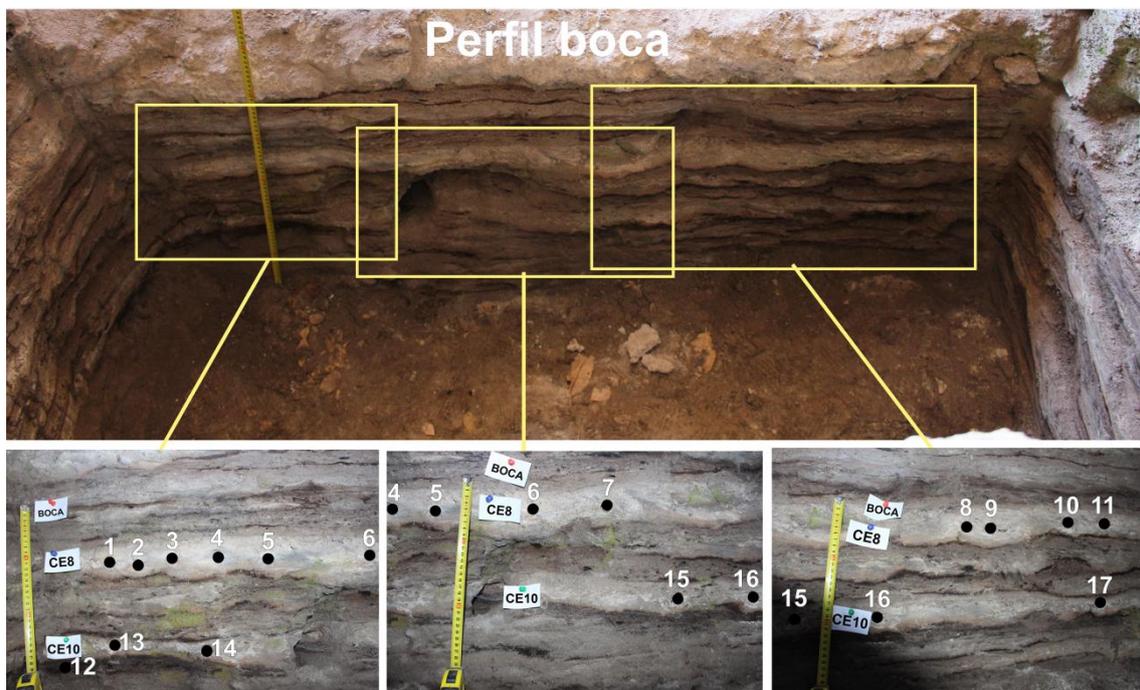


Fig. 4.30. Imagen general y aumentos de varias zonas del perfil de la boca de la Cueva del Estillín, donde se marcan los episodios muestreados en dicho perfil, así como la procedencia aproximada de los especímenes orientados. Las etiquetas indican los episodios muestreados (ver Tabla 4.7).

4. Materiales e hipótesis de trabajo

Episodio de combustión	N° de especímenes	Perfil en que se muestreó	Edad sin calibrar (BP)	Intervalo de datación en años de calendario calibrados (cal BC) al 95% de probabilidad (entre paréntesis el % de probabilidad correspondiente a cada intervalo)
CE6	17	Derecho	Entre 4840 ± 30 y 5700 ± 30	Entre: 4616–4457 (94.9%) 4649 - 4644 (0.5%) y: 3696-3628 (65.1%) 3583-3532 (30.3%)
CE7	20	Derecho-Fondo	Entre 4840 ± 30 y 5700 ± 30	Entre: 4616–4457 (94.9%) 4649 - 4644 (0.5%) y: 3696-3628 (65.1%) 3583-3532 (30.3%)
CE8	17	Boca-Derecho	Entre 4840 ± 30 y 5700 ± 30	Entre: 4616–4457 (94.9%) 4649 - 4644 (0.5%) y: 3696-3628 (65.1%) 3583-3532 (30.3%)
CE9	19	Derecho-Fondo	Entre 4840 ± 30 y 5700 ± 30	Entre: 4616–4457 (94.9%) 4649 - 4644 (0.5%) y: 3696-3628 (65.1%) 3583-3532 (30.3%)
CE10	28	Derecho-Fondo-Izquierdo-Boca	Entre 4840 ± 30 y 5700 ± 30	Entre: 4616–4457 (94.9%) 4649 - 4644 (0.5%) y: 3696-3628 (65.1%) 3583-3532 (30.3%)
CE11	22	Fondo-Izquierdo	5700 ± 30 BP	4616–4457 (94.9%) 4649 - 4644 (0.5%)

Tabla 4.7. Información sobre el muestreo arqueomagnético de la cueva de El Estillín. Se indica el episodio de combustión, número de especímenes muestreados por cada uno y el perfil del que procede.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales con 2 y 5 años de antigüedad

5.1. Resultados de propiedades magnéticas

5.1.1. Materiales no quemados

5.1.2. Materiales quemados

5.2. Análisis paleomagnéticos

5.2.1. Materiales no quemados

5.2.2. Materiales quemados

5.3. Discusión

5.3.1. La influencia del sustrato en el registro arqueomagnético

5.3.2. Variación del registro magnético debido al impacto térmico

5.3.3. Los efectos de los procesos tafonómicos en la señal magnética



Las estructuras de combustión arqueológicas son potenciales registros de la dirección del campo magnético terrestre (CMT) mediante el mecanismo de la termorremanencia (TRM) o termorremanencia parcial (pTRM). Ahora bien, para poder obtener direcciones arqueomagnéticas fiables es necesario que los materiales se encuentren estrictamente *in situ*. Desde el punto de vista arqueomagnético, consideramos *in situ* todo aquello que conserva exactamente la misma posición que tenía cuando se registró la magnetización; es decir, en la misma posición en la que se enfrió. En el caso de las estructuras de combustión arqueológicas como los hogares paleolíticos, son muchos los procesos que pueden afectar a su preservación desde que son apagadas hasta que son excavadas y muestreadas: desde la exposición a diversos elementos meteorológicos, hasta la bioturbación generada por animales y/o plantas, pasando por las propias acciones antrópicas. Todas pueden afectar a la integridad de la estructura. Puesto que las facies que conforman las estructuras de combustión prehistóricas (cenizas y sustrato termoalterado) no suelen estar litificadas, es esperable que los efectos de estos procesos puedan llegar a ser importantes.

Existen trabajos en los que precisamente se ha utilizado este condicionamiento del registro arqueomagnético para detectar áreas afectadas por procesos post-deposicionales mecánicos en estructuras de combustión (Carrancho et al., 2012a; Carrancho et al., 2016a), para determinar si cantos quemados se habían preservado inmóviles tras su calentamiento (Gose, 2000) o para evaluar si el colapso de muros de construcciones de ladrillo quemadas tuvo lugar antes o después del fuego (Shahack-Gross et al., 2018). Sin embargo, no existen trabajos que evalúen experimentalmente los efectos de procesos tafonómicos controlados sobre el registro direccional de estructuras de combustión (hogares) a lo largo del tiempo. En este capítulo presentamos los resultados de propiedades magnéticas y de los análisis paleomagnéticos realizados sobre una serie de hogares experimentales con una antigüedad de entre 2 y 5 años realizados bajo condiciones controladas y para las que se han documentado los procesos tafonómicos que han sufrido a lo largo de los años. Cabe destacar que se han estudiado fuegos realizados al aire libre y también estructuras realizadas dentro de una pequeña cueva, lo cual permite evaluar la preservación en contextos bien diferenciados.

Consideramos que hay tres factores principales que pueden condicionar que el registro magnético tenga unas determinadas características u otras: (a) las condiciones de los materiales originales antes de la quema, (b) la quema en sí misma y (c) los procesos tafonómicos que tienen lugar tras la quema. Con el fin de intentar separar los efectos de cada uno de estos factores y poder evaluar cuáles corresponden realmente a los procesos tafonómicos, se han estudiado tanto materiales quemados procedentes de las recreaciones experimentales como materiales sin quemar (es decir, sustrato no afectado por el calor). Es por esto que cada apartado de resultados se presenta dividido en dos bloques: materiales no quemados *versus* materiales quemados. Posteriormente, todo el conjunto de resultados se discute en relación a los tres factores mencionados previamente. Los

principales resultados descritos están recogidos en una reciente publicación que forma parte del trabajo desarrollado en el marco de esta tesis (Herrejón Lagunilla et al., 2019; Anexo 5).

5.1. Resultados de propiedades magnéticas

Para estudiar las propiedades magnéticas se han tomado muestras de todas las facies representativas, tanto quemadas (cenizas, capa negra de los fuegos al aire libre y costra carbonatada de los fuegos en cueva) como no quemadas (costra carbonatada, lámina detrítica y materiales carbonatados bajo la lámina detrítica en la cueva, así como sedimento no quemado de la zona circundante a los fuegos realizados al aire libre).

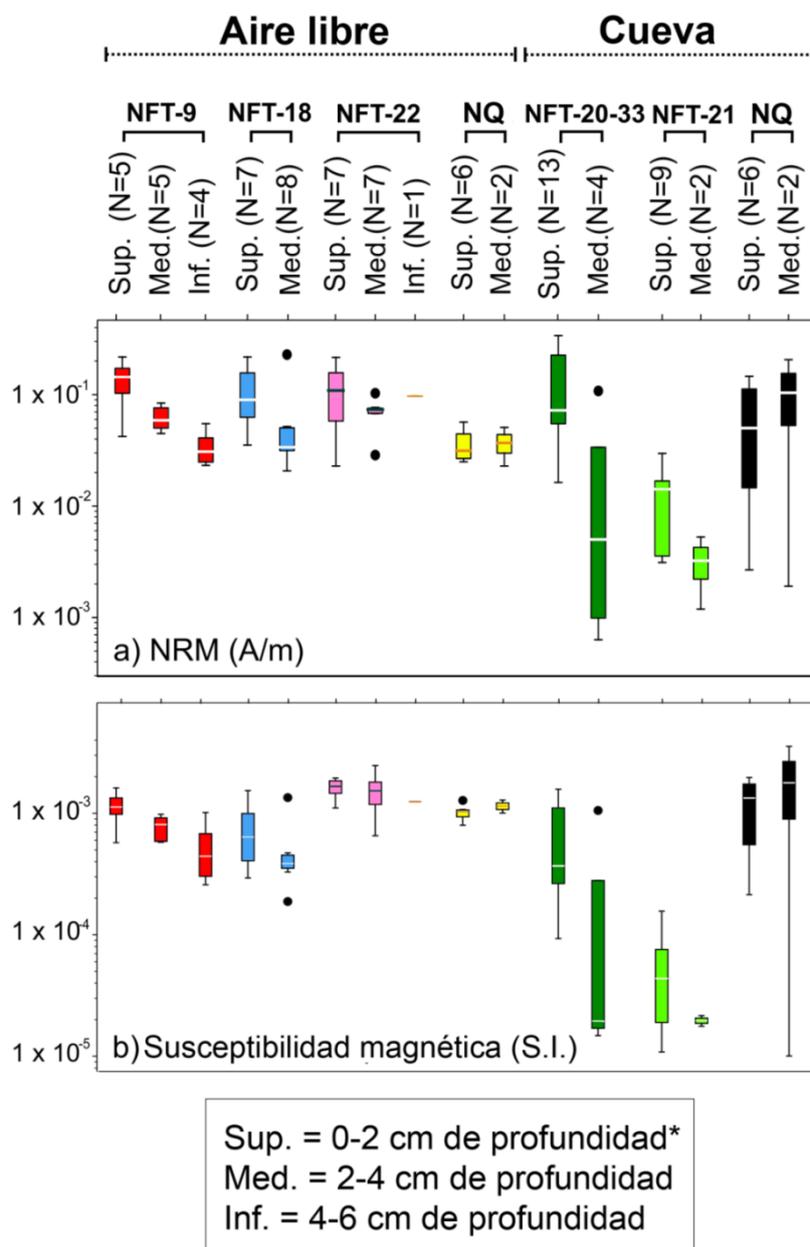
5.1.1. Materiales no quemados

Aquí se incluyen los sustratos originales (sin quemar) sobre los que se realizaron los fuegos. Como se detalló en el capítulo 4, al aire libre encontramos un sustrato rico en materia orgánica, mientras que en la cueva encontramos fundamentalmente materiales carbonatados y, en ocasiones, una lámina detrítica subyacente, bajo la cual vuelven a aparecer más materiales carbonatados (para más detalles véase el apartado 4.2.1. del capítulo 4).

Los valores de la NRM para los materiales no quemados al aire libre oscilan entre 2×10^{-2} y 6×10^{-2} A/m y entre 2×10^{-3} y 2×10^{-1} A/m en el caso de los de la cueva (Fig. 5.1a). En el caso de la susceptibilidad magnética inicial (a temperatura ambiente), van desde 8×10^{-4} hasta 1×10^{-3} (S.I.) en la zona al aire libre y desde 1×10^{-5} hasta 1×10^{-4} (S.I.) en la cueva (Fig. 5.1b). Los valores del ratio de Köenigsberger (Stacey, 1967) suelen presentar valores mayores que 1 en cerca de la mitad de los especímenes no quemados (tanto en la cueva como al aire libre), si bien los valores para los materiales no quemados al aire libre tienden a tener valores algo menores (Fig. 5.2).

El mineral ferromagnético dominante es la magnetita en el sedimento no quemado al aire libre (Fig. 5.3a). En la costra carbonatada de la cueva parece que también podría ser la magnetita el principal portador de la magnetización inducida, pero las curvas termomagnéticas son muy ruidosas y no se puede determinar con precisión (Fig. 5.3b). Por su parte, la magnetita vuelve a estar presente en la lámina detrítica bajo la costra carbonatada de la cueva. Se observa una caída hacia 300 °C tanto en el calentamiento como en el enfriamiento que puede deberse a la presencia de magnetita con una importante cantidad de cationes substituyentes (p. ej. Ti, Al, Mg). Otra opción es que se trate de pirrotina que no se destruye con el calentamiento a alta temperatura (Torres-López et al., 2014). Una tercera opción es la

transformación de magnetita en hematites. La reducción de la magnetización esperable en el enfriamiento podría estar enmascarada por formación de magnetita secundaria. También se detecta la presencia de hierro, que se transforma a hematites y/o magnetita tras el calentamiento (Fig. 5.3c). La procedencia del hierro en esta facies es desconocida. La principal hipótesis es la contaminación durante el muestreo o el submuestreo. Sea como sea, su presencia es ocasional y además no compromete el registro direccional en los materiales quemados.



*La referencia (0 cm) es la parte superior de cada bloque de mano

Fig. 5.1. Diagrama de caja y bigotes con los valores de NRM (a) y de susceptibilidad magnética inicial a temperatura ambiente (b) de la colección completa de muestras orientadas. Se incluyen tanto materiales quemados como no quemados (NQ en el gráfico). Ambos diagramas se presentan en escala logarítmica.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

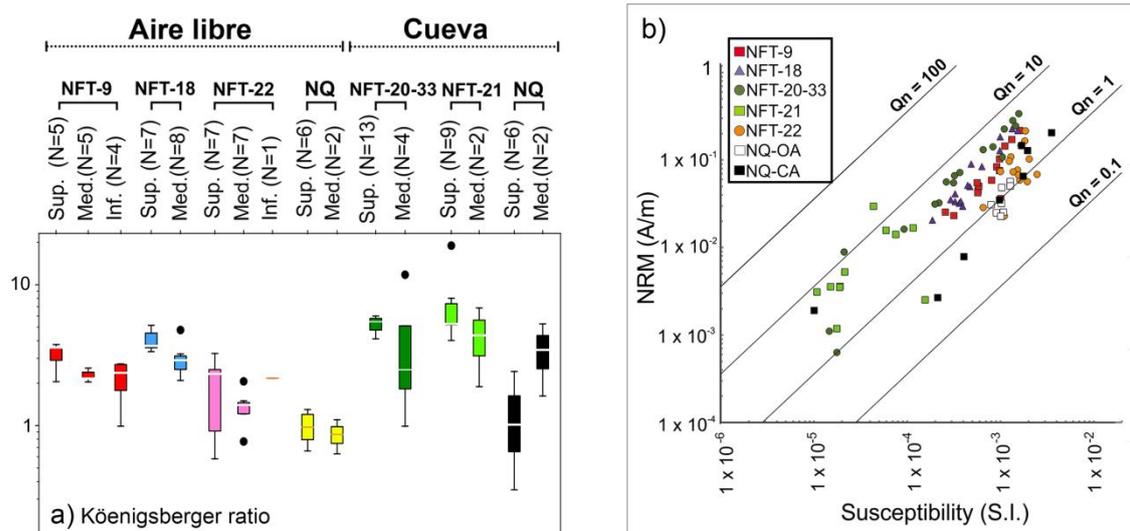


Fig. 5.2. (a) Diagrama de caja y bigotes con los valores del ratio de Königsberger de toda la colección de muestras orientadas y (b) diagrama de dispersión enfrentando los valores de NRM (eje de ordenadas) frente a susceptibilidad inicial (eje de abscisas) en el que las isolíneas marcan los valores del ratio de Königsberger. Ambos diagramas se presentan en escala logarítmica. En el panel (b), "NQ-OA" = No quemado al aire libre; "NQ-CA" = No quemado en cueva.

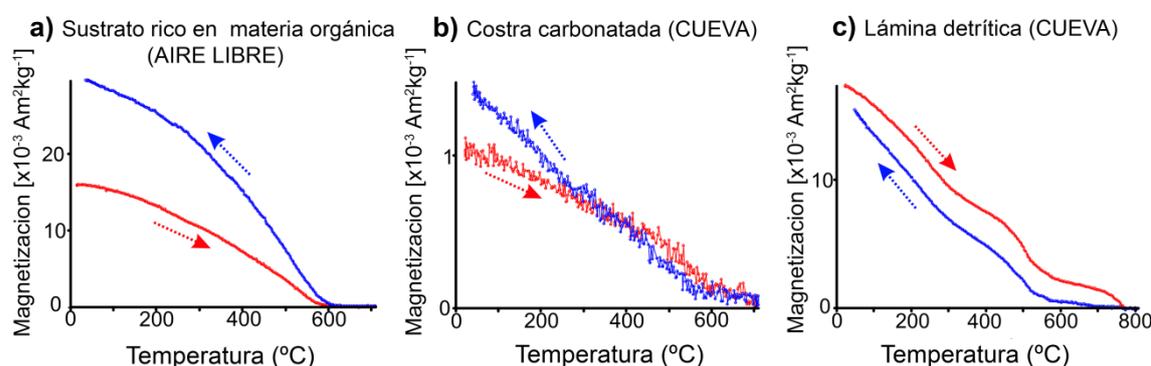


Fig. 5.3. Curvas termomagnéticas (magnetización vs. temperatura) de materiales no quemados: (a) sustrato del área al aire libre; (b) costra carbonatada y (c) lámina detrítica de la cueva.

Los ciclos de histéresis muestran diferencias significativas entre los distintos materiales no quemados. Tanto los valores del sustrato al aire libre (Fig. 5.4a) como los de la lámina detrítica de la cueva (Fig. 5.4b), son claramente mayores que los de la costra carbonatada (Fig. 5.4c), que muestra a su vez una mayor contribución de la fracción diamagnética (Fig. 5.4d). Estas diferencias en la intensidad de la magnetización también se detectan en las curvas termomagnéticas (Fig. 5.3a-c).

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

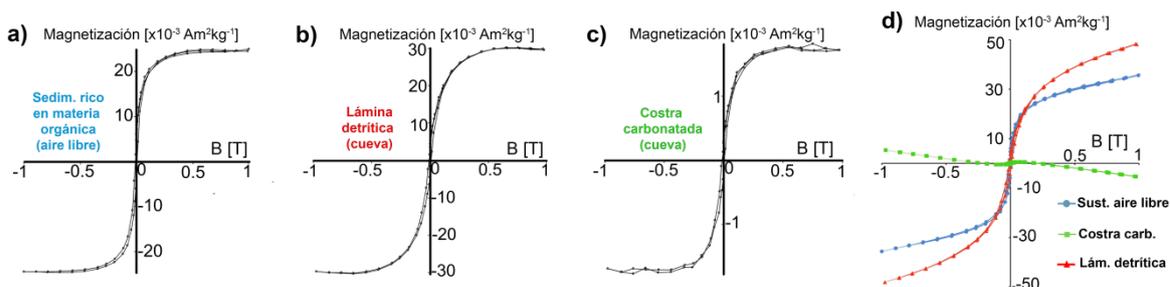


Fig. 5.4. Ciclos de histéresis de materiales no quemados: ciclos con corrección de la fracción dia-/paramagnética de (a) sustrato del área al aire libre; (b) costra carbonatada; (c) lámina detrítica de la cueva y (d) ciclos de histéresis de las tres facies sin corrección (círculo azul = sustrato al aire libre, cuadrado verde = costra carbonatada, triángulo rojo = lámina detrítica).

Cuando se representan los ratios de la histéresis (M_{RS}/M_S : 0.11-0.18, B_{CR}/B_C : 1.9-4.1) en el diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002), prácticamente todas las muestras caen en el área de pseudo-monodominio (PSD) o de mezcla de monodominio (SD) y multidominio (MD) (Fig. 5.5).

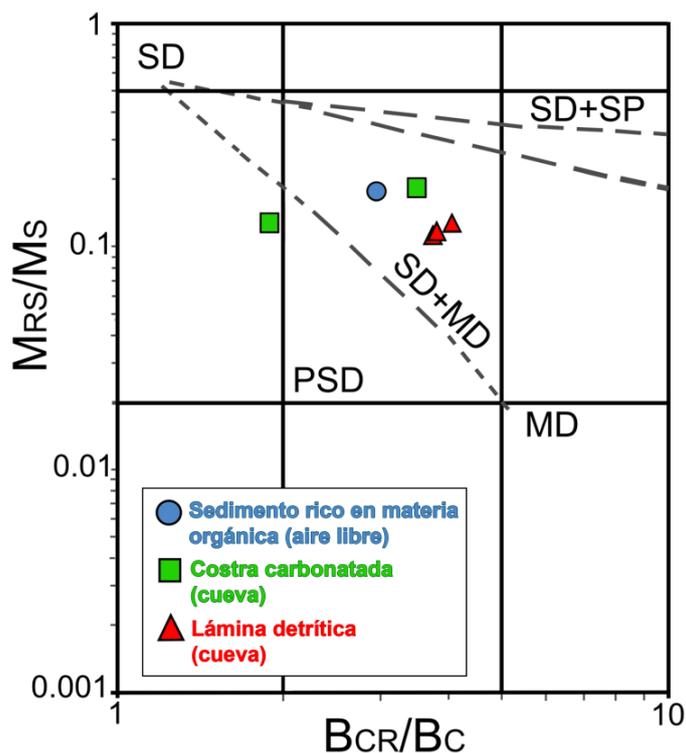


Fig. 5.5. Diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) con los ratios de histéresis de los materiales no quemados. En el eje de ordenadas se muestra el ratio entre la magnetización remanente de saturación y la magnetización de saturación (M_{RS}/M_S) y en el de abscisas el ratio entre el campo coercitivo remanente y el campo coercitivo (B_{CR}/B_C). [SD = monodominio; PSD = pseudomonodominio; MD = multidominio; SP = superparamagnético]. Las líneas discontinuas representan curvas tomadas de Dunlop (2002) para mezclas de granos SD + MD o SD + SP de magnetita.

5.1.2. Materiales quemados

Los valores de la NRM en los materiales quemados oscilan entre 6×10^{-4} y 3×10^{-1} A/m. La susceptibilidad magnética inicial oscila entre 1×10^{-5} y 2.5×10^{-3} (S.I.). Ambos parámetros tienden a mostrar un patrón decreciente en profundidad: los valores más altos corresponden a los especímenes más superficiales (Fig. 5.1). La mayoría de los valores del ratio de Königsberger están por encima de 1 (llegando a alcanzar incluso un valor de 19, Fig. 5.2), lo cual es compatible con un mecanismo de magnetización de origen térmico.

La fase magnética dominante es la magnetita para todos los materiales quemados (Fig. 5.6). En general las temperaturas de Curie están en torno a 550 y 580 °C (Fig. 5.6a-d) pero hay algunos casos en los que son algo más altas (600-620 °C, Fig. 5.6e-f). Para esas muestras se sugiere la presencia de magnetita ligeramente oxidada.

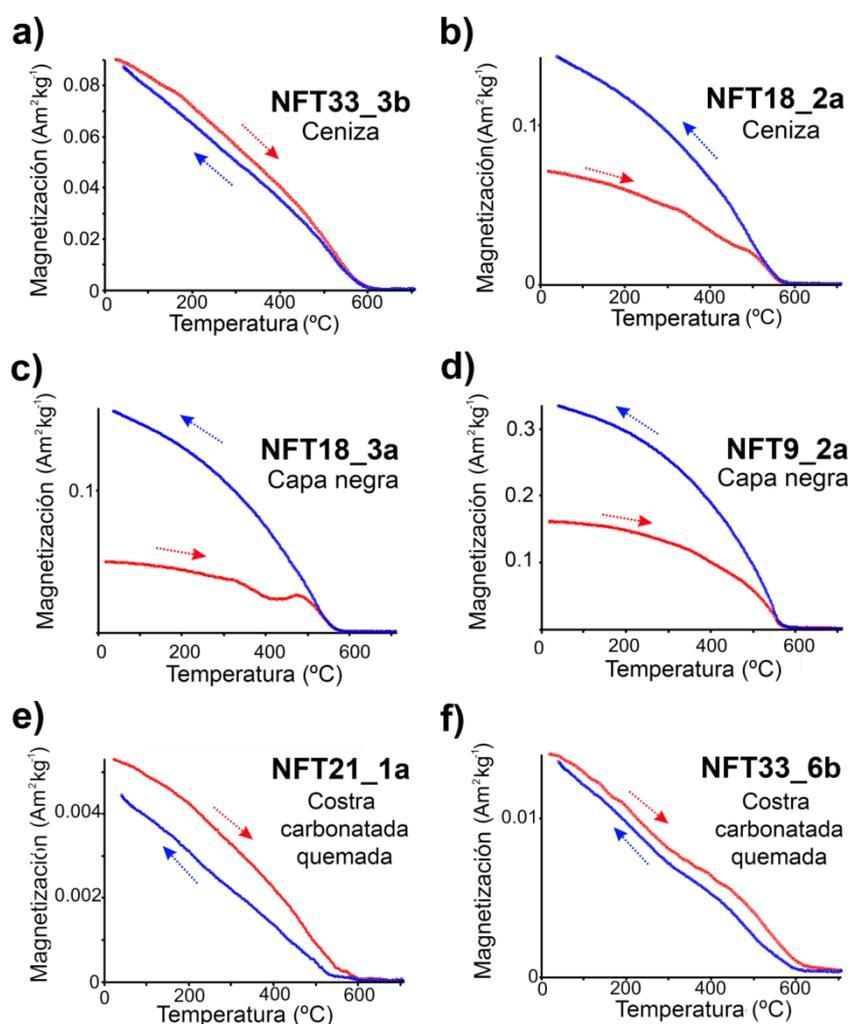


Fig. 5.6. Ejemplos representativos de curvas termomagnéticas hasta 700 °C de cenizas (a-b), capas negras (c-d) y costra carbonatada quemada (e-f). Estos gráficos presentan corrección de la fracción paramagnética.

A pesar de la similitud de la mineralogía ferromagnética, hay algunas diferencias destacables en el comportamiento observado en las curvas termomagnéticas. Mientras que las muestras de la capa negra (Fig. 5.6c-d) muestran irreversibilidad sistemáticamente (hay un aumento de la magnetización después del calentamiento experimental, que se interpreta como neoformación de magnetita), en las cenizas aparece variabilidad de comportamientos (Fig. 5.6a-b). A pesar de la sistemática irreversibilidad en las capas negras, existía una pequeña diferencia entre muestras: algunas de ellas presentan un pico de aumento de la magnetización claramente visible durante el calentamiento a temperaturas en torno a 400-450 °C interpretado como señal de la neoformación de magnetita (Fig. 5.6c).

La irreversibilidad en las curvas termomagnéticas de las capas negras se interpreta en relación al calentamiento experimentado por las muestras. La hipótesis es que, durante la quema, esta facies no se calentó a temperaturas tan altas como las aplicadas en el laboratorio (700 °C). Si hubiesen alcanzado temperaturas mayores de 700 °C, se esperaría que fueran térmicamente estables. Es decir, que la neoformación de magnetita observada durante el experimento ya se debiera de haber producido durante el calentamiento original. Para probar esta hipótesis, se realizaron curvas termomagnéticas parciales sobre muestras de capas negras. Los resultados realizados sobre una muestra gemela de otra en la que se detectó el pico mencionado más arriba (Fig. 5.7a) muestran reversibilidad en todas las curvas parciales hasta los 300 °C (Fig. 5.7b). En la curva hasta 400 °C se empieza a ver un ligero cambio en el comportamiento (Fig. 5.7c) y ya en la curva hasta 500 °C la irreversibilidad es clara (Fig. 5.7d). Estos datos apoyan un calentamiento inferior a 500 °C para esa muestra. Este comportamiento se repite en las curvas adicionales sobre muestra gemela de varias que muestran ese pico en torno a 400 – 450 °C. Sin embargo, en las muestras gemelas de las que no tienen el pico, las curvas parciales son siempre reversibles en todos los pasos (Fig. 5.7e-k). Para evaluar si este comportamiento se debía a la heterogeneidad de la muestra (es decir, que pudiera haber una alta variabilidad en sus propiedades), se tomó una pequeña cantidad (uno o unos pocos gramos) de una de las muestras en las que se observaba este comportamiento y se mezcló bien para intentar paliar ese posible sesgo. Sin embargo, tanto la curva hasta 700 °C (Fig. 5.7e) como las curvas parciales reproducían nuevamente el comportamiento (Fig. 5.7f-k).

Existen diferencias por facies también en los valores de magnetización durante la adquisición progresiva de la IRM. Puesto que el mineral predominante en todos los casos es la magnetita, estos valores se pueden interpretar en términos de concentración mineralógica. Las cenizas presentan la mayor concentración, seguidas por la capa negra y la costra carbonatada quemada respectivamente (Fig. 5.8). La única excepción es la capa negra de NFT-9, que presenta unos valores tan altos (e incluso mayores) como los de las cenizas.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

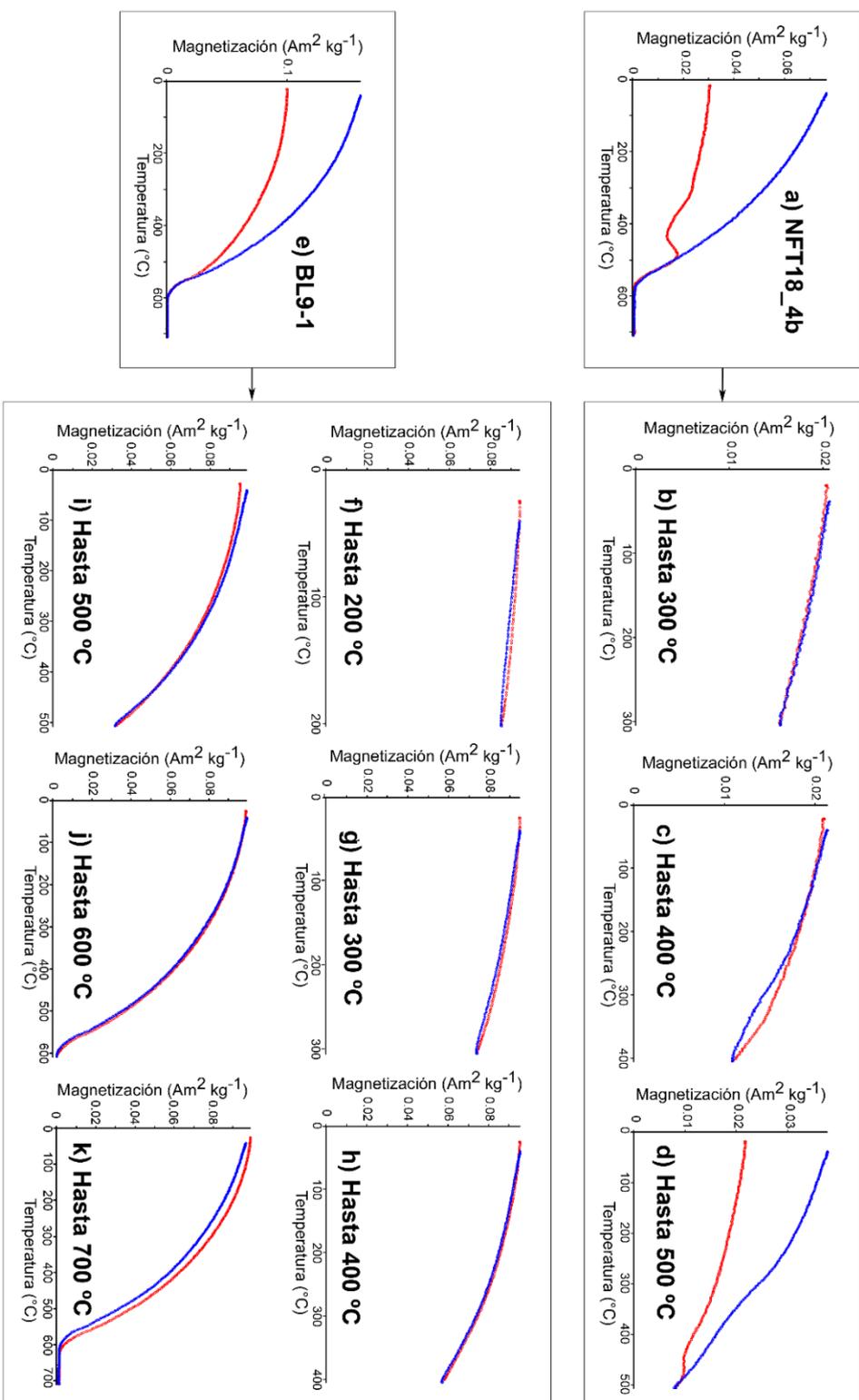


Fig. 5.7. Ejemplos representativos de curvas termomagnéticas sobre capas negras: (a) curva hasta 700°C sobre una muestra de capa negra de la estructura NFT18 y curvas parciales sobre muestra gemela hasta (b) 300 °C, (c) 400 °C y (d) 500 °C; (e) curva hasta 700°C sobre otra muestra distinta de capa negra, esta vez precedente de la estructura NFT-9, y curvas parciales sobre muestra gemela hasta (f) 200 °C, (g) 300 °C, (h) 400 °C, (i) 500 °C, (j) 600 °C y (k) 700 °C.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

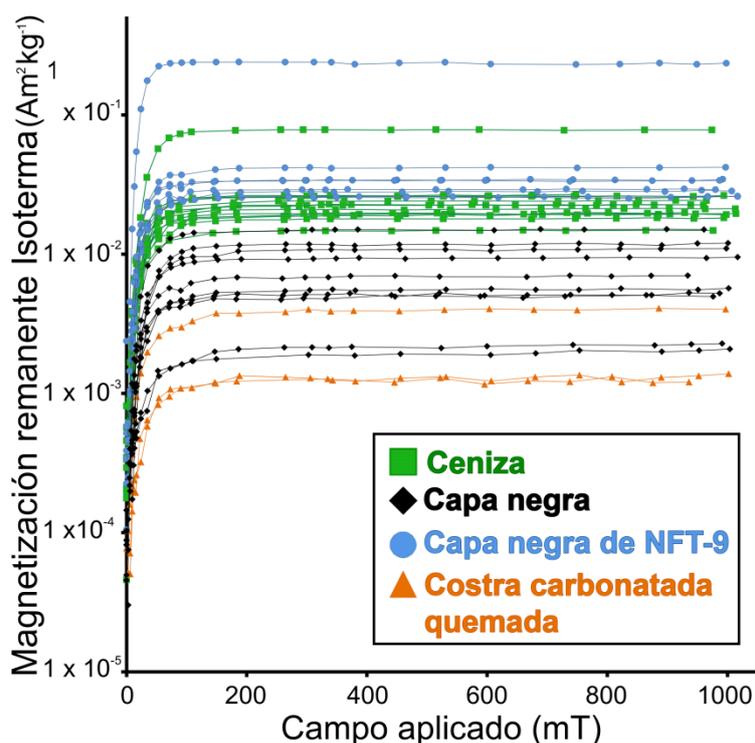


Fig. 5.8. Adquisición de la IRM [en escala logarítmica] de muestras quemadas. (Cuadrados verdes = cenizas, rombos negros = capas negras, círculos azules = capa negra de NFT-9, triángulos naranjas = costra carbonatada quemada).

Los valores para los ratios de histéresis (M_{RS}/M_S : 0.11-0.25, B_{CR}/B_C : 2.1-4.1) han sido representados en el diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002). Aunque la interpretación del estado de dominios en el diagrama de Day puede ser ambigua ya que los parámetros de histéresis están influenciados por diversos factores (Roberts et al., 2018), la composición mineralógica aparentemente simple de esta colección permite hacer una interpretación cualitativa del mismo. Todas las muestras analizadas caen en el área pseudo-monodominio (PSD) o de mezcla de monodominio (SD) y multidominio (MD) (Fig. 5.9).

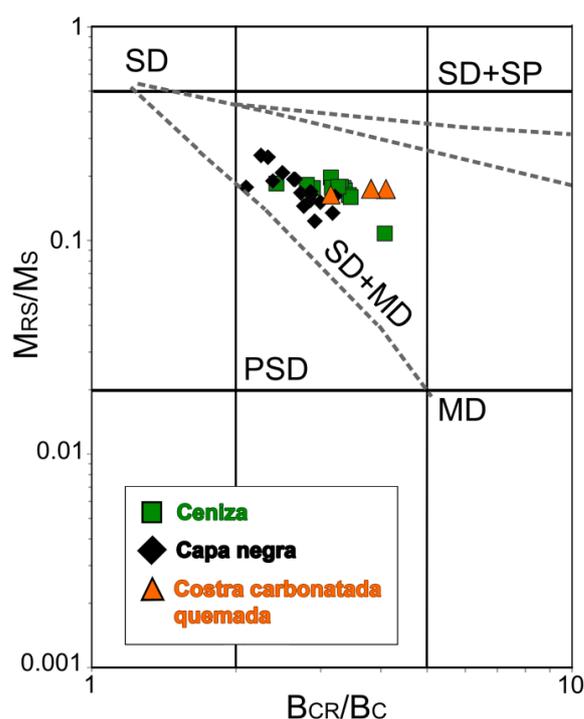


Fig. 5.9. Diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) con los datos de los materiales quemados (cuadrados verdes = ceniza, rombos negros = capa negra, triángulo rojo = costra carbonatada quemada).

5.2. Análisis paleomagnéticos

Los análisis paleomagnéticos han sido realizados sobre muestras de sustrato tanto quemado como no quemado. No se recogieron muestras orientadas de cenizas debido fundamentalmente al grado de alteración mecánica que presentaban y a su facilidad para removerse (para más detalles véase el capítulo 4, apartado 4.2.3).

5.2.1. Materiales no quemados

Los materiales no quemados presentan comportamientos heterogéneos (Fig. 5.10a-d). En ocasiones los diagramas muestran dos o tres componentes, que aparecen solapadas en los diagramas de las muestras desmagnetizadas por campos alternos (ej.: Fig. 5.10b) y sus direcciones son bastante dispersas. En el caso de las muestras del aire libre, esto se interpreta como un efecto del uso de la zona como jardín hasta tiempos no muy lejanos. Sin embargo, a baja temperatura/coercitividad en algunos casos se suele observar una componente con dirección norte que se interpreta como la magnetización viscosa adquirida después de los procesos experimentados por el sustrato hasta que quedó en la posición actual (Fig. 5.10a-b). En la cueva los comportamientos son muy variables y aparecen diagramas con direcciones muy diferentes, apareciendo incluso algunas que no son coherentes con un campo magnético de polaridad normal (Fig. 5.10c-d).

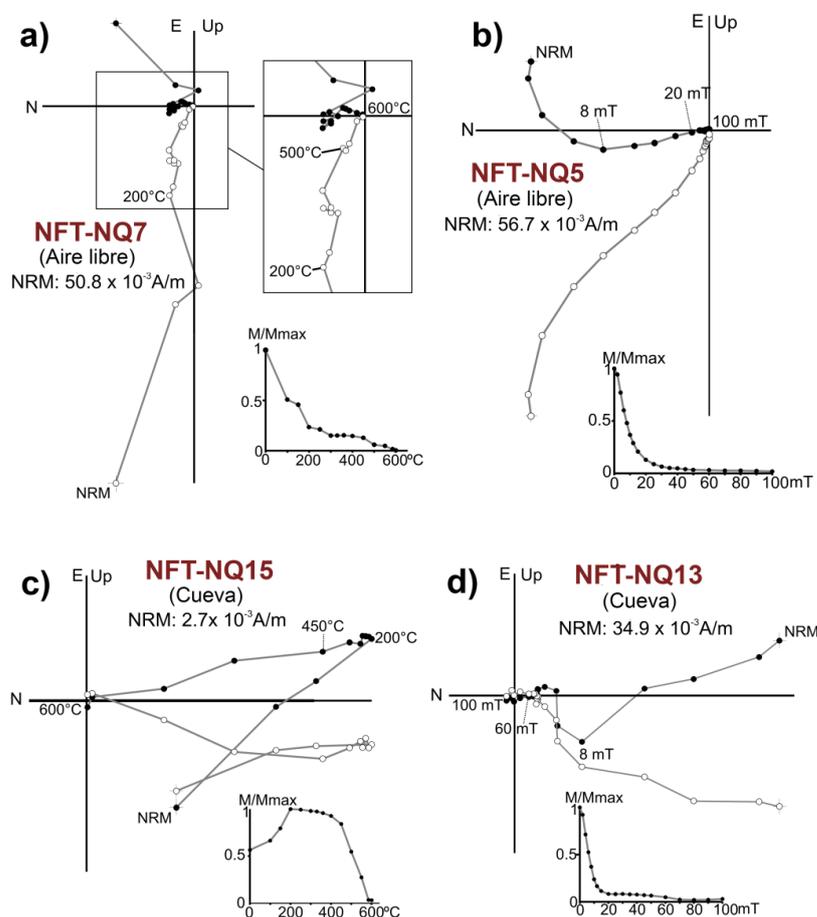


Fig. 5.10. Ejemplos representativos de diagramas ortogonales de desmagnetización de muestras no quemadas de la zona de experimentación al aire libre (a-b) y de la cueva (c-d). Los símbolos negros representan el plano horizontal y los blancos el vertical. Se muestran también las caídas de intensidad normalizadas.

5.2.2. Materiales quemados

Para el análisis direccional de la NRM no se han considerado los pasos de coercitividad menores de 6-8 mT o de temperaturas por debajo de 100-150 °C ya que ese rango se corresponde con una magnetización viscosa debida a la exposición al campo magnético terrestre (CMT) de varios años desde que los fuegos se apagaron, hasta que se recogieron las muestras y se analizaron (Middleton y Schmidt, 1982; Pullaiah et al., 1975).

Se han detectado principalmente tres tipos de comportamiento entre los materiales quemados:

◆ Muestras con una única componente paleomagnética (A) cuya dirección es compatible con la dirección esperada del CMT (Fig. 5.11). Se interpreta como una termorremanencia (TRM) adquirida durante la realización de los fuegos. No obstante, teniendo en cuenta las caídas de intensidad en los diagramas de los especímenes desmagnetizados térmicamente, en ocasiones se sugiere la posibilidad de que el mecanismo de magnetización sea realmente termoquímico (TCRM). Siguiendo la propuesta de Carrancho y Villalaín (2011), interpretamos que las muestras con caídas de intensidad más progresivas (Fig. 5.11a) corresponden a termorremanencias, y aquellas con caídas más bruscas hacia temperaturas medias (en torno a 300 °C) corresponden a una magnetización termoquímica (Fig. 5.11c). Independientemente del mecanismo de magnetización, se trata de la magnetización remanente característica (ChRM) adquirida durante la quema. Los especímenes desmagnetizados por campos alternos están dominados por minerales de baja coercitividad. El 90% de la NRM había sido desmagnetizada ya a 30 mT y el campo destructivo medio (CDM) está en torno a 15-20 mT.

◆ Muestras con varias componentes, en las que la de baja temperatura/coercitividad (A_1) tiene una dirección compatible con la dirección actual del CMT (Fig. 5.12). Las temperaturas máximas de desbloqueo de A_1 oscilan entre 150 y 500 °C. Esta componente de polaridad normal es interpretada como una termorremanencia parcial (pTRM) que se corresponde con la dirección primaria (ChRM) adquirida durante la última quema. Habitualmente se ve una caída más o menos drástica en los diagramas de caída de intensidad coincidiendo con dicha temperatura. Por encima, generalmente aparece otra componente (comp. B en Fig. 5.12), aunque puntualmente puede aparecer una tercera (comp. I en Fig. 5.12b). La dirección de la componente B presenta mayor dispersión que la de baja temperatura y/o coercitividad (Fig. 5.13) y se interpreta como un registro previo a la quema. En el caso de los especímenes desmagnetizados por campos alternos, éstos están dominados por minerales de baja coercitividad. El 90% de la NRM había sido desmagnetizada ya a 30 mT y el campo destructivo medio (CDM) está en torno a 15-20 mT.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

◊ *Muestras con diagramas erráticos, direcciones anómalas y/o valores de la NRM muy bajos (Fig. 5.14).* Se interpreta que estas muestras experimentaron poco o ningún impacto térmico, aunque tampoco se puede excluir que hayan experimentado algún tipo de proceso mecánico que haya alterado el registro direccional. No fue posible aislar en estos casos la componente primaria (ChRM) y fueron excluidas del cálculo de las direcciones medias.

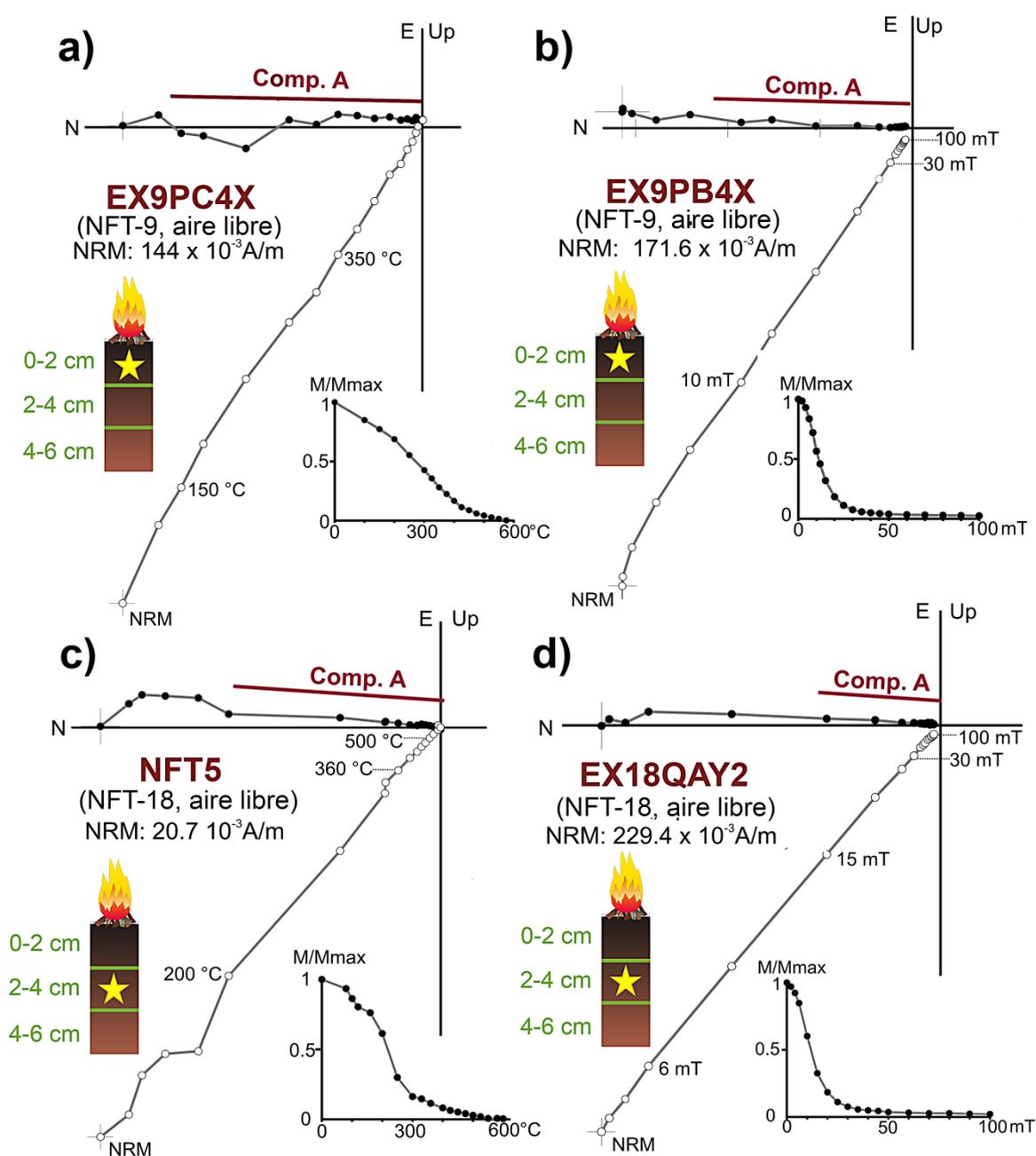


Fig. 5.11. Ejemplos de diagramas ortogonales de desmagnetización de la NRM con una única componente (comp. A). [Símbolos como en Fig. 5.10]. Se indica también el código del espécimen, hogar y correspondiente profundidad.

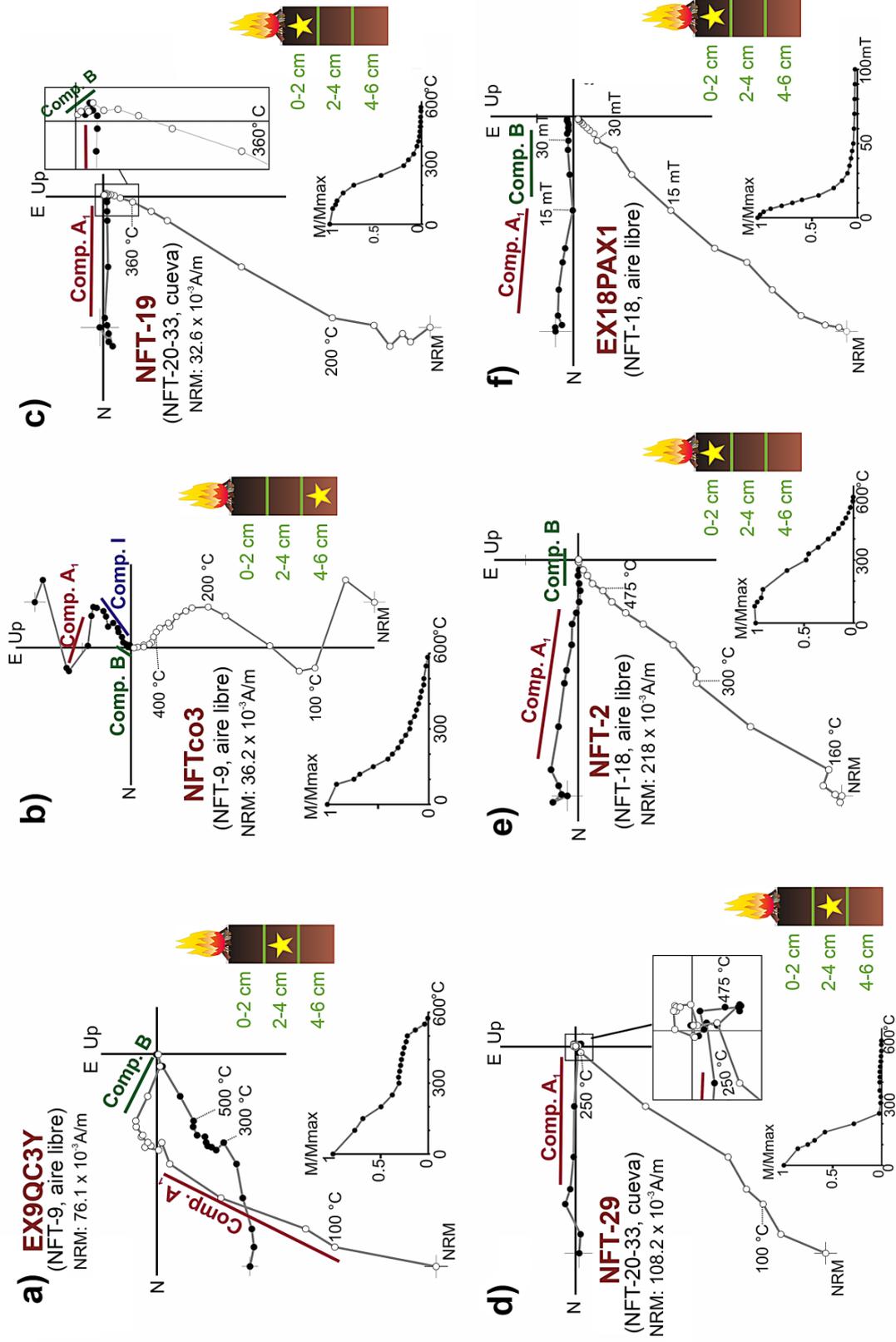


Fig. 5.12. Ejemplos de diagramas ortogonales de desmagnetización de la NRM exhibiendo la componente A₁. [Símbolos como en la Fig. 5.10]

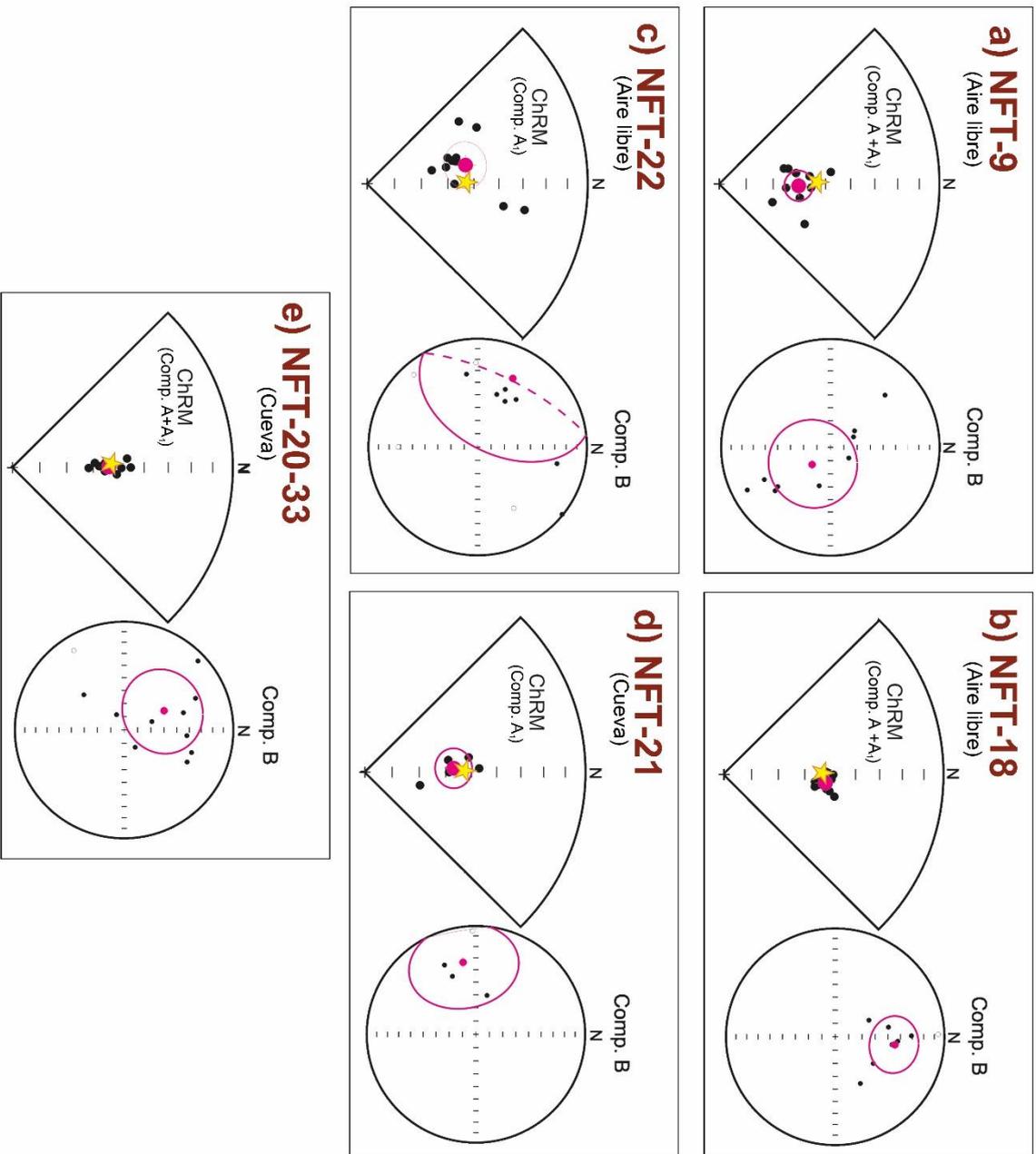


Fig. 5.13. Proyecciones de igual área con las direcciones medias obtenidas para (a) NFT-9, (b) NFT-18, (c) NFT-22, (d) NFT-21 y (e) NFT-20-33. Dentro de cada panel se presentan las direcciones de la CHRM (izquierda) y de la componente B (derecha). En color rosa aparecen la dirección media y el cono de error al 95% de probabilidad correspondiente. Los puntos negros representan las direcciones de cada uno de los especímenes tenidos en cuenta para calcular la media. La estrella amarilla representa la dirección esperada del CMT para el sitio de estudio en el momento de la quema.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

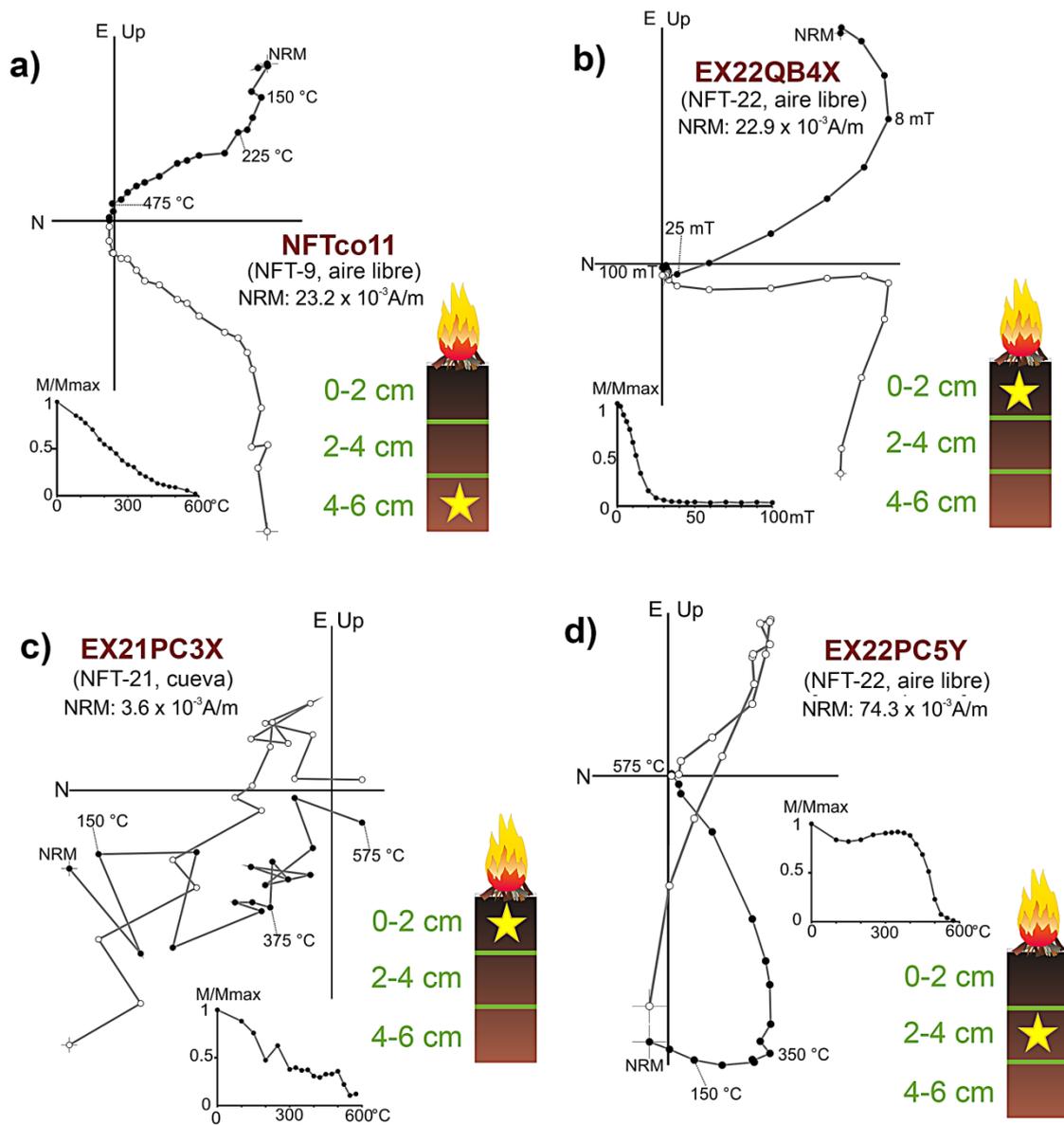


Fig. 5.14. Ejemplos de diagramas ortogonales de desmagnetización de la NRM mostrando comportamientos erráticos, con direcciones anómalas y/o valores de NRM bajos. [Símbolos como en Fig. 5.10]

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

Se ha calculado la dirección de la ChRM para cada una de las estructuras de combustión estudiadas (Fig. 5.13, Tabla 5.1). El parámetro de precisión (k) oscila entre 31.8 y 565.3. Con ayuda del modelo IGRF v.12 (Thébault et al., 2015) se calculó la dirección del CMT esperada para El Salt entre el 6 y el 20 de agosto de 2010 (Dec. = 359.3°, Inc. = 53.2°) y para el 27 de marzo de 2013 (Dec.= 359.6°, Inc.= 53.3°), momentos en los que se realizaron las estructuras de combustión. El ángulo entre la dirección media calculada y la esperada (β) se indica en la Tabla 5.1. Como se muestra en la Tabla 5.1, la diferencia entre β y el α_{95} , nunca supera los 2°.

Estructura de combustión	N/N'	Dec. (°)	Inc. (°)	k	α_{95} (°)	β (°)
NFT-9	10/14	1.4	60.4	79.5	5.5	7.3
NFT-18	14/15	4.8	51.9	565.3	1.7	3.6
NFT-20-33	14/17	359.7	53.9	288.1	2.3	0.6
NFT-21	6/11	357.5	56.9	89.4	7.1	3.8
NFT-22	11/15	349.2	52.6	31.8	8.2	6.1

Tabla 5.1. Resumen de los parámetros estadísticos asociados a la dirección media de la ChRM de cada una de las estructuras de combustión estudiadas. De izquierda a derecha: nombre de la estructura, número de especímenes utilizados para el cálculo de la dirección media frente al número de especímenes desmagnetizados (N/N'), declinación, inclinación, parámetro de precisión (k), semiángulo del cono de error al 95% de confianza (α_{95}) y ángulo entre la dirección media de la ChRM y la dirección esperada (β).

5.3. Discusión

5.3.1. La influencia del sustrato original en el registro arqueomagnético

Las propiedades magnéticas del sustrato original sobre el que se realiza el fuego condicionan la señal resultante de manera directa. En el caso de los fuegos al aire libre, se puede ver cómo el sustrato original, que es rico en material orgánica, tiene un importante contenido de minerales ferromagnéticos tal y como muestran los parámetros dependientes de la concentración como la susceptibilidad magnética (Fig. 5.1b). Tras el calentamiento, los parámetros dependientes de la concentración no experimentan grandes cambios debido a una neoformación de minerales ferrimagnéticos limitada.

En el caso de los fuegos en cueva, las diferencias entre facies son claras. Los mayores valores de magnetización en los ciclos de histéresis (Fig. 5.4) y las curvas termomagnéticas (Fig. 5.3) de la lámina detrítica no quemada frente a los materiales carbonatados no quemados son claros. Los materiales carbonatados son originalmente más pobres en minerales ferromagnéticos, pero además, tras el calentamiento experimental hasta 700 °C llevado a cabo en el laboratorio, la formación de nuevos minerales ferrimagnéticos por efecto del calor parece limitada (Fig. 5.3b). Por tanto, una mayor o menor proporción de lámina detrítica dentro de una muestra va a condicionar de manera crítica sus propiedades magnéticas. Esto es importante porque, mientras que para los experimentos con la balanza de traslación [IRM, ciclos de histéresis, curvas de backfield y curvas termomagnéticas] podemos individualizar las facies con detalle (se usan unos 300 mg de muestra suelta), para los análisis paleomagnéticos no tenemos tanta resolución. En este caso, la masa de cada espécimen es de unos 10-20 g y separar las facies no era viable, pues habría conllevado incluso a la pérdida del espécimen.

Cabe también destacar cómo la influencia de la fracción diamagnética en algunos materiales de la cueva, que se refleja en valores bajos de susceptibilidad magnética inicial (p. ej.: NFT-21, Fig. 5.1b), hace que presenten valores altos del ratio de Königsberger (Fig. 5.2) a pesar de que los de NRM no lo eran especialmente (Fig. 5.1a) y sin que esto tenga implicaciones en el tipo de registro magnético.

5.3.2. Variación del registro magnético debido al impacto térmico

En lo relativo a la composición magnética, todas las muestras (al aire libre, en cueva y sedimento no quemado) están dominadas por minerales de baja coercitividad, principalmente magnetita. Si comparamos los diagramas de Day de los materiales no quemados con los de los quemados (Fig. 5.5 vs. Fig. 5.9), parece que estos segundos presentan valores más agrupados en la región PSD (pseudomonodominio), lo que sugiere una cierta acción homogeneizadora del calentamiento en la granulometría ferromagnética. Sin embargo, también existen algunas diferencias debidas fundamentalmente al calentamiento y visibles en otros parámetros. Tal es el caso del patrón decreciente en profundidad observado tanto en la NRM como en la susceptibilidad magnética inicial de los especímenes orientados (**Fig. 5.1**). Este patrón se interpreta en términos del diferente impacto térmico recibido en las distintas áreas del sustrato (mayor en el centro de la estructura que en la periferia, y también mayor en la zona superficial que en las zonas más profundas).

La inestabilidad termomagnética de ciertas capas negras observada a través de la neoformación de magnetita a partir de 400-450 °C en las curvas termomagnéticas (Fig. 5.7a-d), puede ser interpretada en términos de las temperaturas alcanzadas. La hipótesis es que las temperaturas de calentamiento en el laboratorio son más altas que las sufridas durante la quema en el campo. El análisis de la reversibilidad (coincidencia entre los ciclos de calentamiento y enfriamiento) de curvas termomagnéticas parciales ha sido usado para testar esta hipótesis e intentar hacer una aproximación a las temperaturas que se alcanzaron (Hroudá et al., 2003). Realizando sucesivos ciclos de calentamiento/enfriamiento a temperaturas progresivamente incrementales, intentamos detectar a qué temperatura las muestras dejan de ser reversibles. La temperatura a la cual la curva de enfriamiento deja de ser reversible se interpreta como el límite máximo de la temperatura que la muestra pudo haber alcanzado en el campo. En las muestras analizadas sobre muestra gemela de aquellas en las que se detectó ese incremento de la magnetización hacia 400-500 °C durante el calentamiento en el laboratorio hasta 700 °C (ej.: Fig. 5.7a), se observa irreversibilidad clara a partir de 500 °C (Fig. 5.7d). Esto sugiere que esas muestras no superaron los 500 °C. Esta hipótesis es coherente con la existencia de termorremanencias parciales en la mayoría de especímenes de la capa negra cuya NRM fue desmagnetizada térmicamente, con temperaturas máximas de desbloqueo de 500 °C. Igualmente, esto es coherente con la interpretación que (Mallol et al., 2013b) proponen para las capas negras: se trata del sustrato termoalterado sobre el que se realizó el fuego, que adquiere un color negruzco debido a la combustión incompleta de la materia orgánica contenida en él. Sin embargo, las muestras en las que no se observa ese incremento en la magnetización a *ca.* 400-450 °C muestran alta reversibilidad en

todos los pasos de las curvas parciales (Fig. 5.7e-k). Una posible explicación a este comportamiento es que en los calentamientos parciales, la materia orgánica que hay presente en esa muestra se haya destruido antes de que se den las condiciones para que se produzca la neoformación de magnetita. Estos datos no hacen sino reforzar la idea de que la reversibilidad-irreversibilidad de las curvas termomagnéticas puede ser útil para evaluar las temperaturas alcanzadas por un determinado material, pero sus resultados han de ser tomados con cautela (véase Tema y Ferrara, 2019) y es preferible combinarlos con otros análisis como la desmagnetización térmica de la NRM.

Los distintos comportamientos observados durante la desmagnetización de la NRM también se relacionan con la temperatura alcanzada en los sustratos. Para la componente A se han propuesto dos posibles mecanismos de magnetización diferentes, atendiendo a las caídas de intensidad: TRM o TCRM (Carrancho y Villalain, 2011) (véase el apartado 5.2.2). El hecho de que sea uno u otro el mecanismo de magnetización no tiene implicaciones para el cálculo direccional pero sí para la interpretación del impacto térmico experimentado por cada una de las muestras. Las muestras que portan una TRM superaron la temperatura de Curie (en este caso, unos 585 °C, puesto que el principal portador de la remanencia es la magnetita). Sin embargo, en el caso de los especímenes que portan una TCRM, no excedieron esa temperatura. En estos casos, la primera parte de la componente (hasta unos 300 °C, coincidente con la caída de intensidad abrupta) es portada por granos con temperaturas de bloqueo por debajo de la temperatura máxima alcanzada (ya sean pre-existentes o generados durante la quema) y la magnetización que portan tiene un origen puramente térmico. Los demás pasos de desmagnetización térmica corresponden a granos neoformados con temperaturas de bloqueo mayores que la máxima alcanzada durante la quema y, por tanto, tienen un origen químico. Dado que ambas partes (térmica y química; TCRM) se adquieren durante el enfriamiento en presencia del mismo campo, no son distinguibles direccionalmente y su registro es fiable (Dunlop y Özdemir, 1997). Por su parte, la componente A_1 (Fig. 5.12) se interpreta como una termorremanencia parcial asociada al fuego y de ello se infiere que esas muestras no alcanzaron la temperatura de Curie de la magnetita (585 °C), principal portador de la remanencia. Los diferentes comportamientos observados son compatibles con la variabilidad de temperaturas alcanzadas tanto en profundidad como lateralmente en este tipo de estructuras, lo cual está determinado por múltiples factores entre los que se encuentran la conductividad del sustrato, la humedad e incluso el efecto aislante térmico de la ceniza, entre otros (Aldeias et al., 2016; Canti y Linford, 2000).

5.3.3. Los efectos de los procesos tafonómicos en la señal magnética

El heterogéneo comportamiento de las cenizas en las curvas termomagnéticas de las cenizas (Fig. 5.6a-b), unas reversibles y otras no, puede ser interpretado como una evidencia de alteración debido a procesos tafonómicos. Se espera que esta facies, que alcanzó muy altas temperaturas ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$, puesto que se trata de los residuos del combustible calcinados), tenga una alta estabilidad termomagnética que se traduce en curvas termomagnéticas altamente reversibles. Teniendo en cuenta las diversas alteraciones tafonómicas que se detectaron en las cenizas (agregados grumosos, crecimiento de vegetación, bioturbación; véase el capítulo 4, apartados 4.2.2. y 4.2.3), las curvas termomagnéticas irreversibles se interpretan como el efecto de la inclusión o mezcla de materiales no quemados entre las cenizas debido a acciones como el pisoteo o la bioturbación. Estos datos sugieren que la preservación física (*in situ*) de las cenizas en estos contextos puede estar seriamente comprometida, por lo que no son la facies más idónea para el arqueomagnetismo.

Las peculiares propiedades magnéticas de la capa negra del fuego NFT-9 también pueden ser interpretadas en relación a sus procesos tafonómicos. Los valores excepcionalmente altos de magnetización en sus curvas de adquisición progresiva de la IRM, mayores incluso que los de las cenizas de otras estructuras (Fig. 5.8), se interpretan como el efecto de la incorporación de cenizas en esta capa negra debido al pisoteo intensivo al que fue sometida esta estructura de combustión justo después de su apagado. Mallol et al. (2013b) detectaron, con ayuda de análisis de micromorfología de suelos, inclusiones de cenizas dentro de la capa negra de un fuego experimental que había sido pisoteado durante 21 días.

Ante las evidencias de bioturbación observadas en el campo y las alteraciones sugeridas a partir de los análisis de propiedades magnéticas, es de esperar que los datos direccionales se puedan haber visto seriamente afectados. Sin embargo, en términos generales no parece que sea así ya que la diferencia entre β y α_{95} es siempre menor de 2° (es decir, $\beta - \alpha_{95} < 2^{\circ}$) (Tabla 5.1). Esa diferencia puede ser considerada incluso parte del error asociado al cálculo de la dirección esperada obtenida a partir de un modelo global. Observando de manera general los datos, se puede considerar que el error es estocástico y no se han detectado errores sistemáticos significativos. Las desviaciones pueden explicarse como resultado de la dispersión estocástica de los errores de muestreo, submuestreo, medida, procesos asociados a alteraciones tafonómicas, etc.

La calidad de los resultados direccionales guarda relación en buena parte con el tipo de material parental sobre el que se realizaron los fuegos. Los sustratos termoalterados estaban compactados (incluso litificados en el caso de las estructuras realizadas en la cueva), por lo que eran menos susceptibles de ser

afectados por procesos mecánicos que las cenizas, que son muy volátiles. De aquí se deduce la importancia de tener en cuenta las facies estudiadas a la hora de realizar análisis arqueomagnéticos e incluso de realizar una selección de las facies más óptimas a muestrear.

A pesar de la buena calidad general de los resultados, conviene comentar algunas cuestiones estructura por estructura. Comenzando por las estructuras al aire libre, detectamos que la inclinación de NFT-9 es algo más alta de lo esperado (Fig. 5.13a y Tabla 5.1). Hay que recordar que este fuego fue pisoteado. Curiosamente el efecto esperado del pisoteo sería más bien una reducción de la inclinación y lo observado es todo lo contrario. Además, el parámetro de precisión es bastante aceptable ($k = 79.5$), por lo que la discrepancia entre la dirección obtenida y la esperada puede ser explicada por el error asociado al muestreo, submuestreo y/o a la medida. Aun con esa pequeña desviación, resulta sorprendente la calidad del registro a pesar de que la estructura fue pisoteada, lo cual se atribuye, como se mencionó previamente, a la naturaleza compacta del sustrato a partir del que se generó la capa negra.

En la estructura de combustión al aire libre NFT-18 se detecta una desviación muy pequeña respecto a la dirección esperada y el parámetro de precisión es excepcionalmente alto ($k = 565.3$) (Fig. 5.13b y Tabla 5.1). Atendiendo a este parámetro, parece que esa desviación tan pequeña está más relacionada con el error que se puede derivar del muestreo, submuestro y/o las medidas que al efecto de los procesos tafonómicos. En todo caso, la calidad estadística de este resultado arqueomagnético es muy alta.

La tercera estructura de combustión realizada al aire libre, NFT-22, presenta los peores resultados estadísticos de la colección (Fig. 5.13c y Tabla 5.1). Su k es muy baja (31.8) y presenta la mayor separación entre la dirección media obtenida y la esperada ($\beta = 6.1$). A pesar de todo, la dirección media esperada está dentro del $\alpha 95$. Puesto que el sistema de muestreo, submuestreo y medición es el mismo para todas las muestras, éstos no parecen ser la causa de esta mayor desviación. Otra posible explicación para este comportamiento es una mala preservación debido a los efectos de los procesos tafonómicos experimentados por NFT-22. Pero, con la excepción del pisoteo que adicionalmente se realizó sobre NFT-9, los procesos tafonómicos experimentados por todas las estructuras de combustión al aire libre fueron los mismos. Por esa razón, un mal estado de conservación no parece ser la principal causa de los resultados de NFT-22, si bien tampoco puede ser totalmente excluido. Los bajos niveles del ratio de Köenigsberger sugieren que el registro magnético aquí no es muy eficiente y las temperaturas máximas de desbloqueo para las muestras de este fuego son bajas (en torno a 150-300 °C). Todo esto, combinado con el hecho de que durante su excavación la identificación de las facies quemadas de esta estructura de combustión no fue para nada evidente, apunta a que el sustrato sobre el que se realizó NFT-22 sufrió un impacto térmico muy bajo.

5. El registro arqueomagnético en estructuras de combustión experimentales

En lo relativo a los hogares en cueva, los resultados de NFT-21 (Fig. 5.13d y Tabla 5.1) se vieron afectados por la pérdida de la zona más quemada de uno de los bloques durante el muestreo. El resultado de esto fue la obtención de valores de NRM bajos y diagramas de desmagnetización erráticos para ese bloque (Fig. 5.14c). Esto también hace que el número de especímenes procesados para el cálculo de la dirección sea menor, contribuyendo a su vez a que el α_{95} sea mayor. Aun así, la dirección esperada está contenida dentro del α_{95} (Fig. 5.13d).

Por último, el hogar en cueva NFT-20-33 presenta resultados estadísticos de alta calidad ($k = 288.1$ y $\beta < 1^\circ$) (Fig. 5.13e y Tabla 5.1). Este hogar corresponde a un fuego realizado directamente sobre otro previo que se quemó tres años antes. Es decir, se pretendía simular un reencendido arqueológico. La temperatura relativamente alta alcanzada en la quema de ambas estructuras de combustión y el sustrato litificado sobre el que se llevaron a cabo explican en buena medida la calidad de los resultados arqueomagnéticos obtenidos. Algunos autores han demostrado que estructuras que han experimentado varios calentamientos presentan mejores resultados paleomagnéticos que un único calentamiento a temperaturas muy altas (Kostadinova-Avramova y Kovacheva, 2013). Desafortunadamente, no se pudo identificar con los resultados arqueomagnéticos el reencendido principalmente por dos razones. En primer lugar, si el último calentamiento es lo suficientemente intenso (si alcanza una temperatura igual o mayor que la de la quema anterior), es capaz de resetear el registro magnético previo. En segundo lugar, la dirección del campo magnético terrestre en el sitio de estudio en 2010 y 2013 (años de ambas experimentaciones) es tan similar que no es posible distinguirla estadísticamente en los resultados obtenidos. La identificación exitosa de reencendidos en hogares prehistóricos es una cuestión que queda abierta a futuras experimentaciones donde el análisis de las propiedades magnéticas en profundidad también puede aportar información al respecto.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio mediante análisis arqueomagnéticos: el caso de la unidad X de El Salt

6.1. Resultados de propiedades magnéticas

6.2. Análisis paleomagnéticos

6.3. Detección de diacronías y temporalización de ocupaciones

6.4. Discusión

6.4.1. Las diferencias en el registro arqueomagnético en las distintas facies quemadas

6.4.2. El comportamiento de las curvas termomagnéticas de los materiales no quemados a baja temperatura

6.4.3. La estabilidad del registro direccional

6.4.4. Implicaciones arqueológicas de la temporalización de ocupaciones de la unidad X

6.4.5. Una nueva metodología para temporalizar ocupaciones en palimpsestos del Paleolítico medio



La disección de los palimpsestos arqueológicos es muy compleja. Bajo una aparente sincronía, los materiales incluidos en una misma unidad arqueológica (incluso a escala de “suelo de ocupación”; Bailey, 2007) pueden corresponder a distintos eventos de ocupación que tuvieron lugar durante un tiempo más o menos extenso (Mallol y Hernández, 2016). Son múltiples las contribuciones desde distintas perspectivas y disciplinas con el objetivo de detectar y temporalizar ocupaciones dentro de las unidades que conforman palimpsestos (véanse, p. ej: Cascalheira y Picin, 2020; Gabucio et al., 2016; Henry, 2012; Leierer et al., 2019; Machado y Pérez, 2016; Mallol et al., 2019; Mora Torcal et al., 2020; Vaquero et al., 2012). Y es que, parafraseando a Mallol y Hernández (2016), es muy importante conocer el rango de tiempo que puede estar abarcando un palimpsesto arqueológico, así como los procesos naturales o antropogénicos que se superponen, para comprender bien el comportamiento humano que dio lugar a estos depósitos. Sin embargo, aún son muchas las limitaciones para llegar a individualizar las ocupaciones y conocer la escala temporal en la que estamos trabajando cuando estudiamos un palimpsesto. Precisamente, el objetivo de este capítulo es contribuir a individualizar (aislar) y temporalizar ocupaciones en palimpsestos paleolíticos mediante análisis arqueomagnéticos realizados sobre estructuras de combustión.

La propuesta que aquí se plantea parte de varias premisas básicas. La primera es considerar al hogar (estructura de combustión) como unidad analítica básica (p. ej.: Machado et al., 2015 y referencias incluidas en dicho trabajo). Un hogar representa un evento aislado y concreto en el tiempo. Puesto que los minerales ferromagnéticos (*s.l.*) contenidos en los materiales quemados son capaces de registrar la dirección del campo magnético terrestre (CMT) en el momento en que se enfrían, se asume que cada hogar corresponde a un momento puntual en el tiempo (su enfriamiento). Por otro lado, partiendo de que la dirección del CMT cambia a lo largo del tiempo debido al fenómeno de la variación secular, se puede interpretar que la detección de direcciones estadísticamente distinguibles entre distintos hogares en una misma paleosuperficie es una evidencia de diacronía. Este planteamiento permite detectar actividades realizadas en momentos claramente separados en el tiempo pero que se presentan bajo la apariencia de sincronía. Este planteamiento ya ha sido aplicado previamente a materiales del Paleolítico Medio (Carrancho et al., 2016b). La posibilidad de aislar ocupaciones humanas en estos contextos es muy útil por sí misma, pero aparece un nuevo problema: ¿cuánto tiempo implica la diacronía: años, décadas, siglos...? (Sternberg y Lass, 2007) trabajaron sobre la temporalización de dos fuegos del Paleolítico medio de la cueva de Kebara (Israel) separados estratigráficamente unos 0.5 metros aproximadamente (es decir, sabiendo de antemano que correspondían a momentos claramente diferentes). Estos autores utilizaron la tasa media de variación secular en latitudes similares (en su caso el suroeste de EE.UU; 0.05 - 0.15°/año; Sternberg, 1989) para estimar el tiempo que podría haber

transcurrido entre la última quema de uno y otro hogar (100-310 años). Basándonos en estos planteamientos, a continuación se presenta una nueva metodología basada en el estudio arqueomagnético de hogares paleolíticos con el fin de individualizar y temporalizar eventos de ocupación, aplicada a algunas estructuras de combustión de la unidad X (52.3 ± 4.6 ka BP; (Galván et al., 2014b) del yacimiento de El Salt (Alcoy, Alicante). La principal novedad consiste en el uso de modelos geomagnéticos (en este caso, el SHA.DIF.14k; Pavón-Carrasco et al., 2014) y del método del *bootstrap* para generar modelos que proporcionen el tiempo mínimo que podría explicar las diferencias entre direcciones medias con un cierto grado de confianza estadística. Además, se han evaluado las propiedades magnéticas de las estructuras estudiadas.

6.1. Resultados de propiedades magnéticas

Los valores de NRM para los materiales quemados (cenizas y capas negras) oscilan entre 1×10^{-5} y 4×10^{-4} $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$. En los materiales de control no quemados, los valores de NRM están entre 1×10^{-5} y 6×10^{-5} $\text{Am}^2\text{kg}^{-1}$ (Fig. 6.1).

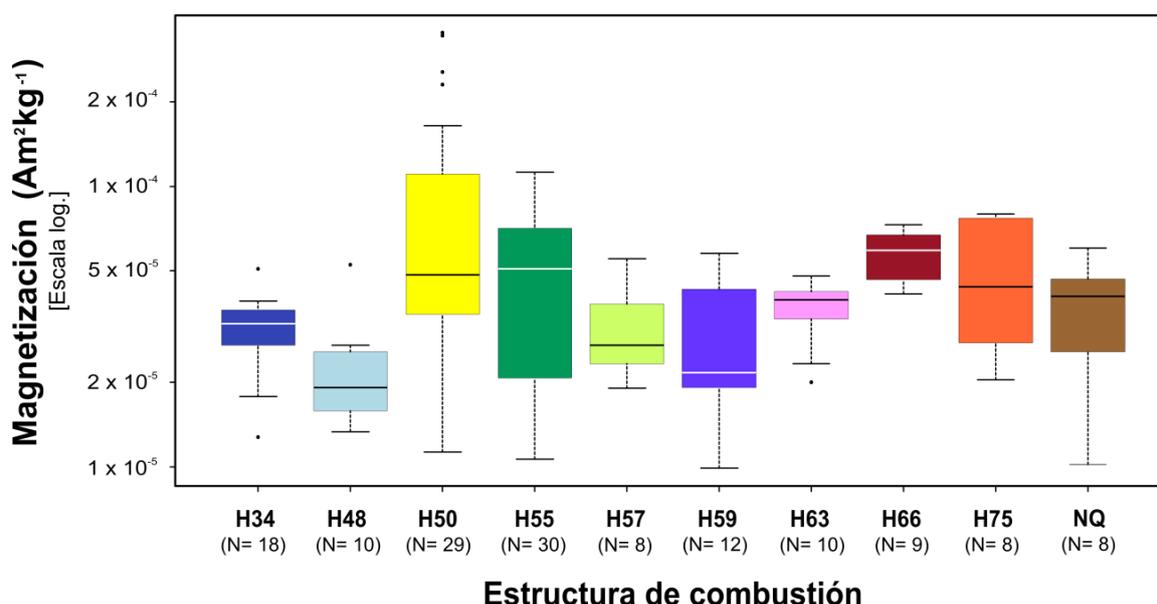


Fig. 6.1. Diagramas de cajas y bigotes para los valores de magnetización remanente natural (NRM) de la colección de muestras orientadas de las estructuras de combustión de la unidad X de El Salt. (NQ = no quemado)

Los valores de susceptibilidad magnética inicial oscilan entre 2×10^{-7} y 3×10^{-6} m^3kg^{-1} en los materiales quemados y entre 2×10^{-7} y 1×10^{-6} m^3kg^{-1} en los no quemados (Fig. 6.2).

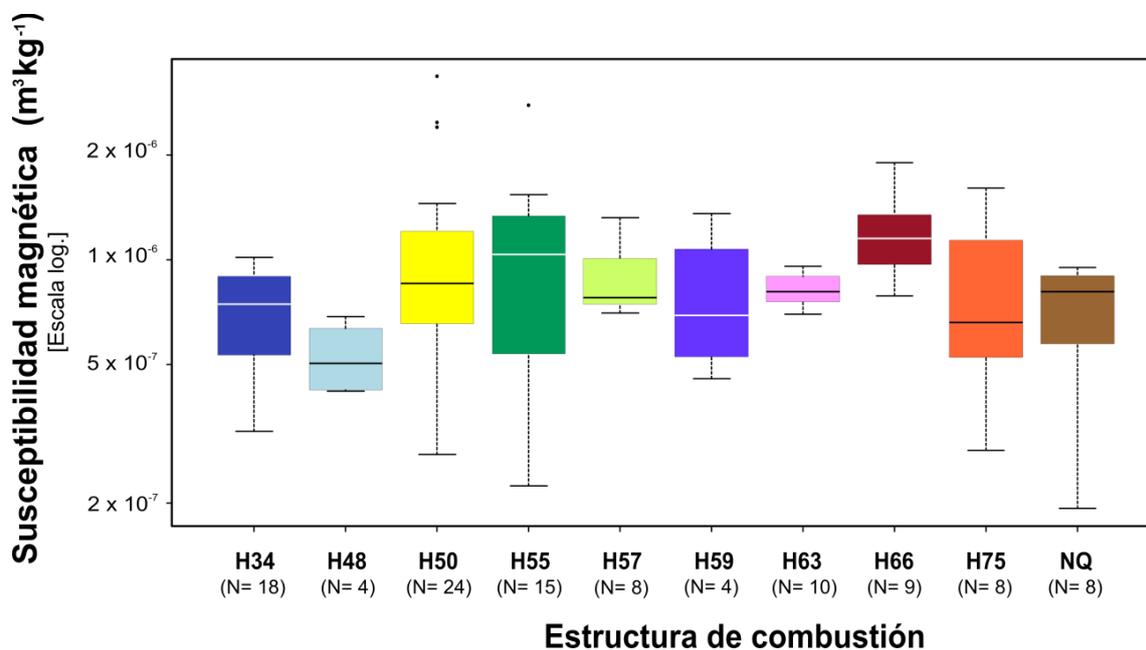


Fig. 6.2. Diagramas de cajas y bigotes para los valores de susceptibilidad magnética a temperatura ambiente de muestras orientadas de las estructuras de combustión de la unidad X de El Salt. (NQ = no quemado)

Los valores de ratio de Königsberger o Q_n (Stacey, 1967) oscilan entre 0.68 y 3.07 y en la mayoría de los casos están por encima de 1 (Fig. 6.3a-b). H59 y H57 parecen las excepciones a esta tendencia, con valores predominantemente menores de 1. Los valores de Q_n de los materiales no quemados entran dentro del rango que abarcan los quemados.

La adquisición progresiva de la IRM muestra que la remanencia está portada principalmente por minerales de baja coercitividad (Fig. 6.4). Las cenizas alcanzan valores de magnetización mayores que los de las capas negras. Por su parte, los materiales no quemados presentan valores generalmente inferiores pero del mismo orden de magnitud que los de las capas negras.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

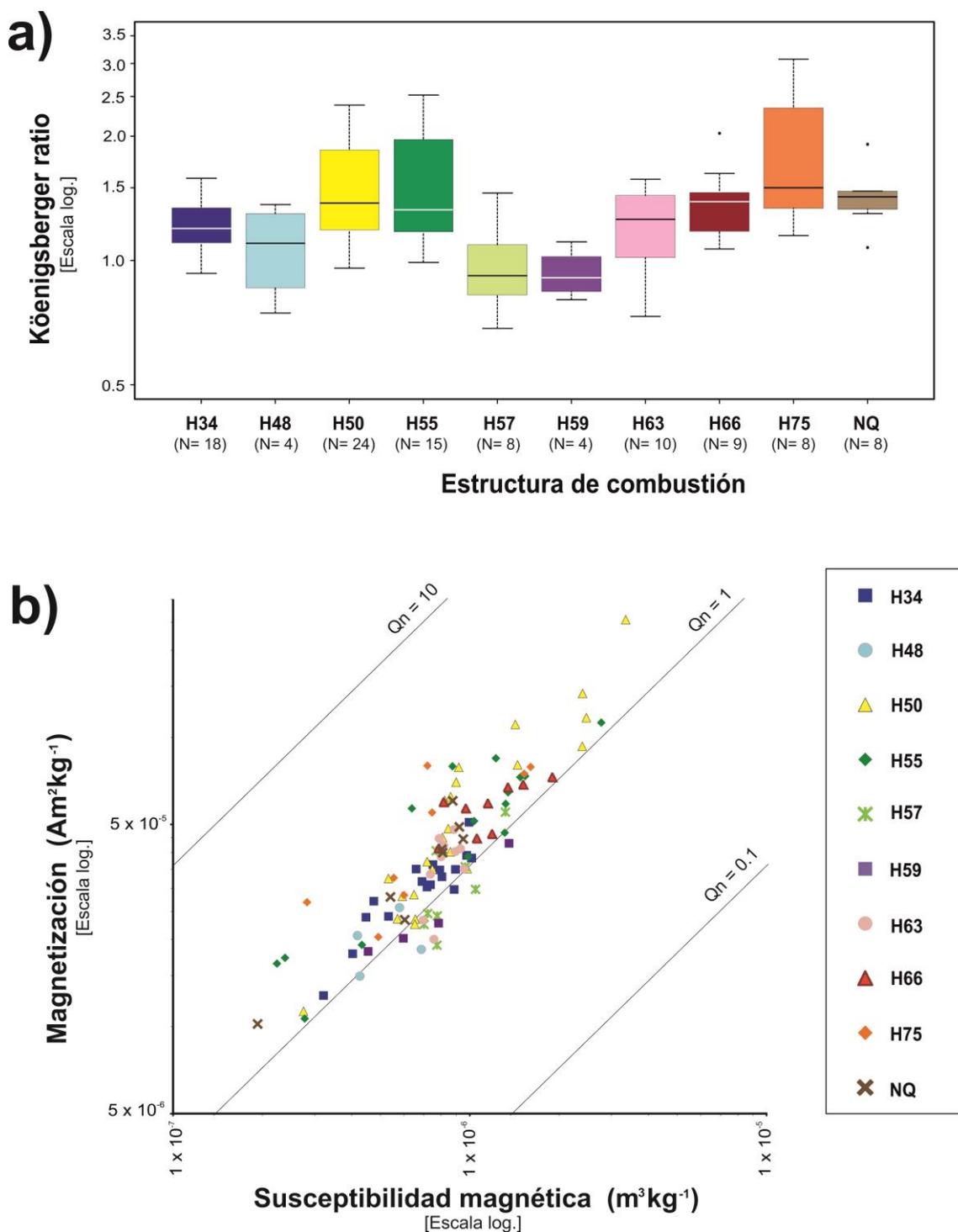


Fig. 6.3. (a) Diagrama de caja y bigotes; (b) diagrama de dispersión con los valores del ratio de Königsberger o Q_n (Stacey, 1967) para muestras orientadas de estructuras de combustión de la unidad X de El Salt estudiadas, incluyendo las isolíneas para valores de $Q_n = 0.1, 1, 10$ y 100.

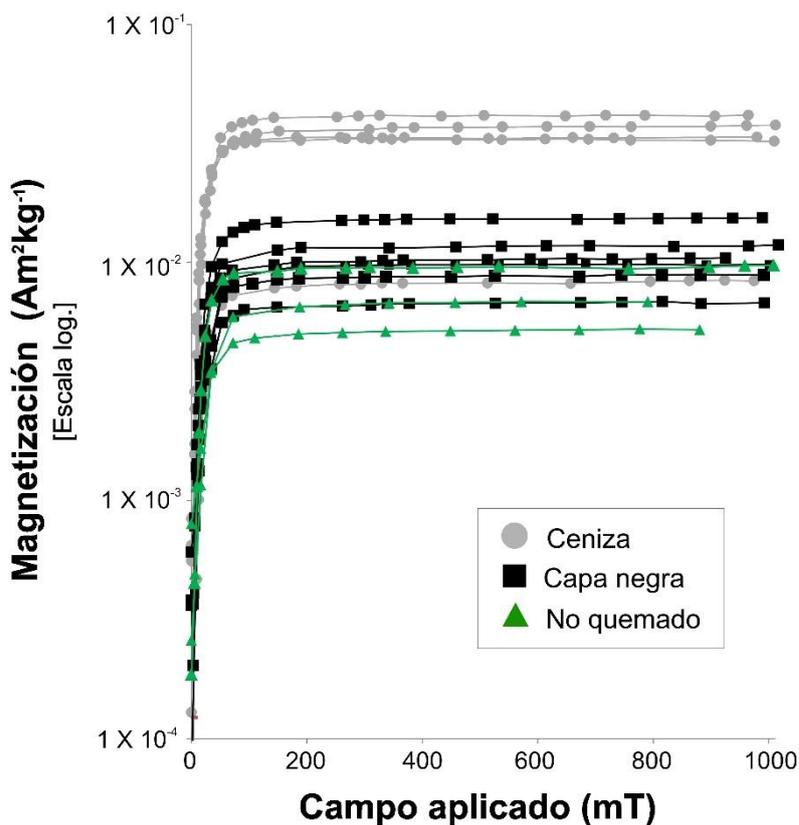


Fig. 6.4. Adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM). Los círculos grises representan muestras de ceniza, los cuadrados negros muestras de capa negra y los triángulos verdes corresponden a muestras de sustrato no quemado de la unidad Xb de El Salt.

Las curvas termomagnéticas apuntan hacia la magnetita como el principal portador de la remanencia en todas las facies estudiadas, con temperaturas de Curie próximas a 585 °C (Fig. 6.5). Cabe mencionar que tanto en las cenizas (Fig. 6.5a-b) como en el sustrato no quemado (Fig. 6.5e-f), las temperaturas de Curie son ligeramente más altas (hacia 600° C) que en las capas negras (algo por debajo de 585° C) (Fig. 6.5c-d). Esto sugiere que en las cenizas y el sustrato no quemado la magnetización pueda estar portada por maghemita o magnetita algo oxidada. En el caso de las capas negras, puede que la magnetita presente cationes sustituyentes que hagan reducir ligeramente su temperatura de Curie.

Las curvas termomagnéticas de las cenizas son altamente reversibles (Fig. 6.5a-b). Este comportamiento es coherente con las altas temperaturas experimentadas por esta facies, que hace que la mineralogía magnética se estabilice. Las capas negras, por su parte, presentan un gran aumento de la magnetización tras el calentamiento a 700°C en el laboratorio (Fig. 6.5c-d). Esto se interpreta como el efecto de la neoformación de magnetita durante el calentamiento experimental.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

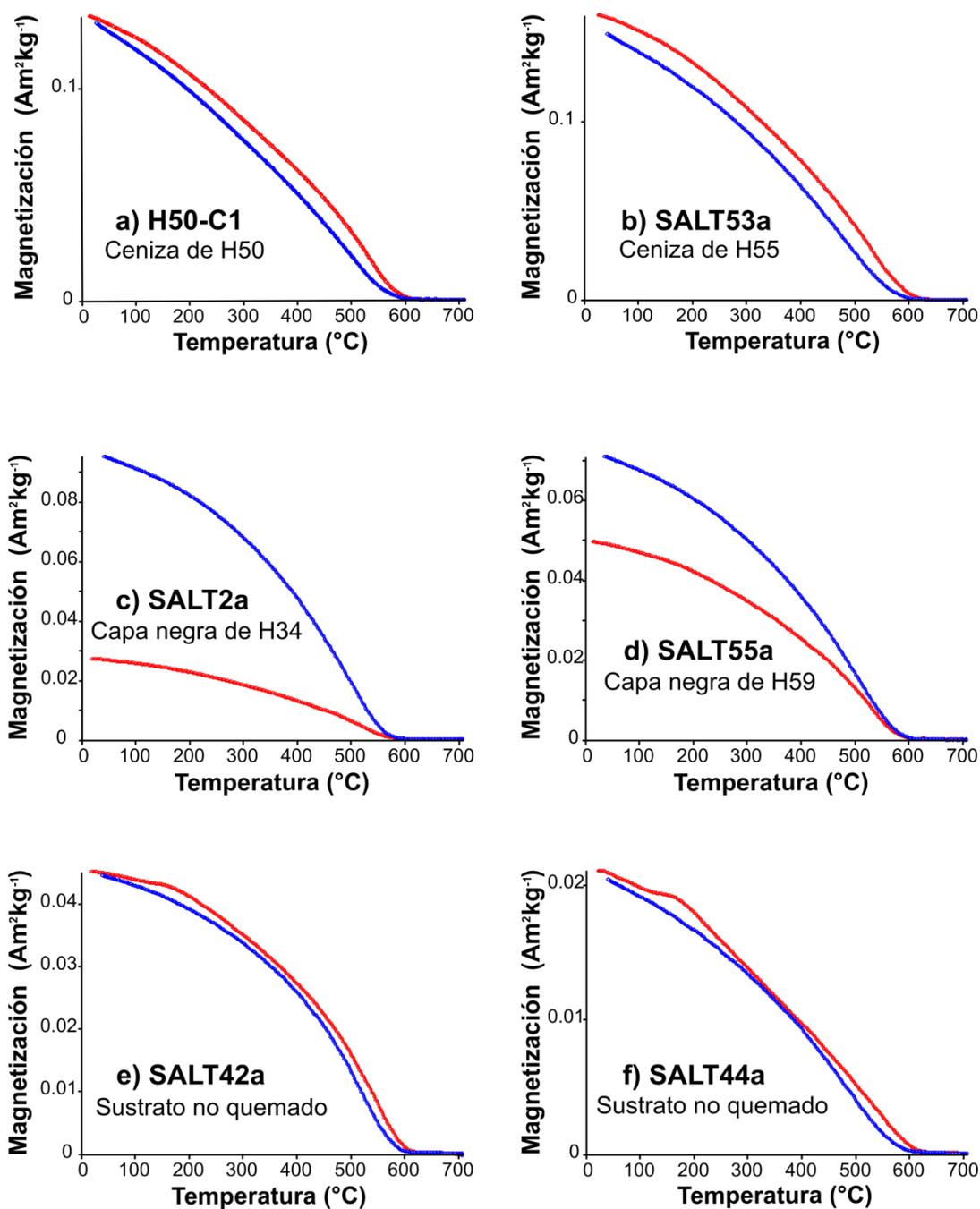


Fig. 6.5. Ejemplos representativos de curvas termomagnéticas realizadas sobre (a-b) cenizas, (c-d) capas negras y (e-f) sustrato no quemado.

En el sustrato no quemado, también se infiere la presencia de magnetita (Fig. 6.5e-f). Además, durante el calentamiento, se observa un pequeño pico de aumento de magnetización hacia 180-200 $^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento no se observa durante el enfriamiento y no hay una variación significativa en el valor de la magnetización al final del experimento respecto al valor inicial. La intensidad de su magnetización suele ser más baja que la de las capas negras y especialmente, las

cenizas (hasta un orden de magnitud). Puesto que la mineralogía predominante es similar, esto apunta hacia una concentración de minerales ferromagnéticos menor que en las facies quemadas. Los valores de susceptibilidad magnética medidos a cada paso de desmagnetización térmica de especímenes orientados no quemados muestran una caída hasta 200-300° C, comportamiento característico de la maghemita al invertirse a hematites, seguido de un incremento progresivo que se prolonga hasta el final de la desmagnetización y que no llega a alcanzar los valores de susceptibilidad iniciales (Fig. 6.6).

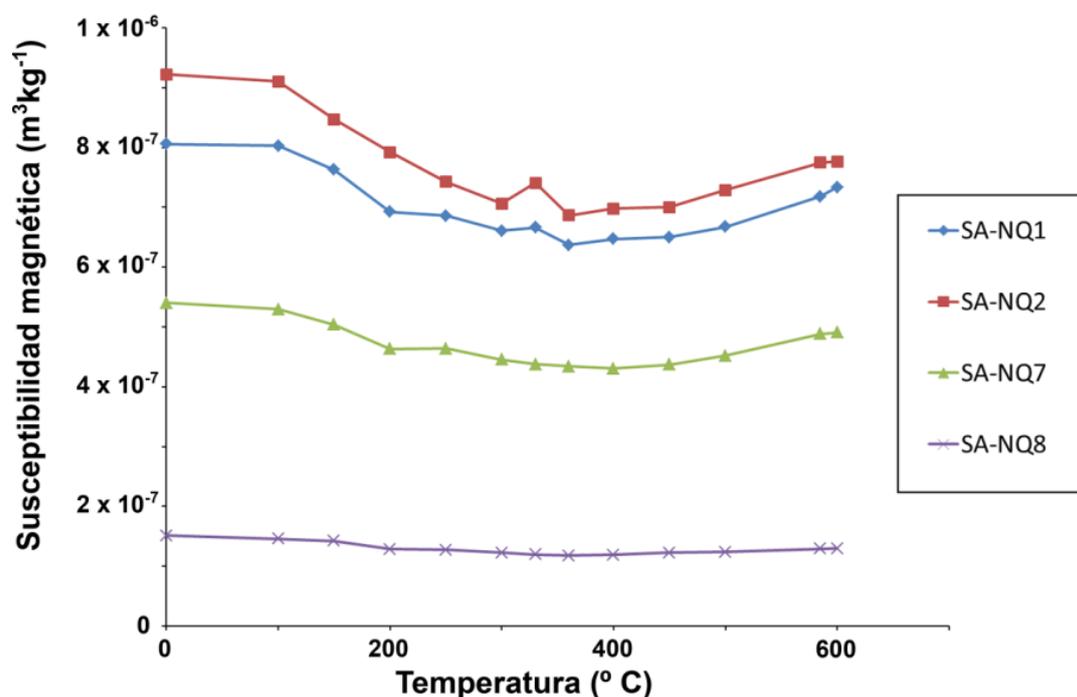


Fig. 6.6. Susceptibilidad magnética de los materiales no quemados a cada paso de desmagnetización térmica.

El ratio de histéresis M_{RS}/M_S oscila entre 0.14 y 0.20, mientras que el ratio B_{CR}/B_C presenta valores entre 2.3 y 3.2. Cuando se representan estos datos en el Day Plot (Day et al., 1977; Dunlop, 2002), se observa que todas las muestras caen en el área de comportamiento pseudo-monodominio (PSD) o de mezcla de monodominio más multidominio (SD+MD) (Fig. 6.7). Aunque las muestras no quemadas presentan algo de dispersión, en general todas las facies estudiadas quedan bastante agrupadas dentro del gráfico y no se observan diferencias granulométricas significativas destacables.

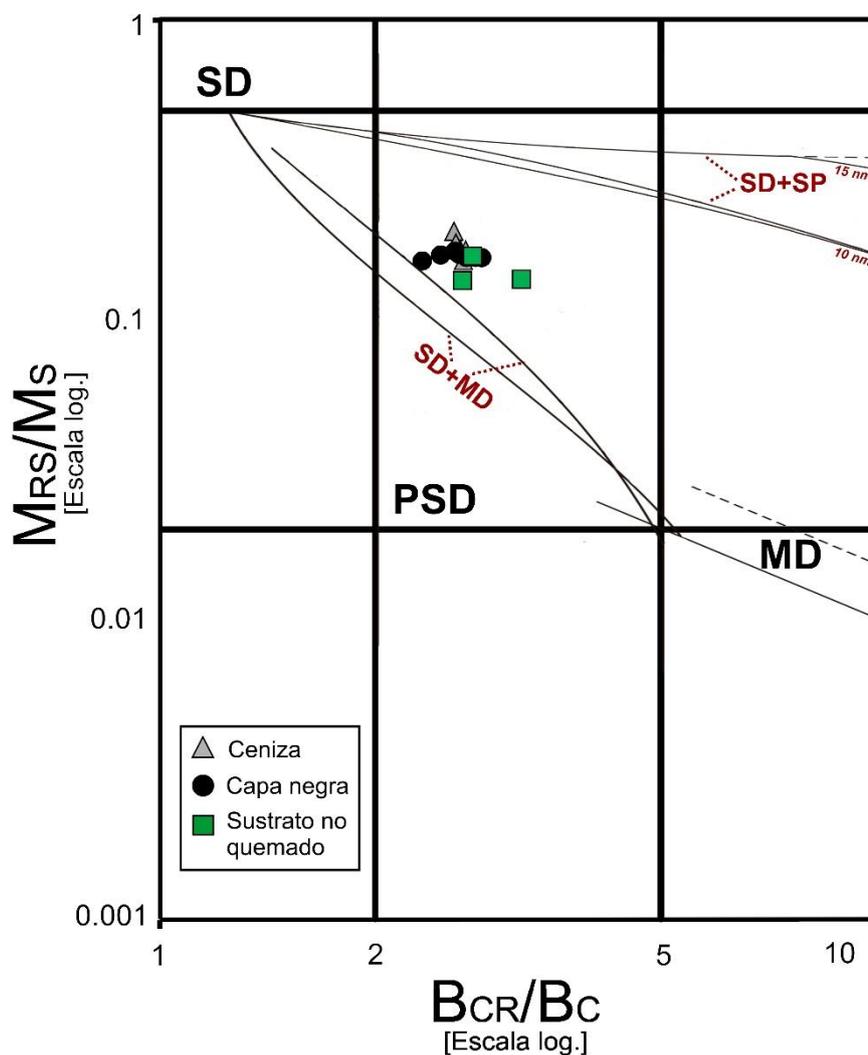


Fig. 6.7. Diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) con los resultados de muestras de cenizas, capas negras y sustrato no quemado. En el gráfico se indican las áreas de comportamiento monodominio (SD), pseudo-monodominio (PSD) y multidominio (MD), así como también las líneas teóricas de mezcla: monodominio + multidominio (SD+MD), monodominio + superparamagnéticos (SD+SP).

6.2. Análisis paleomagnéticos

Los especímenes de materiales no quemados presentan dos tipos de comportamiento. Tres de los cuatro especímenes presentan una única componente direccional que se aísla entre 150 y 500/585° C (Fig. 6.8a). El cuarto espécimen presenta una componente entre 100 y 300 °C y otra entre 330 y 550° C (comps. NQ1 y NQ2 respectivamente en Fig. 6.8b). Las direcciones de todas las componentes son de polaridad normal pero son muy dispersas (Fig. 6.8c).

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

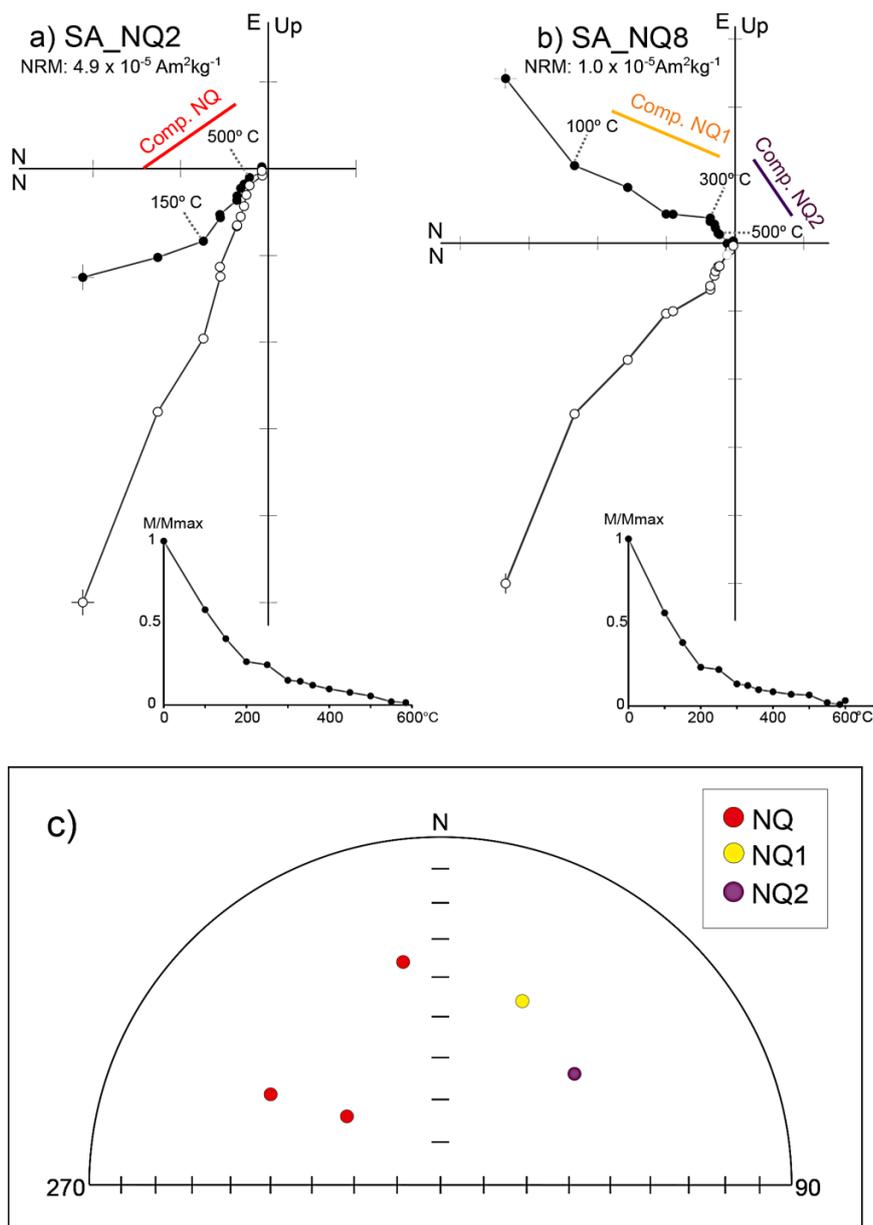


Fig. 6.8. (a-b) Ejemplos representativos de diagramas ortogonales de desmagnetización de la NRM de especímenes no quemados y sus respectivas caídas de intensidad (c) proyección de igual área con las direcciones de las distintas componentes calculadas para dichos especímenes.

El análisis de la desmagnetización de la NRM de los especímenes correspondientes a materiales quemados se ha realizado teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del estudio de los fuegos experimentales del proyecto *Neanderthal Fire Technology* (capítulo 5), así como los procesos de formación de las distintas facies. Además, para aislar las componentes, se han excluido los pasos de desmagnetización por debajo de 200° C debido a la posible influencia de magnetización viscosa adquirida tanto en el afloramiento como en el laboratorio.

Recordamos que el estudio arqueomagnético de la unidad X de El Salt ha comprendido el análisis de los hogares H34, H48, H50, H55, H57, H59, H63, H66, y H75. En casi todos los bloques orientados se incluía fundamentalmente capa negra, pero en el caso del hogar H50, pudo tomar un bloque que contenía exclusivamente ceniza (para más detalles, véase el apartado 4.3.3 del capítulo 4). En los especímenes de dicho bloque se aisló solamente ceniza (bloque C1 de la estructura H50), se ha aislado una única componente entre 200/300° C y 500/600° C de polaridad normal (Fig. 6.9a-b) que se interpreta como la componente característica (ChRM) adquirida mediante el mecanismo de la termorremanencia. Estas altas temperaturas alcanzadas son coherentes con el proceso de las cenizas, que son fundamentalmente el combustible calcinado.

En los especímenes de los bloques restantes (17), que fundamentalmente contienen capa negra, se han identificado comportamientos similares a los observados en los fuegos experimentales:

- a) Por un lado, la mayoría de los especímenes presentan una componente de polaridad normal entre 200/250° C y 300/500°C (componente A en la Fig. 6.9c-d) que se interpreta como una termorremanencia parcial (pTRM) y por tanto se considera la ChRM (asociada al calentamiento). Entre 350/525° C y 475/660° C se observa una segunda componente (componente B en la Fig. 6.9c-d) que se interpreta como el registro previo al último calentamiento. Ocasionalmente se aísla una tercera componente (C) entre 525/600 y 600/680°C (Fig. 6.9c).
- b) Excepcionalmente, en algunos especímenes se observa una única componente desde 250° C hasta 585° C (Fig. 6.9e). En este caso se interpreta que existe una termorremanencia completa (TRM).
- c) Por último, existen algunos especímenes cuyos diagramas presentan solapamientos y/o direcciones anómalas (Fig. 6.9f), en los cuales no se ha identificado la ChRM.

Las direcciones arqueomagnéticas medias de la ChRM de las distintas estructuras de combustión se muestran en la Fig. 6.10. Las direcciones medias de H66 y H75 no han podido ser calculadas debido a un problema instrumental relacionado con el control de la temperatura alcanzada en el horno durante la desmagnetización térmica que afectó a los especímenes de estas estructuras. Para el cálculo de las direcciones medias de las demás estructuras de combustión, se han excluido especímenes rotos durante la desmagnetización y algunos que mostraban direcciones anómalas y/o en los que no se pudo aislar la ChRM (por ejemplo, Fig. 6.9f). Parte de estos especímenes provienen de bloques de mano que se habían visto fragmentados o afectados por la lluvia en el campo (es el caso de algunos bloques de H50).

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

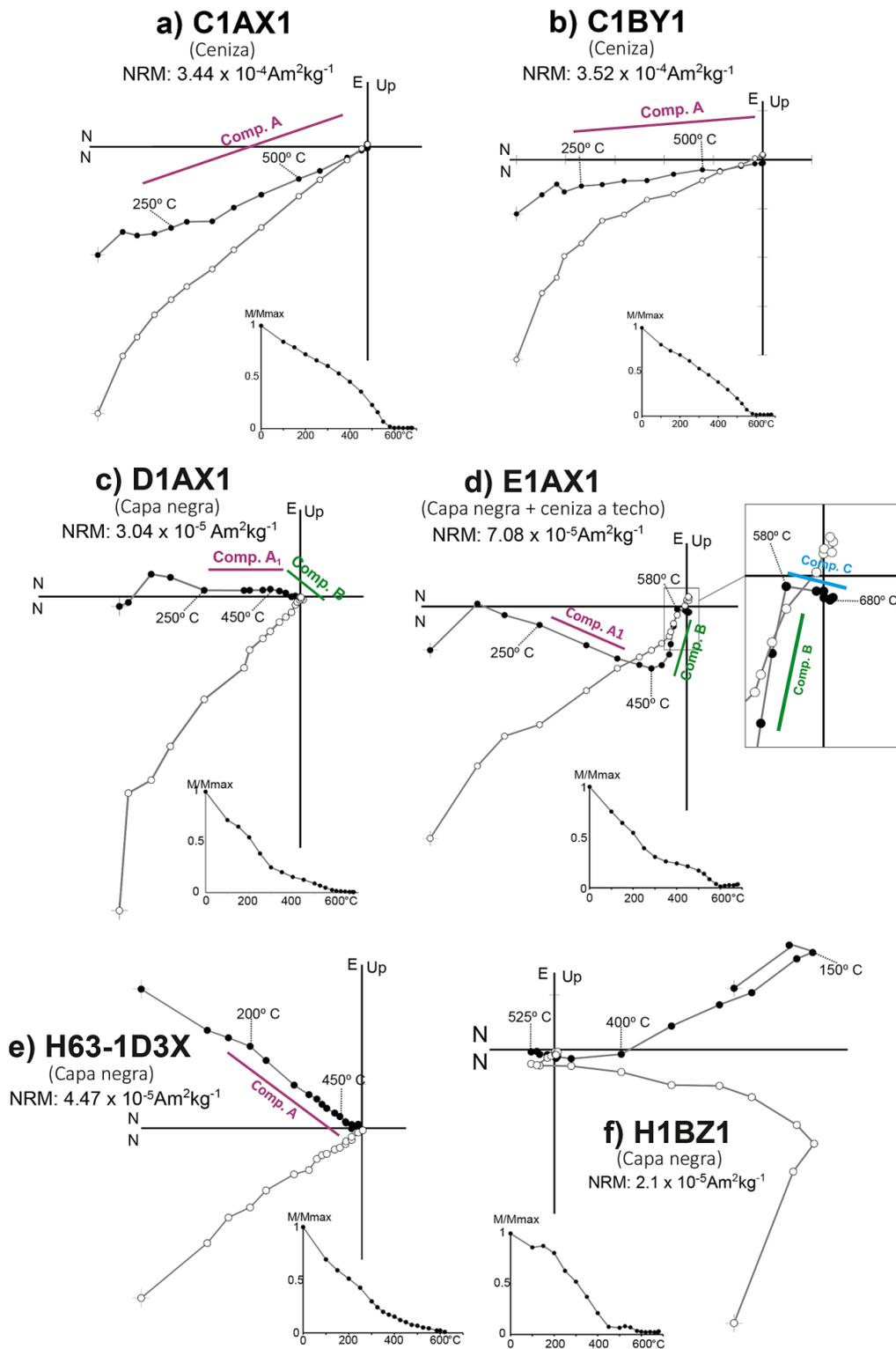


Fig. 6.9. Ejemplos representativos de diagramas ortogonales de desmagnetización de la NRM de especímenes procedentes de las estructuras de combustión de la unidad X de El Salt. Los símbolos negros representan la proyección en el plano horizontal y los blancos en el vertical.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

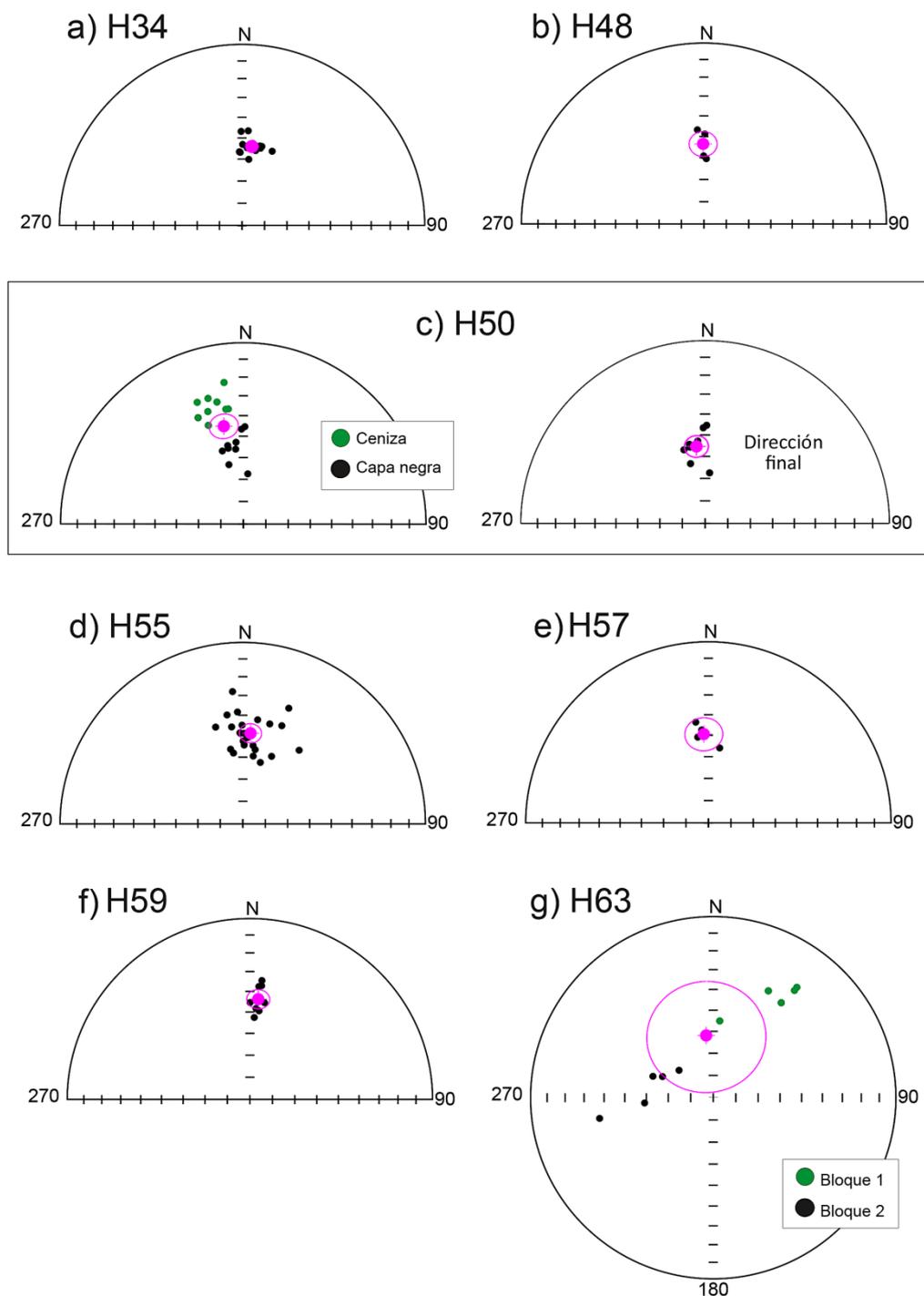


Fig. 6.10. Proyecciones de igual área con las direcciones medias obtenidas para (a) H34, (b) H48, (c) H50 [en el panel izquierdo se muestra la dirección teniendo en cuenta tanto las cenizas –símbolos verdes- como la capa negra –símbolos negros conjuntamente; en el de la derecha, se muestra el dato final, para el que se excluyeron los especímenes de cenizas puras], (d) H55, (e) H57, (f) H59 y (g) H63. En color rosa se muestran la dirección media y el semiángulo del cono de error al 95% de probabilidad ($\alpha 95$) correspondiente. Los puntos negros/verdes representan las direcciones de cada uno de los especímenes tenidos en cuenta para calcular la media según su leyenda.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

Conviene realizar algunas consideraciones importantes acerca de algunas de las direcciones obtenidas. En el caso de H50, se puede observar que existen diferencias relacionadas con el tipo de facies (cenizas *versus* capa negra subyacente, Fig. 6.10c). La mayor diferencia se observa en la inclinación, que es bastante más baja en las cenizas (33.3° en las cenizas y 55.1° en la capa negra). Teniendo en cuenta que el sustrato está bastante compactado antes del calentamiento y que las cenizas tienen una naturaleza más disgregada, se interpreta que la diferencia direccional entre facies se debe a una compactación de las cenizas, que se traduce en una reducción de la inclinación. Es por esto que las cenizas de esta estructura de combustión no han sido tenidas en cuenta para obtener la dirección definitiva que se usa para la temporalización de ocupaciones.

En el caso del hogar H63 también se observan dos poblaciones diferenciadas (Fig. 6.10g), aunque bastante dispersas. En este caso, no se tiene constancia de que haya diferencias claras entre facies como ocurría en el caso de H50, por lo que éstas no explican el comportamiento observado. Se interpreta que el causante de esto pueda ser algún tipo de sesgo introducido durante el muestreo o el submuestreo, ya que las muestras se agrupan relativamente bien en función del bloque de mano observado. Puesto que no tenemos evidencias de si el problema existe en uno o ambos bloques, los resultados de esta estructura de combustión han sido descartados para la detección y temporalización de las ocupaciones.

Las direcciones tenidas en cuenta definitivamente para la individualización y temporalización de ocupaciones, así como sus parámetros estadísticos asociados, se resumen en la Tabla 6.1.

Estructura de combustión	N/N'	Dec.- (°)	Inc. (°)	k	α95
H34	14/18	7.0	53.8	221	2.7
H48	5/10	359.5	53.5	169	5.9
H50	9/29	353.6	55.1	105	5.0
H55	23/30	4.9	48.6	44.2	4.6
H57	4/12	357.1	49.4	136	7.9
H59	8/12	4.7	43.6	140	4.7

Tabla 6.1. Direcciones arqueomagnéticas medias obtenidas para las distintas estructuras de combustión de la unidad X de El Salt y sus parámetros estadísticos asociados. De izquierda a derecha: nombre de la estructura de combustión; número de muestras tenidas en cuenta para calcular la dirección media (N) *versus* número total de muestras desmagnetizadas (N'); declinación; inclinación; parámetro de precisión (k); semiángulo del cono de error al 95% de probabilidad (α95).

6.3. Detección de diacronías y temporalización de ocupaciones

La hipótesis de trabajo básica aquí planteada consiste en la comparación de las direcciones arqueomagnéticas medias de distintas estructuras de combustión de la unidad X del yacimiento de El Salt. Puesto que la dirección del campo magnético terrestre (CMT) cambia a lo largo del tiempo, si observamos que las direcciones arqueomagnéticas medias de varias estructuras de combustión son estadísticamente distinguibles, podemos asumir que el (último) calentamiento experimentado por cada una de ellas tuvo lugar en momentos diferentes.

Si observamos todas las direcciones obtenidas representadas de manera conjunta (Fig. 6.11), se pueden distinguir claramente (es decir, sin que haya solapamiento entre los $\alpha 95$) las direcciones de H34 y H50, H34 y H59, H50 y H55, y también H50 y H59. Parece que ocurre lo mismo con H48 y H59, pero en realidad, si observamos sus parámetros estadísticos, realmente existe un pequeñísimo solapamiento. El resto de combinaciones presentan solapamientos parciales de los $\alpha 95$, por lo que existe posibilidad de que las direcciones no sean diferentes. Para evaluar con mayor detalle esta cuestión, se ha recurrido a la aplicación de test estadísticos para la distinción de direcciones medias.

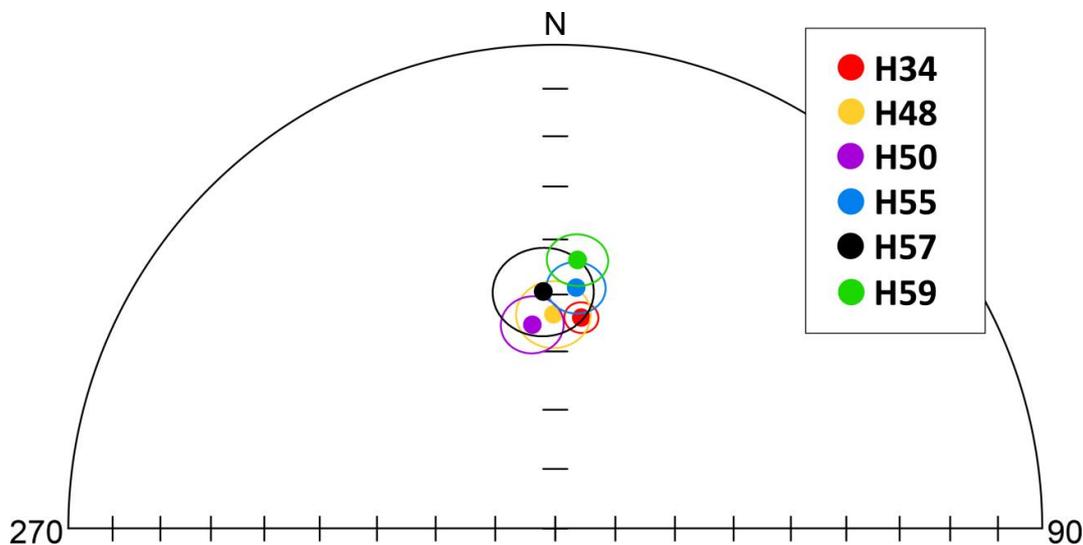


Fig. 6.11. Proyección de igual área mostrando conjuntamente todas las direcciones arqueomagnéticas medias obtenidas a partir de las estructuras de combustión estudiadas de la unidad X de El Salt.

En primer lugar, se ha aplicado el test estadístico desarrollado por McFadden y McElhinny (1990). Mediante esta prueba se calcula el ángulo crítico y (a un determinado nivel de confianza) entre las direcciones medias de dos

poblaciones. Este ángulo marca el límite de distancia angular por encima del cual se puede excluir la hipótesis de que las poblaciones tienen una media común.

Puesto que este test se basa fundamentalmente en la distribución de las poblaciones comparadas, las distribuciones deben de tener la misma dispersión y por tanto, el parámetro de precisión (k) de ambas poblaciones (indicativo de la dispersión de un conjunto de direcciones) debe de poder ser considerado común (McFadden y McElhinny, 1990). Para evaluar esto, se utilizan los postulados de Watson (1956), de los que se deriva

$$\frac{k_1}{k_2} \approx F[2(N_2 - 1), 2(N_1 - 1)]$$

donde $F[v, \mu]$ es el valor de la distribución de Fisher para v y μ grados de libertad. Se suele aceptar que si k_1/k_2 no excede el correspondiente valor de F al 95% de confianza (considerando siempre que k_1 debe corresponder al parámetro de precisión de la población con mayor k de entre las examinadas; es decir, $k_1 > k_2$), se puede aceptar la hipótesis de una k común. Cuando se realiza esta comprobación para todas las combinaciones de estructuras de combustión, se puede ver que en algunos casos (H34-H50; H34-H55; H50-H55; H48-H55; H55-H59), se puede rechazar la hipótesis de una k común (Tabla 6.2). Por lo tanto, aunque el test ha sido aplicado a todas las combinaciones de estructuras posibles, los resultados para las combinaciones en las que no se cumple la hipótesis de k común pueden ser cuestionables. Los resultados del test se resumen en la Tabla 6.2.

En aquellas combinaciones en las que se puede rechazar la hipótesis de una media común (según el test de McFadden y McElhinny (1990), se interpreta que existe una relación diacrónica entre las estructuras implicadas. Es decir, la estructura H34 se realizó (o siendo más estrictos, se calentó/enfrió por última vez) en un momento diferente a H50, H57 y H59 respectivamente. De H48 se puede decir que presenta una relación diacrónica respecto a H59. Por su parte, el registro direccional de H50 corresponde a un tiempo diferente a los de H34, H55 y H59 respectivamente. En el caso de H55, sólo se puede establecer diacronía respecto a H50. En cuanto a la estructura H57, se considera que presenta un registro diacrónico respecto a H34 y H59 respectivamente. Por último, se puede considerar que el registro direccional de H59 se asocia a momentos diferentes de los de H34, H48, H50 y H57.

Adicionalmente, se ha recurrido al test de medias comunes incluido en el software *Pmagpy* (Tauxe et al., 2016). Este test, que se basa en el método de *bootstrap*, no exige que los datos utilizados se ajusten a una determinada distribución (por ejemplo, fisheriana) y, por tanto, tampoco precisa que ambas poblaciones tengan un parámetro de precisión (k) común. Por todo ello, resulta de especial utilidad para contrastar los resultados obtenidos con el test de McFadden y McElhinny (1990) (especialmente en los casos de aquellas combinaciones en las que no se cumplía la premisa de una k común). Cuando se aplica este test,

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

Combinación de estructuras	k_1/k_2	¿Se puede considerar que ambas poblaciones presentan una k común?	R_1	R_2	N	$\gamma_{95}(\text{°})$	$\gamma_0(\text{°})$	¿Se puede rechazar la hipótesis de una media común?	
								Según test de McFadden y McElhinny (1990)	Según test <i>common</i> de Pmagpy (Tauxe et al., 2016)
H34-H48	1.31	SÍ	13.9	4.98	19	5.25	4.45	NO	SÍ
H34-H50	2.10	NO	13.9	8.92	23	5.09	7.89	SÍ	SÍ
H34-H55	4.99	NO	13.9	22.5	37	6.18	5.36	NO	SÍ
H34-H57	1.63	SÍ	13.9	3.98	18	5.91	7.55	SÍ	NO
H34-H59	1.58	SÍ	13.9	7.95	22	4.80	10.3	SÍ	SÍ
H48-H50	1.61	SÍ	4.98	8.92	14	7.64	3.79	NO	NO
H48-H55	3.82	NO	4.98	22.5	28	10.1	5.96	NO	NO
H48-H57	1.24	SI	4.98	3.98	9	7.97	4.36	NO	NO
H48-H59	1.21	SÍ	4.98	7.95	13	6.86	10.5	SÍ	NO
H50-H55	2.38	NO	8.92	22.5	32	7.92	9.52	SÍ	SÍ
H50-H57	1.29	SÍ	8.92	3.98	13	8.65	6.09	NO	NO
H50-H59	1.33	SÍ	8.92	7.95	17	6.70	13.55	SÍ	SÍ
H55-H57	3.07	SÍ	22.5	3.98	27	11.4	5.18	NO	NO
H55-H59	3.17	NO	22.5	7.95	31	8.19	5.00	NO	NO
H57-H59	1.03	SÍ	3.98	7.95	12	7.79	7.8	SÍ	NO

Tabla 6.2. Resumen de los datos utilizados y de los resultados obtenidos al aplicar el test de McFadden y McElhinny (1990) y el test de medias comunes incluido en el programa *Pmagpy* (Tauxe et al., 2016). R_1 y R_2 son los respectivos valores del parámetro R (módulo de la suma de los N vectores unitarios) para las poblaciones implicadas en la combinación; N es el número total de muestras usadas para calcular las direcciones de cada combinación; γ_{95} es el ángulo crítico que establece el límite angular por encima del cual se puede rechazar que dos direcciones tengan una media común al 95% de probabilidad; γ_0 es el ángulo existente entre las dos direcciones medias de cada combinación. Las celdas sombreadas en gris corresponden a combinaciones cuyas direcciones pueden ser consideradas estadísticamente distinguibles.

se genera un conjunto de medias sintéticas a partir de cada población involucrada en la prueba con ayuda del método de *bootstrap*. Estas medias son convertidas a coordenadas cartesianas y el programa representa las distribuciones acumuladas de cada una de sus componentes, con los respectivos intervalos en los que se incluye en 95% de los datos sintéticos. Si en alguna de esas componentes los intervalos con el 95% de los datos de una y otra población no se solapan, dichas poblaciones pueden considerarse distinguibles (Tauxe, 2008). Los resultados obtenidos para los datos de El Salt se muestran en las Figs. 6.12, 6.13 y 6.14. Según esto, se puede considerar distinguible H34 de H48, H34 de H50, H34 de H55, H34 de H59, H50 de H55 y H50 de H59 (Tabla 6.2).

Si se comparan los resultados de ambos test estadísticos (Tabla 6.2), se puede observar que para algunas de las combinaciones (H34-H48, H34-H55, H34-H57, H48-H59 y H57-H59), los resultados son contradictorios. Esto sucede especialmente cuando la diferencia entre γ_0 y γ_{95} es pequeña. Resulta curioso que sólo uno de esos casos (H34-H55) corresponde a una combinación en las que no se cumplía el criterio de k común necesario para aplicar el test de McFadden y McElhinny (1990). Por lo tanto, parece que ésta no es la causa de la variabilidad detectada en los resultados.

Como se puede ver, los test estadísticos permiten detectar registros direccionales diacrónicos, lo que ya de por sí es un aporte arqueológico muy significativo ya que permite individualizar ocupaciones. Sin embargo, no nos aportan información del tiempo que sería necesario para explicar la diferencia angular entre direcciones distinguibles. Esta limitación nos sirve de punto de partida para plantear una nueva propuesta metodológica que permita dar un paso más hacia la temporalización de ocupaciones a partir de las estructuras de combustión. Utilizando el modelo paleomagnético SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014), y con la inestimable ayuda del Dr. Francisco Javier Pavón Carrasco (Universidad Complutense de Madrid) para plantear y desarrollar los cálculos, se ha realizado una serie de estimaciones que permiten evaluar la magnitud de tiempo mínima (años, décadas, siglos, milenios, etc.) que podría explicar la distancia angular entre las direcciones de distintas estructuras de combustión con un cierto nivel de confianza estadística. El modelo SHA.DIF.14k es una reconstrucción del campo geomagnético a escala global en armónicos esféricos basada en datos arqueomagnéticos y también procedentes de rocas volcánicas que cubre el periodo Holoceno, entre 12000 a. de C. y 1900 d. de C.

En primer lugar, se ha calculado la diferencia angular entre las direcciones de cada combinación de estructuras mediante el uso de la técnica de muestreo *bootstrap* (en todos los casos, el *bootstrap* se ha aplicado muestreando aleatoriamente las curvas unas 10^6 veces), teniendo en cuenta la declinación, la inclinación y el α_{95} de cada una de ellas. Lo que se obtiene así es la función de distribución de la frecuencia de cada valor posible para dicha diferencia angular (Fig. 6.15a). La distribución obtenida es del tipo normal o Gaussiana. En segundo lugar, se ha estimado, también mediante *bootstrap* y a partir del modelo SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014),

la diferencia angular de la dirección del campo magnético terrestre (CMT) en momentos separados por un intervalo de tiempo de Δt años. Los valores asignados a Δt van desde 10 hasta 2000 años. A partir de 2000 años, por las características propias de la variación secular, la diferencia angular se estabiliza en la amplitud angular de la variación secular característica de cada latitud. Por esta razón se ha establecido ese valor como límite máximo de Δt . Para cada valor de Δt , se ha tomado la dirección del CMT para momentos elegidos aleatoriamente y se ha calculado la distancia angular entre cada una de estas direcciones y la de Δt años antes o después (si se tomaba la de antes o la de después también ha sido elegido de manera aleatoria). A partir de esto, utilizando de nuevo un muestreo aleatorio *bootstrap*, se ha representado la función de distribución de la frecuencia de cada valor posible para la diferencia angular de cada Δt (Fig. 6.15b), que como se observa sigue una distribución log-normal. Posteriormente, se ha obtenido la función de probabilidad combinada multiplicando la función de distribución de la distancia angular entre las direcciones del par de estructuras evaluadas (Fig. 6.15a) por la función de distribución de la distancia angular entre las direcciones del CMT para todos los Δt (Fig. 6.15b). El área encerrada por la nueva función de probabilidad combinada corresponde a la probabilidad de que la distribución de la diferencia angular entre ambos eventos se corresponda con una distancia temporal en la serie de variación secular (Fig. 6.15c). A partir de este punto, sólo se ha tenido en cuenta el rango de años hasta alcanzar el primer máximo de probabilidad. Después de ese máximo, aunque pueden existir algunas pequeñas variaciones, se alcanza prácticamente una asíntota. Puesto que vamos a trabajar en términos del tiempo mínimo que podría explicar la diferencia angular entre dos direcciones medias y teniendo en cuenta que la variación secular tiene un rango máximo de variabilidad de cerca de $\pm 25^\circ$ (que se promedia cada aproximadamente 2000 años), el hecho de tomar sólo hasta el primer máximo de probabilidad nos asegura un cálculo conservador de la probabilidad. De hecho, dos direcciones idénticas podrían estar separadas por cualquier intervalo de tiempo del orden de magnitud de 10^3 años porque hay cierta probabilidad de que el campo magnético terrestre vuelva a tener ese valor. En el cómputo de casos posibles hemos excluido los casos de que una determinada diferencia angular se genere en intervalos superiores a 10^3 , maximizando de este modo la fiabilidad de la hipótesis. Para obtener el intervalo de tiempo mínimo, finalmente, se normaliza la función de densidad de probabilidad combinada por el área encerrada por esta para expresar sus valores en porcentajes (Fig. 6.15d). Esto permite estimar el tiempo mínimo que tendría que haber pasado para explicar la diferencia angular entre las direcciones arqueomagnéticas medias de dos hogares a un determinado valor de probabilidad. Tomando el ejemplo representado en la Fig. 6.15d, se puede excluir con un 95% de probabilidad que hayan pasado menos de 174 años para explicar la diferencia angular entre las direcciones medias de las estructuras H50 y H59.

Los resultados de todas las combinaciones de las estructuras estudiadas se muestran en las Fig. 6.16, 6.17 y 6.18. Si tomamos un valor del 95% de probabilidad, podemos interpretar lo siguiente:

*La distancia angular entre las direcciones medias de H34 y H48 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 27 años (Fig. 6.16a).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H34 y H50 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 120 años (Fig. 6.16b)

*La distancia angular entre las direcciones medias de H34 y H55 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 42 años (Fig. 6.16c).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H34 y H57 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 81 años (Fig. 6.16d).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H34 y H59 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 153 años (Fig. 6.16e).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H48 y H50 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 24 años (Fig. 6.17a).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H48 y H55 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 39 años (Fig. 6.17b).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H48 y H57 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 28 años (Fig. 6.17c).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H48 y H59 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 142 años (Fig. 6.17d).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H57 y H59 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 91 años (Fig. 6.17e)

*La distancia angular entre las direcciones medias de H50 y H55 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 136 años (Fig. 6.18a).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H50 y H57 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 36 años (Fig. 6.18b).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H50 y H59 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 174 años (Fig. 6.18c).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H55 y H57 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 30 años (Fig. 6.18d).

*La distancia angular entre las direcciones medias de H55 y H59 no se puede explicar con una diferencia temporal de menos de 32 años (Fig. 6.18e).

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

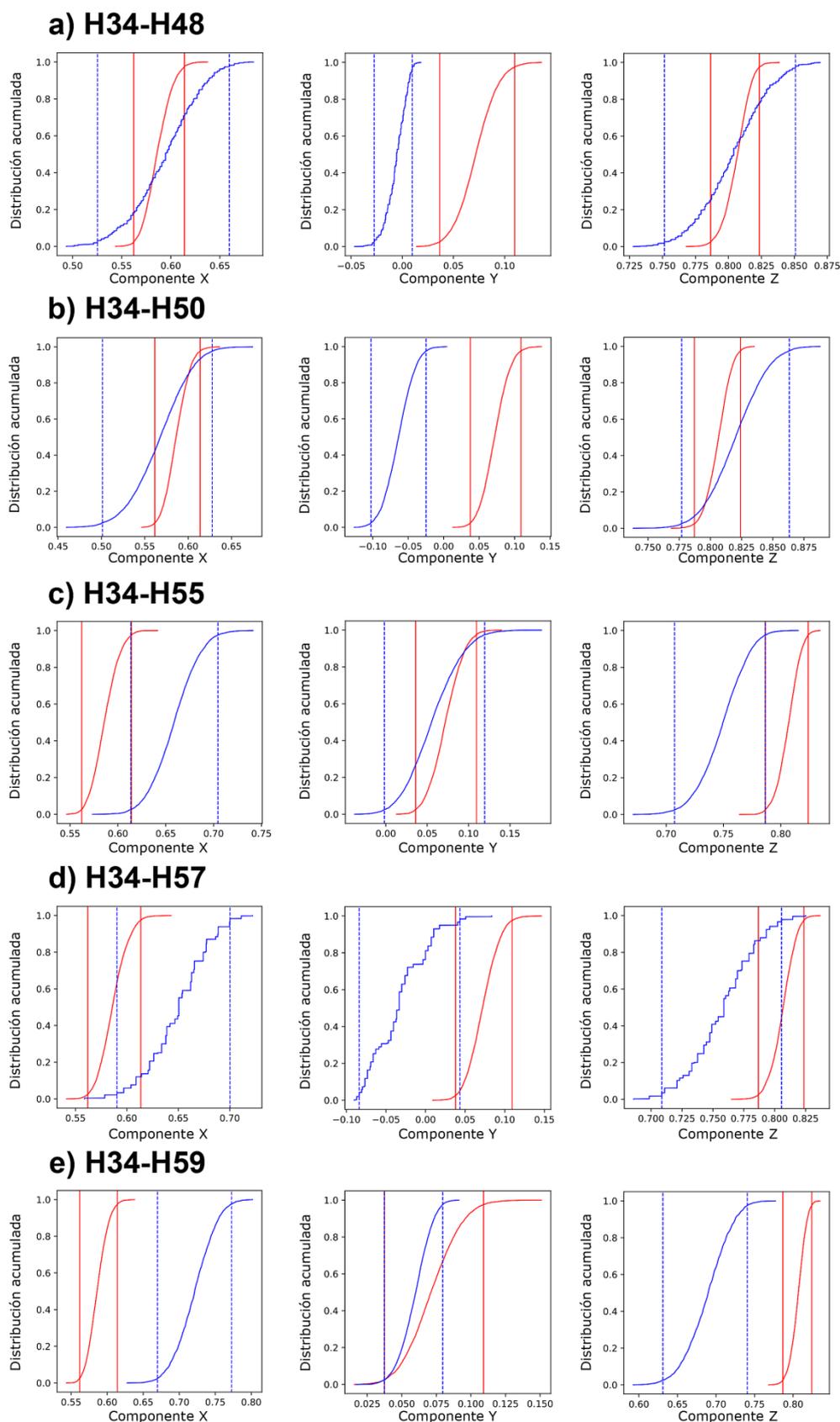
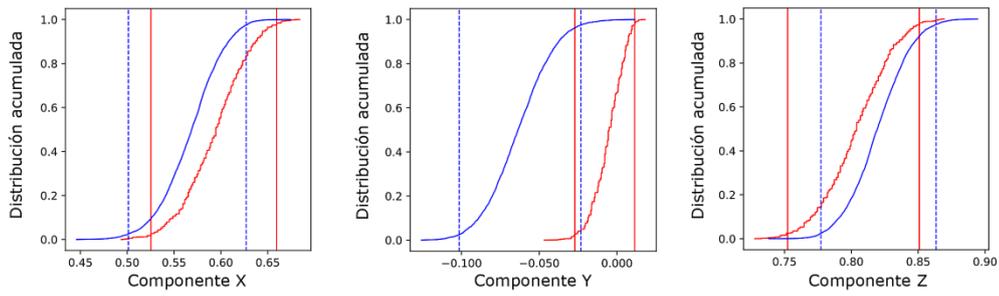


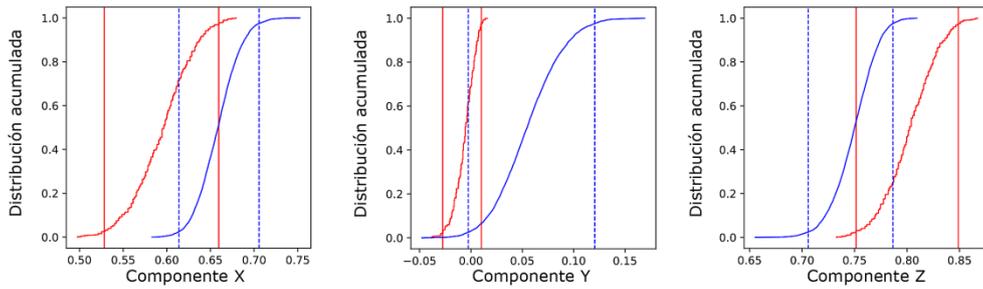
Fig. 6.12. Resultados del test de media común incluido en el *software* Pmagpy (Tauxe et al., 2016) para las combinaciones de fuegos (a) H34-H48, (b) H34-H50, (c) H34-H55, (d) H34-H57 y (e) H34-H59.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

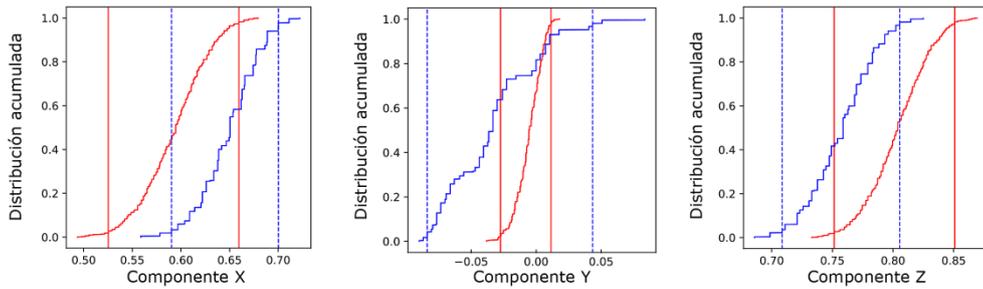
a) H48-H50



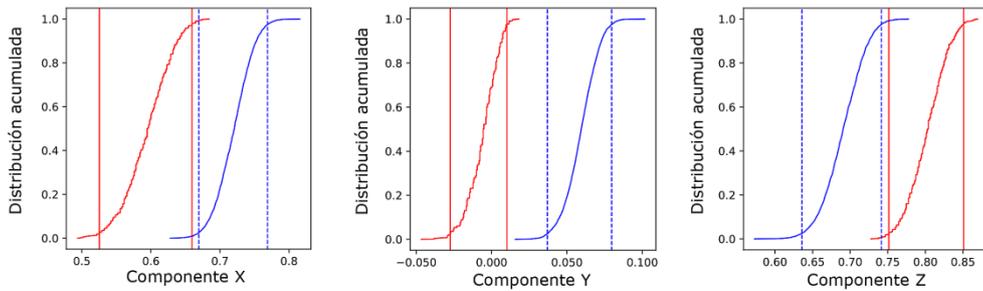
b) H48-H55



c) H48-H57



d) H48-H59



e) H57-H59

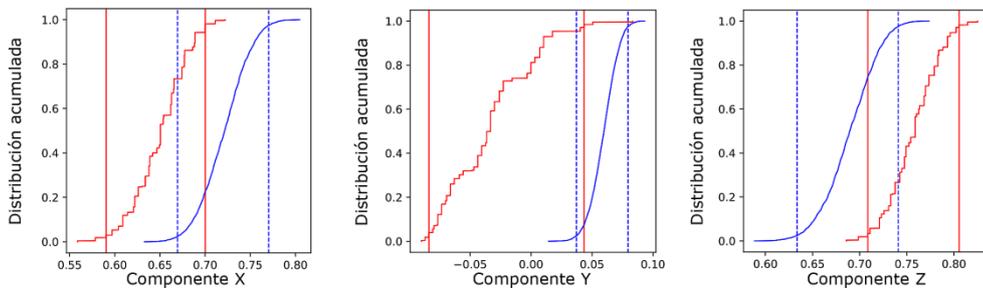


Fig. 6.13. Resultados del test de media común incluido en el *software* Pmagpy (Tauxe et al., 2016) para las combinaciones de fuegos (a) H48-H50, (b) H48-H55, (c) H48-H57, (d) H48-H59 y (e) H57-H59.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

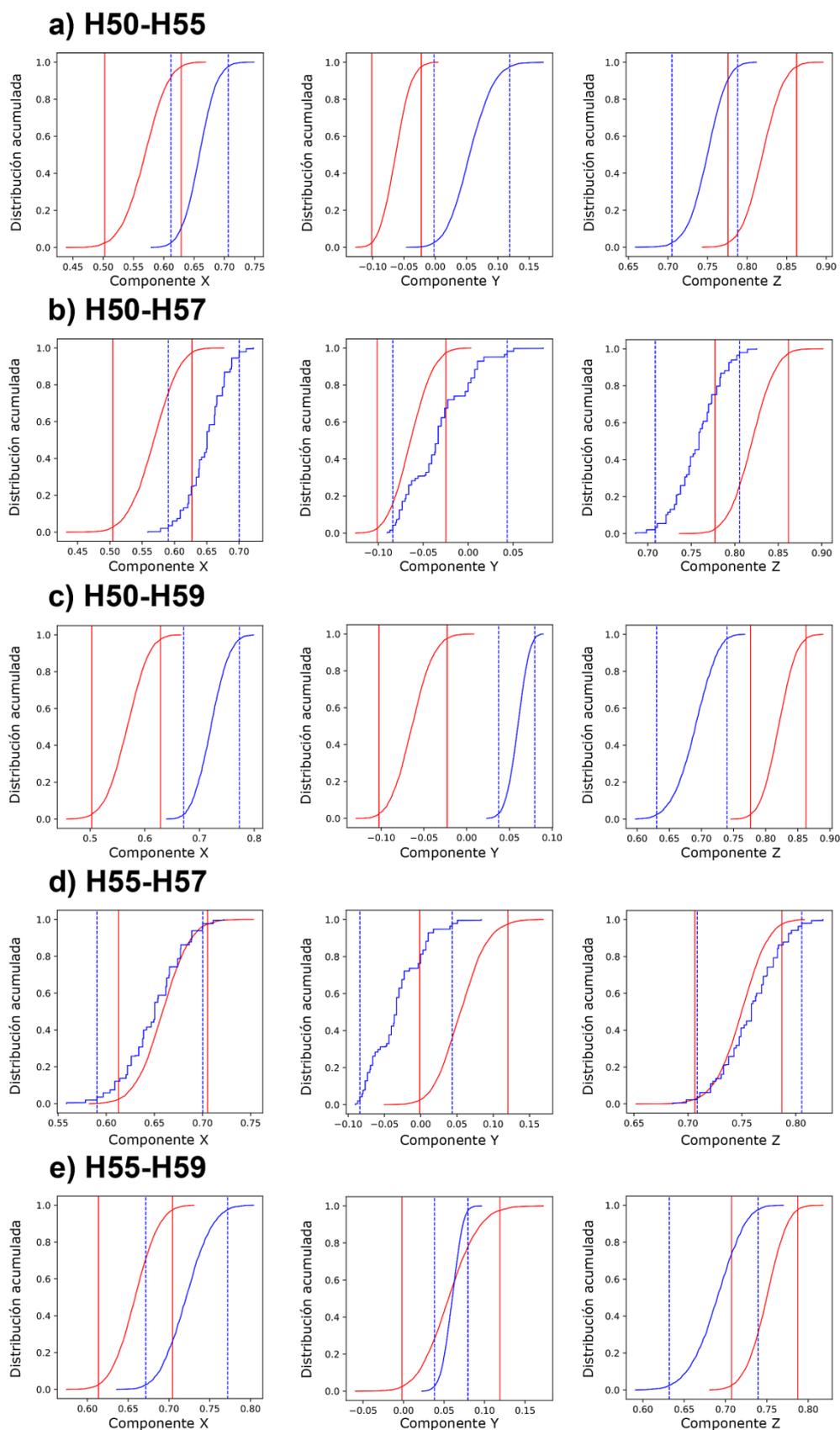


Fig. 6.14. Resultados del test de media común incluido en el *software* Pmagpy (Tauxe et al., 2016) para las combinaciones de fuegos (a) H50-H55, (b) H50-H57, (c) H50-H59, (d) H55-H57 y (e) H55-H59.

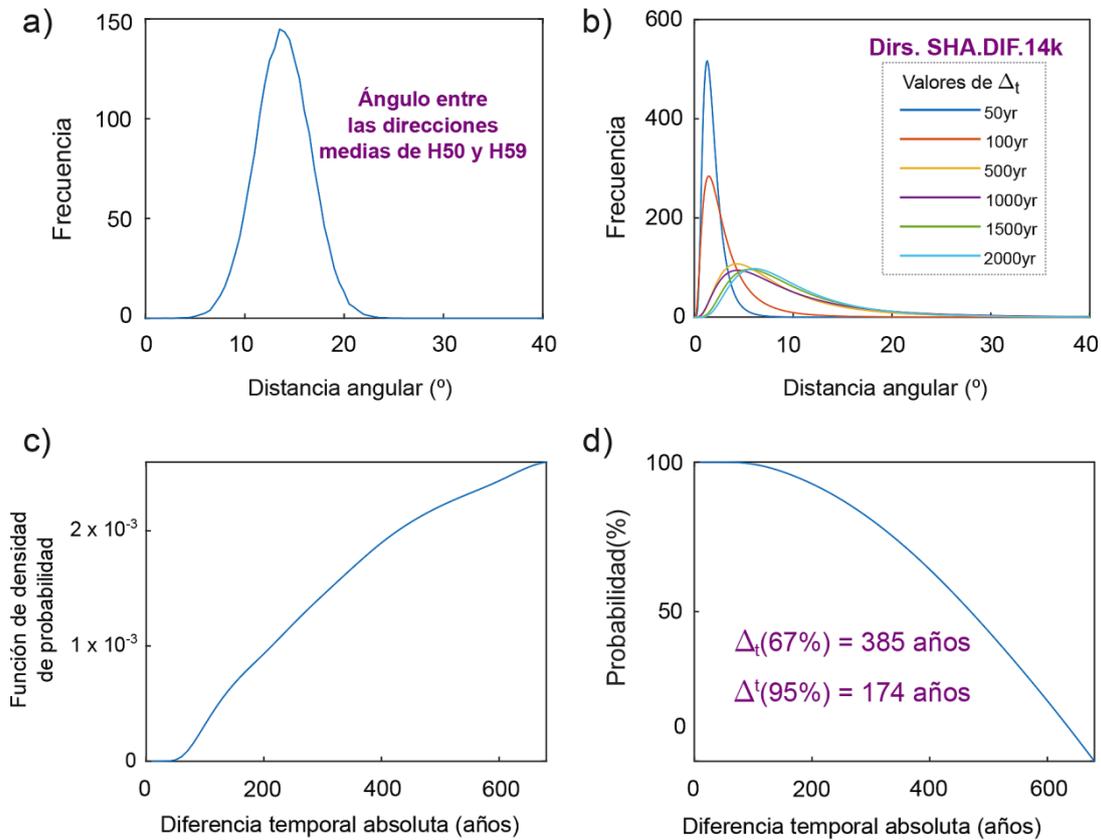


Fig. 6.15. Ejemplo de los pasos llevados a cabo para la estimación del tiempo mínimo transcurrido entre dos direcciones medias (en este caso, H50 y H59) utilizando los datos del modelo SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014): (a) función de densidad de probabilidad de la diferencia angular entre las direcciones estudiadas calculada mediante el método de *bootstrap*; (b) función de densidad de probabilidad de la dirección del campo magnético terrestre separada por distintos intervalos Δt años calculada mediante el método de *bootstrap*; (c) función de densidad de probabilidad combinada de la distancia angular entre H50 y H59 y de la diferencia angular en la dirección del campo magnético terrestre para los distintos Δt , tomando sólo los valores hasta alcanzar un primer máximo; (d) gráfico representado en el panel (c) pero expresado en probabilidad acumulada. Nota: el muestreo aleatorio *bootstrap* en todos los casos anteriores se ha hecho usando 10^6 iteraciones.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

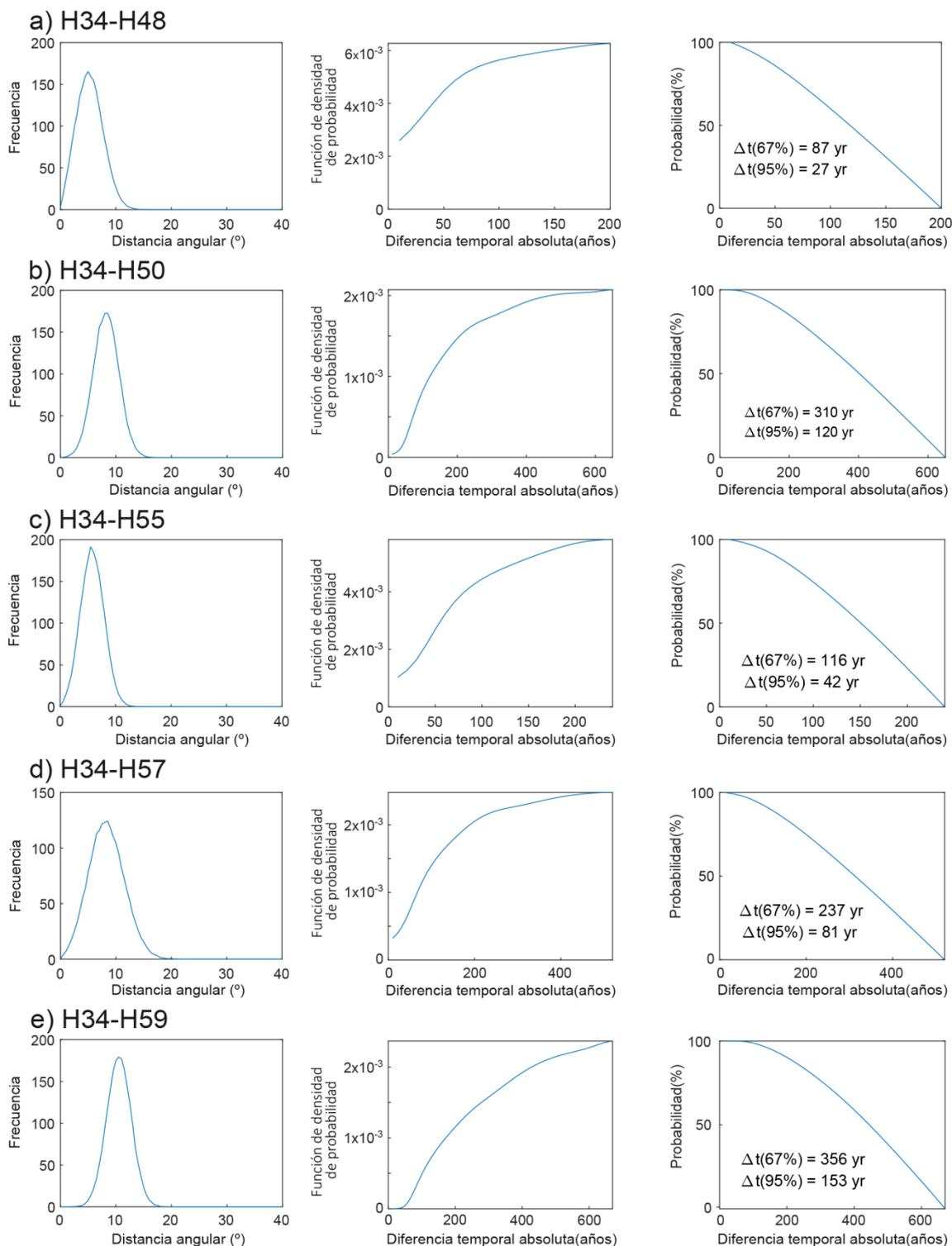


Fig. 6.16. Resultados de los cálculos para la estimación del tiempo mínimo transcurrido entre direcciones medias de estructuras de El Salt utilizando el modelo SHA.DIF.14k, (Pavón-Carrasco et al., 2014): (a) H34-H48; (b) H34-H50; (c) H34-H55; (d) H34-H57; (e) H34-H59).

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

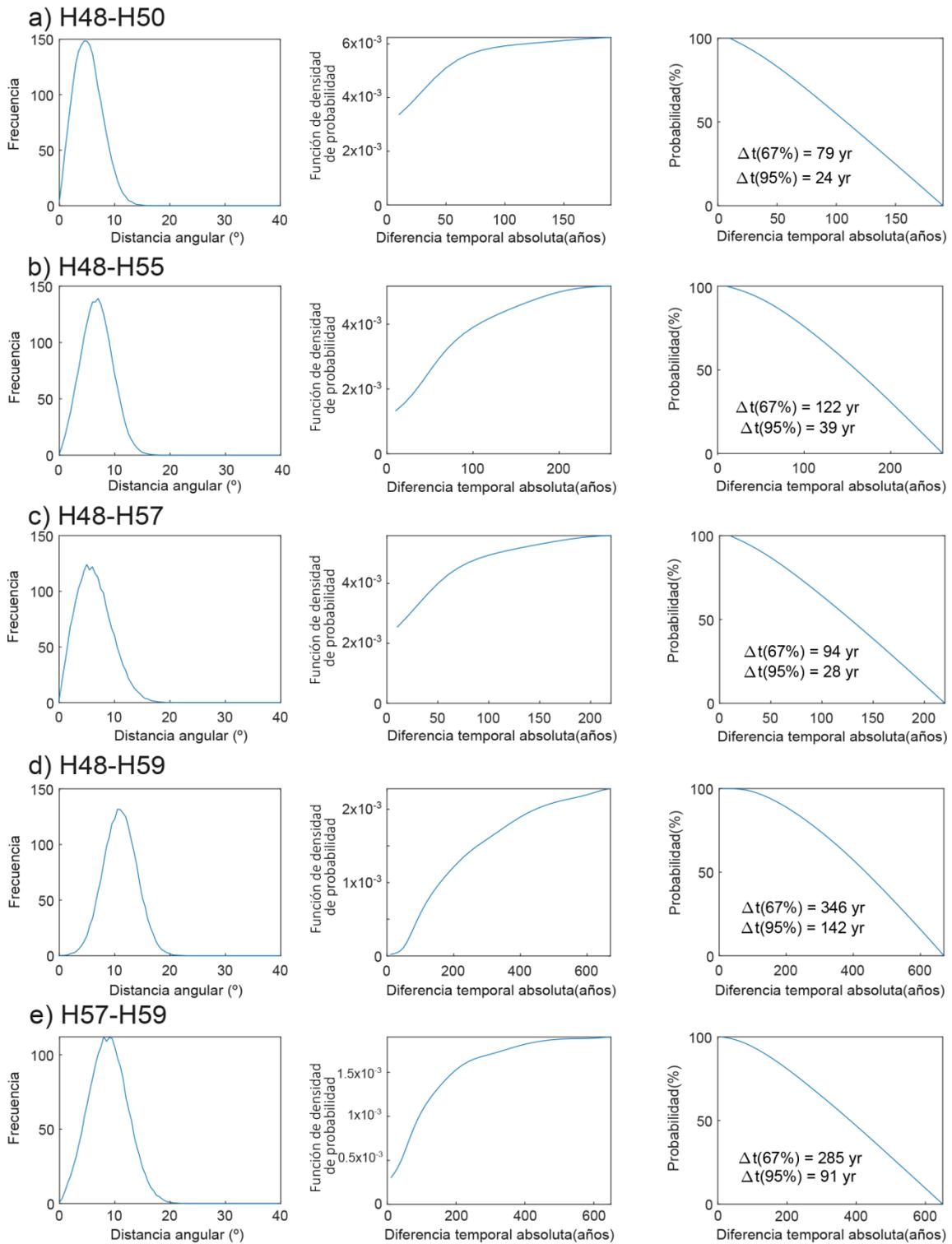


Fig. 6.17. Resultados de los cálculos para la estimación del tiempo transcurrido entre direcciones medias de estructuras de El Salt utilizando el modelo SHA.DIF.14k, (Pavón-Carrasco et al., 2014): (a) H48-H50; (b) H48-H55; (c) H48-H57; (d) H48-H59; (e) H57-H59.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

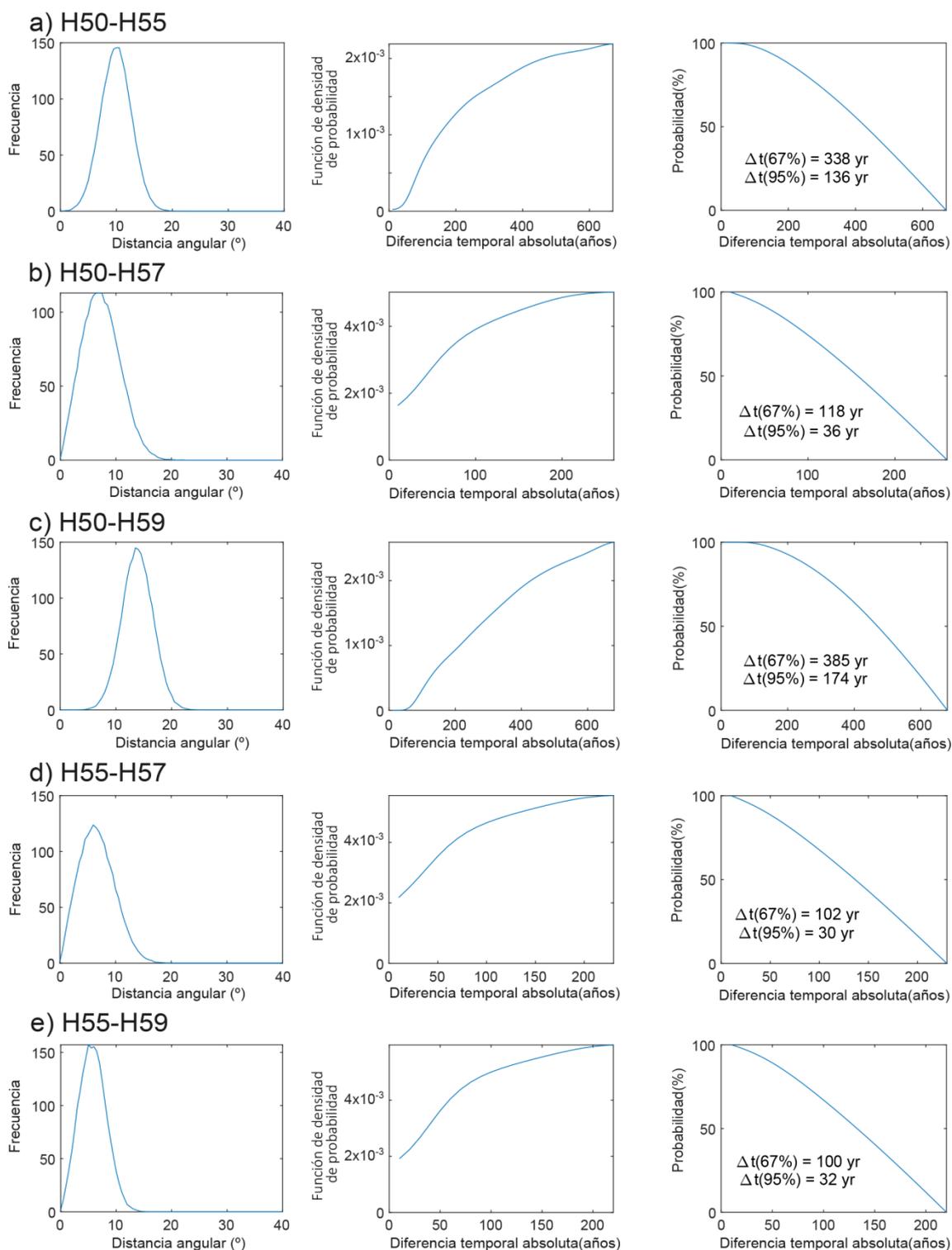


Fig. 6.18. Resultados de los cálculos para la estimación del tiempo transcurrido entre direcciones medias de estructuras de El Salt utilizando el modelo SHA.DIF.14k, (Pavón-Carrasco et al., 2014): (a) H50-H55; (b) H50-H57; (c) H50-H59; (d) H55-H57; (e) H55-H59.

6.4. Discusión

6.4.1. Las diferencias en el registro arqueomagnético en las distintas facies quemadas

Como ya se ha comentado en epígrafes anteriores, aunque ambas facies tienen un origen pirogénico, los procesos de formación de las cenizas y las capas negras son bastante diferentes. Mientras que las cenizas son los restos de combustible calcinado, la capa negra es el resultado del calentamiento del sustrato rico en materia orgánica vegetal sobre el que se realiza el fuego, produciéndose una combustión incompleta de dicha materia orgánica (Leierer et al., 2019; Mallol et al., 2013b). De esto se infiere que la magnitud del impacto térmico experimentado y la composición de los materiales parentales a partir de los cuales se forman estas facies son claramente diferentes. Como cabe esperar, y al igual que se observó en los resultados de los materiales experimentales descritos en el capítulo 5, existen diferencias en el comportamiento magnético en función de las facies. A continuación se discuten las principales observaciones realizadas.

En primer lugar, existen diferencias en las propiedades magnéticas. La concentración de minerales ferromagnéticos (*s.l.*) es uno de los parámetros en los que esto se puede apreciar. Puesto que la mineralogía magnética predominante es similar en todas las facies (minerales de baja coercitividad, magnetita básicamente), se puede interpretar la IRM como un parámetro de concentración. Las cenizas presentan la mayor concentración, seguidas por las capas negras y el sedimento no quemado respectivamente.

También existen diferencias en cuanto a la estabilidad térmica de las distintas facies. Las cenizas presentan una alta reversibilidad en las curvas termomagnéticas. Esta alta estabilidad térmica sugiere que alcanzaron altas temperaturas durante la quema (muy probablemente, mayores de 700° C, que es la máxima temperatura aplicada en el laboratorio). Las capas negras presentan, sin embargo, un comportamiento muy distinto. Cuando son calentadas en el laboratorio, se detecta una importante neoformación de magnetita. Si durante la quema hubiese alcanzado temperaturas tan altas como las del experimento (700° C), sería esperable que esta transformación ya hubiera tenido lugar y no se observara ahora. Por ello se interpreta que las capas negras experimentaron temperaturas claramente menores de 700° C. Comportamientos similares han sido observados también en facies de episodios de combustión antrópicos del Holoceno (Carrancho et al., 2016a) y en los resultados de las estructuras experimentales mostrados en el capítulo 5. La presencia predominante de termorremanencias parciales (pTRMs) en la mayoría de los especímenes orientados que contienen capa negra también apoya esta hipótesis. Las temperaturas máximas de desbloqueo de las pTRMs (300-500° C) sugieren que las

capas negras no superaron los 500° C. Esto es coherente con lo descrito en el capítulo 5, así como con los resultados obtenidos a partir de los estudios de micromorfología de suelos y biomarcadores llevados a cabo sobre varias estructuras de la unidad Xb - incluidas H50, H55 y H57- (Leierer et al., 2019).

Teniendo en cuenta que la capa negra consiste en el sustrato sobre el que se realiza el fuego, que resulta afectado por el calor (Leierer et al., 2019; Mallol et al., 2013b), el comportamiento observado en las curvas termomagnéticas de los materiales no quemados resulta en cierto modo inesperado. Cuando realizamos curvas termomagnéticas sobre muestras de capa negra se genera una importante cantidad de magnetita (que se traduce en un aumento de la magnetización al final del experimento respecto a los valores iniciales), mientras que en las curvas termomagnéticas de sustrato no quemado no se observa tal transformación. Si asumimos que el sustrato sin quemar que se ha muestreado presenta las mismas características que aquel sobre el que originalmente se realizó el fuego, cabría esperar también una importante neoformación de magnetita en las curvas termomagnéticas del sustrato no quemado. Pero éste no es el caso. Por ello, se interpreta que existe algún tipo de diferencia entre la composición de las muestras de sustrato no quemado estudiadas y la del sustrato original sobre el que se hizo el fuego y que dio lugar a la capa negra. Esta afirmación concuerda con los resultados de Mallol et al. (2013b) y Leierer et al. (2019), quienes estudiaron estructuras de combustión experimentales y estructuras arqueológicas de la unidad X de El Salt y observaron que, aunque la composición litológica de las capas negras y de las muestras de control no quemado era similar, en las capas negras hay mayor presencia de los componentes orgánicos vegetales. Esta mayor presencia de materia orgánica en las capas negras puede explicar que en ellas se observe la generación de magnetita al realizar las curvas termomagnéticas y no ocurra lo mismo en el sustrato sin quemar. Todo esto puede relacionarse, en última instancia, con los procesos que intervienen en la generación de la capa negra, pues en algunos trabajos se ha sugerido que bajo ciertas condiciones, la materia orgánica quemada puede presentar mejores condiciones de preservación (p. ej.: Braadbaart y Poole, 2008; Jambrina-Enríquez et al., 2018; Leierer et al., 2019). En el caso de los suelos quemados, aunque hay comportamientos variables, puede existir también un aumento de la cantidad de materia orgánica debido a la inclusión de raíces y otros elementos de árboles y arbustos afectados por el fuego, a la liberación de nutrientes de las cenizas que permiten que se desarrolle vegetación rápidamente, o al efecto esterilizante del fuego que hace que se reduzca la actividad microbiana, lo cual ralentiza la degradación de los nuevos aportes (Knicker, 2007). Por tanto, puede que el sustrato sobre el que se realizó el fuego (a partir del cual se generó la capa negra) y aquel del que se tomó muestra no quemada en la actualidad tuvieran en origen una cantidad similar de materia orgánica, pero que ésta no haya llegado hasta nuestros días en las muestras sin quemar debido a la ausencia de impacto térmico.

Además de las diferencias en las propiedades magnéticas, se han detectado algunos comportamientos distintos entre facies en el registro direccional. Las cenizas de H50 (único caso en el que se pudieron obtener especímenes orientados que contuvieran exclusivamente esta facies) muestran un aplanamiento o infraestimación de la inclinación que no se observa en las capas negras (Fig. 6.9c). Se interpreta que este fenómeno se relaciona directamente con la naturaleza volátil de las cenizas, más propensas a removerse, frente a la de las capas negras, que se han formado a partir de un sustrato previamente compactado y menos fácil de remover. Este comportamiento no se puede extrapolar a todas las cenizas, pues consiste en la observación de un único caso con la particularidad además de que es un hogar con una espesa capa negra. De hecho, otros análisis direccionales sobre cenizas no han mostrado inclinaciones especialmente bajas, pero se trata de contextos diferentes (Carrancho et al., 2013). En cualquier caso, conviene tener en cuenta esta posibilidad cuando se trabaje en contextos similares al aquí estudiado.

6.4.2. El comportamiento de las curvas termomagnéticas de los materiales no quemados a baja temperatura

Existe una cuestión que, aunque es secundaria respecto a los objetivos de este capítulo, merece la pena ser comentada. En los materiales no quemados se ha detectado un comportamiento difícil de explicar. Hacia 200° C se observa un aumento (un pequeño pico) de la magnetización durante el calentamiento seguido de una inflexión hacia 250°C, ambos inexistentes al enfriar (Fig. 6.5e-f). La explicación a este fenómeno es compleja.

La caída o inflexión hacia 250 °C podría explicarse por la conversión de magnetita en hematites. Esto es coherente con la caída observada hacia 200-300 °C en la susceptibilidad (Fig. 6.6). El hecho de que no se reduzca el valor de magnetización en el enfriamiento de las curvas termomagnéticas se podría explicar por la formación de magnetita secundaria adicional. Sin embargo, no se puede explicar con estos argumentos el aumento de magnetización previo hacia 200 °C.

Una hipótesis que podría explicar este fenómeno la encontramos en el trabajo de Day (1975), que observó picos similares en titanomagnetitas sintéticas. Según su interpretación, como sus muestras no se encontraban saturadas al iniciar el experimento y el campo aplicado durante su realización tampoco era suficiente para lograrlo, estos picos son el resultado de la alineación de los granos ferromagnéticos a favor del campo aplicado a medida que se iban desbloqueando por el aumento de la temperatura. En el caso de los materiales de El Salt, se impartió un campo de aproximadamente 1 T a la muestra inmediatamente antes de comenzar el calentamiento. Teniendo en cuenta que predominan los minerales de baja coercitividad, cabría esperar que se alcanzara la saturación y estos picos no se

observaran. Por lo tanto, parece que esta hipótesis no explica el comportamiento comentado.

Otra hipótesis para explicar este pico es la presencia de algún otro mineral aparte de la magnetita. La inflexión que sigue al pequeño aumento de magnetización puede recordar a la fase HCSTL (por sus siglas en inglés: *high coercivity stable low temperature phase*) observada por McIntosh et al. (2007) en materiales arqueológicos quemados e identificada como ϵ -Fe₂O₃ por López-Sánchez et al. (2017). Esta fase se caracteriza por presentar bajas temperaturas de desbloqueo ($\leq 200^\circ\text{C}$), muy alta coercitividad ($B_{CR} > 600\text{ mT}$) y estabilidad termomagnética. Sin embargo, los materiales no quemados de El Salt no presentan la esperable forma de cintura de avispa en los ciclos de histéresis, la inflexión en las curvas termomagnéticas aparece a temperaturas algo más altas que las propuestas, y además la fase no se detecta en la curva de enfriamiento (Fig. 6.5e-f). Esta falta de reversibilidad en las curvas sugiere la existencia de algún mineral que no es térmicamente estable y se transforma a bajas temperaturas. Los datos de susceptibilidad magnética medida tras cada paso de desmagnetización térmica de especímenes orientados no quemados muestran una caída de los valores hasta $200\text{-}300^\circ\text{C}$ para después experimentar un incremento progresivo hasta el final; sin embargo, no se detecta el crecimiento esperable antes de o hacia 200°C (Fig. 6.6).

Otro posible causante de este comportamiento podría ser la pirrotina hexagonal (Fe₉S₁₀), que presenta la llamada transición λ entre 200°C y 265°C , durante la cual se comporta como ferrimagnético. Puesto que en los demás rangos de temperatura se comporta como antiferromagnética, esta fase se refleja en forma de pico de aumento de la magnetización en las curvas termomagnéticas (Dunlop y Özdemir, 1997 y referencias incluidas en ese texto). Pero no se ve la caída hacia $300\text{-}325^\circ\text{C}$ esperable para su temperatura de Curie. Además, aunque existen casos en los que la pirrotina sigue presente incluso después del calentamiento (Torres-López et al., 2014; Villalaín et al., 2014), generalmente se altera a altas temperaturas. Esto conllevaría curvas de enfriamiento irreversibles. La alta reversibilidad de las curvas aquí mostradas no es coherente con esta explicación. Y en el caso de que existiera pirrotina que se preservara después del calentamiento, se debería de observar la inflexión debida a su temperatura de Curie, cosa que no ocurre en las muestras de El Salt.

La greigita (Fe₃S₄), por su parte, suele presentar durante el calentamiento un cambio en la pendiente hacia $200\text{-}300^\circ\text{C}$. A este le sigue una importante disminución de la magnetización (que llega a un mínimo hacia $320\text{-}460^\circ\text{C}$), para acto seguido mostrar un aumento de la magnetización de magnitud variable al que le sigue otra caída hacia 580°C , debido a la oxidación de este mineral para formar magnetita (Roberts et al., 2011 y referencias recogidas en ese texto). Las curvas termomagnéticas son irreversibles y sólo se ve la magnetita al enfriar. En los casos en

los que coexiste magnetita y greigita o aparece greigita oxidada, aunque aparece la inflexión hacia 200-300° C, el descenso que lo sigue no es tan marcado ni se detecta el posterior aumento de la magnetización (Roberts et al., 2011). Una vez más, la curva de enfriamiento no sería reversible. Y es que, cuando la greigita es calentada a temperaturas mayores de 280° C (Roberts et al., 2011 y referencias incluidas en ese texto) se altera. Puesto que las curvas termomagnéticas de los materiales no quemados de El Salt son altamente reversibles (con la única salvedad del pico hacia 200° C durante el calentamiento), no parece que la presencia de greigita pueda explicar el comportamiento observado.

Se plantea una última hipótesis. El pico de aumento de magnetización observado hacia 200° C podría corresponder a la alteración de algún mineral pre-existente a partir del cual se genera otro con mayor magnetización. Ahora bien, para que la magnetización final tras el enfriamiento sea tan similar a la inicial, a más altas temperaturas se habrían de producir otras transformaciones que transformaran esa fase. Sin embargo, no se han identificado minerales que puedan responder a este comportamiento.

Por ahora no se ha podido dar una explicación definitiva a este fenómeno, pero esta tarea escapa de los objetivos de la presente tesis. Experimentos adicionales en el futuro podrán ayudar a comprender este comportamiento.

6.4.3. La estabilidad del registro direccional

Las muestras de cenizas de H50 muestran una gran estabilidad direccional y detecta una única componente (excluyendo los pasos de posible influencia viscosa) que se interpreta como una termorremanencia (TRM) o quizás una posible remanencia termoquímica (TCRM).

En las muestras que no son de ceniza pura, el principal mecanismo de magnetización es la termorremanencia parcial (pTRM). En ocasiones la ChRM muestra temperaturas máximas de desbloqueo algo bajas (hasta 300° C). Estas temperaturas tan bajas pueden llevar a dudar sobre la posible influencia viscosa que podrían tener los pasos tomados para calcular la ChRM o si incluso podrían ser una componente puramente viscosa, pero hay varios argumentos que hacen pensar que no es el caso:

- (1) Tanto los materiales experimentales presentados en el capítulo 5 como los análisis de otras disciplinas sugieren que las capas negras no suelen superar los 500° C. Además, existe una variabilidad de transmisión del calor lateralmente y en profundidad en este tipo de estructuras. Por tanto,

es factible que aparezcan pTRMs con temperaturas máximas de desbloqueo como las observadas (300-500° C).

- (2) Según los cálculos teóricos para magnetita monodominio (Pullaiah et al., 1975; Walton, 1980), para edades del orden de magnitud de 10^4 años (la unidad X tiene en torno a 55.000 años), los granos que podrían ser portadores de una componente viscosa de esa duración se desbloquean hasta 200-250 °C. En todos los casos, se han evitado los pasos por debajo de 200° C para aislar la ChRM.
- (3) Por otro lado, hay casos en los que la componente ChRM se aísla hasta temperaturas altas (hasta 500° C) y sus direcciones son coherentes con las que tienen temperaturas máximas de desbloqueo más bajas, por lo que parece que efectivamente se está tomando el registro del último calentamiento.
- (4) En 3 de los 4 los especímenes no quemados (Fig. 6.8a) parece que existe influencia viscosa por debajo de 150 °C. En el cuarto caso, se detecta una componente con temperatura de desbloqueo (T_{UB}) máxima de 250° C (NQ1 en la Fig. 6.8b), que podría ser de origen viscoso. Para tomar los bloques no quemados se tuvo especial cautela para evitar muestrear zonas con alteración térmica (había hogares próximos), aunque también se intentó que procedieran de un área no demasiado alejada de aquélla donde aparecían las estructuras de combustión para que el sustrato fuera similar. No es lo más probable, pero quizás este espécimen podría estar afectado por impacto térmico vinculado a alguna estructura cercana. En cualquier caso, se trata del comportamiento de un único espécimen.

Entre los especímenes que no son de ceniza pura, hay casos en los que la diferencia direccional entre la ChRM y la componente B que aparece por encima es pequeña y se traduce en una pequeña desviación en el diagrama de desmagnetización a altas temperaturas (p. ej.: Fig. 6.9c). Esto no es extraño considerando que, tanto la formación de la unidad estratigráfica como la quema tuvieron lugar en una época de polaridad normal y las direcciones esperadas no deberían tener grandes diferencias angulares.

Las direcciones arqueomagnéticas medias muestran buena calidad (5 de las 6 estructuras tienen una k mayor de 100). A pesar de esos altos valores de k , en los casos de H48 y H57 conviene tener precaución a la hora de interpretar los resultados debido al bajo número de especímenes que se han podido tener en cuenta para calcular sus respectivas direcciones medias (hay que recordar que sólo se disponía de un único bloque de mano para cada una de estas estructuras).

Por otro lado, como se ha comentado previamente, se ha detectado el posible fenómeno de aplanamiento en la dirección paleomagnética (shallowing) en las cenizas de la estructura H50. Vidal-Matutano et al., (2017) sugirieron que existía algún tipo de alteración post-deposicional en esta estructura de combustión

basándose en el estado de los carbones. Leierer et al. (2019) detectaron evidencias de bioturbación en las cenizas de H50 y procesos mecánicos post-deposicionales que conllevaron la mezcla de las cenizas con sedimento subyacente. Sin embargo, el comportamiento magnético observado en las cenizas de H50 no concuerda con lo esperado para bioturbación o procesos mecánicos post-deposicionales que hayan generado la mezcla de las cenizas con otros materiales. En el capítulo 5 se ha sugerido la existencia de problemas de preservación en las cenizas de estructuras de combustión experimentales afectadas fundamentalmente por bioturbación, los cuales han sido asociados a un determinado comportamiento magnético. Las evidencias consistían en comportamientos heterogéneos en las curvas termomagnéticas, mostrando ejemplos tanto de alta reversibilidad como de irreversibilidad. En los resultados de propiedades magnéticas de las cenizas de H50 no se observa esto. Desafortunadamente, no se dispone de datos direccionales experimentales de cenizas afectadas por semejantes procesos, pero Carrancho et al. (2012) estudiaron un episodio de combustión holoceno de una secuencia de *fumiers* afectado por bioturbación (concretamente, por la presencia de una madriguera) y observaron que en la zona afectada los especímenes mostraban diagramas multicomponentes, valores bajos del Q_n y direcciones mucho más dispersas que las de los especímenes de la zona bien preservada. En H50 no se detectan patrones similares a estos. De hecho, la dispersión de la dirección de las cenizas ($k = 114.69$) es similar a la de capa negra de esa misma estructura ($k = 105.11$) (Fig. 6.10c). Por lo tanto, aunque en las zonas muestreadas para la realización de los análisis llevados a cabo por Vidal-Matutano et al. (2017) y Leierer et al. (2019) existan evidencias de bioturbación y procesos post-deposicionales mecánicos, el comportamiento direccional observado en nuestras muestras de ceniza de H50 no parece ser explicado por esos procesos. El aplanamiento aquí detectado es más coherente con algún tipo de proceso de compactación de las cenizas que no experimentara de igual manera la capa negra (cuyo origen es un sustrato previamente compactado). Las discrepancias con los datos de las otras disciplinas probablemente se relacionen con la zona concreta del hogar que se muestreó para cada una de ellas.

6.4.4. Implicaciones arqueológicas de la temporalización de ocupaciones de la unidad X

Los resultados obtenidos permiten establecer una estimación del tiempo mínimo que podría haber transcurrido entre el último uso de las distintas estructuras de combustión estudiadas. Se trata de datos muy valiosos puesto que la unidad X de El Salt engloba una cantidad importante de materiales a partir de los cuales se pueden inferir distintos comportamientos llevados a cabo por los grupos neandertales que ocuparon el yacimiento. Pero no se conoce en detalle el tiempo que se necesitó para generar estas acumulaciones. La importancia de esta información radica en que una

mayor o menor duración del tiempo durante el cual se acumularon tiene implicaciones a la hora de interpretar el significado socioeconómico e incluso evolutivo de los comportamientos que dieron lugar a estos depósitos.

Estudios previos realizados en la unidad X (Leierer et al., 2019; Machado et al., 2016; Machado y Pérez, 2016; Mallol et al., 2013b; Pérez et al., 2015) han logrado identificar eventos de ocupación o actividades puntuales diacrónicas, relacionadas con la talla lítica, el consumo de restos faunísticos y la realización de hogares. (Leierer et al., 2019) infirieron ocupaciones “cortas” (sin mayor especificación) en relación con 4 episodios de combustión superpuestos de la unidad Xb (H50, H53b, H53a, H52). Sin embargo, no ha sido posible aún determinar en términos cuantitativos el tiempo transcurrido entre este tipo de ocupaciones. Nuestros resultados son un aporte a la temporalización de las ocupaciones humanas asociadas a hogares.

A continuación, se discuten en detalle algunas cuestiones destacables de los resultados obtenidos. Para facilitar la explicación, recordamos que la Fig.4.17 (capítulo 4) muestra la relación estratigráfica propuesta para las estructuras de combustión aquí estudiadas, a partir de las observaciones arqueológicas. En primer lugar, cabe mencionar la relación entre H34 y H48. Según lo observado en el campo, H34 corresponde a la subunidad Xa y H48 a la subunidad Xb, por lo que sería esperable que tengan direcciones distinguibles. El test de media común del programa *Pmagpy* permite rechazar la hipótesis de media común para H34 y H48 (Tabla 6.2). Además, si observamos la estimación temporal a partir del modelo SHA.DIF.14k (Fig. 6.16a), se puede ver que a un 100% de probabilidad se puede rechazar que la diferencia angular entre sus direcciones sea de 0 años. Por lo tanto, la hipótesis planteada en el campo de que son diacrónicas, se confirma.

Por otro lado, la diferencia temporal mínima que podría explicar la distancia angular entre la media de H34 y H50 (120 años, con una confianza del 95%), entre H34 y H55 (42 años), entre H34 y H57 (81 años) y entre H34 y H59 (153 años) es mayor que la diferencia temporal mínima que podría explicar la distancia entre las direcciones medias de H34 y H48 (27 años). Aunque hablamos de un tiempo mínimo y la diferencia real podría ser esa o más, *a priori* esto es coherente con lo observado durante la excavación, a partir de lo cual se propuso que H48 se encontraba estratigráficamente por debajo de H34 y por encima de H50, H55, H57 y H59 (véase la Fig. 4.17 del capítulo 4).

Respecto a la relación que presenta H48 respecto a H50, H55, H57 y H59, los test estadísticos no permiten rechazar la hipótesis de media común entre H48 y todos esos fuegos, con la única excepción de H59 (además, solamente según uno de los test; Tabla 6.2). Sin embargo, las estimaciones temporales a partir del modelo geomagnético SHA.DIF.14k sí que permiten diferenciar H48 de H50, H48 de H55 y H48 de H57 (se puede rechazar con un 100% de probabilidad que las distancias angulares en esas combinaciones se puedan explicar con una diferencia temporal de 0 años). Cabe mencionar que, como era esperable a tenor de lo observado en los tests

estadísticos, la diferencia temporal mínima entre H48 y H59 al 95% de probabilidad (142 años) es mayor que para H48-H50 (24 años), H48-H55 (39 años), H48-H57 (28 años). Esto sugiere que los test estadísticos son bastante estrictos para poder considerar dos medias distinguibles.

Por último, los resultados obtenidos permiten evaluar si existe correlación estratigráfica entre H50, H55, H57 y H59. Los test estadísticos sugieren que H50 y H55 son registros diacrónicos, así como H50 y H59. En el caso de H57 y H59, sólo el test de McFadden y McElhinny (1990) apunta en esa dirección (Tabla 6.2). Para las demás combinaciones (H50-H57; H55-H57; H55-H59) las direcciones medias no son distinguibles según esos test, por lo que no se puede afirmar que sean diacrónicos. En cualquier caso, esto no implica que se trate de registros sincrónicos, puesto que existe cierta posibilidad de que el CMT repita direcciones a lo largo del tiempo. Si observamos los cálculos llevados a cabo a partir del modelo SHA.DIF.14k (Fig. 6.17e y Fig. 6.18a-e), esta información se puede matizar. Si consideramos un 95% de probabilidad, se puede ver que la diferencia temporal mínima para explicar la distancia angular de las combinaciones H50-H57, H55-H57 y H55-H59 es de al menos 30-40 años. Sin embargo, para H50-H55, H50-H59 y H57-H59, el tiempo mínimo ronda el siglo o incluso lo supera con creces. Esto nos lleva a pensar, en primer lugar, que es probable que estos hogares realmente correspondan a momentos más o menos separados en el tiempo. Por otro lado, esto, a su vez, indica que para que se formara el tramo de la subunidad Xb que contiene estos cuatro hogares tuvieron que pasar al menos varios siglos, pues el mayor valor de diferencia temporal mínima entre fuegos de esta subunidad (correspondiente a la combinación H50-H59; Fig. 6.18c) alcanza 174 años al 95% de probabilidad.

La información obtenida nos da idea del lapso de tiempo mínimo durante el cual existió actividad en la unidad X. Para evaluar si entre el último uso de unas y otras estructuras de combustión la actividad humana fue continua, si se trata de un evento de ocupación de larga duración o, por el contrario, son sucesivas ocupaciones de menor duración, o de si estas estructuras tienen relación cultural entre ellas, hemos de recurrir a los datos procedentes de otras disciplinas (remontajes líticos, estudios faunísticos, asociación de materias primas, proyecciones arqueostratigráficas, etc.).

Rodríguez-Cintas y Cabanes (2017) analizaron los fitolitos y estudiaron los sedimentos de la unidad Xb mediante espectroscopía infrarroja por Transformadas de Fourier (FTIR). Detectaron baja señal de actividad antrópica y sugirieron por ello que las estructuras de combustión se relacionaban con actividades efímeras que podrían corresponder a ocupaciones breves y esporádicas. Pero no podían descartar que, quizás el área estudiada no fuera la zona de mayor actividad del yacimiento.

Mediante el estudio del análisis espacial de las unidades de materia prima (o *Raw Material Units* por sus siglas en inglés; p. ej. distintos artefactos líticos que

proviene de un mismo bloque) y del registro zooarqueológico, Machado y Pérez (2016) consiguieron correlacionar dos unidades arqueostratigráficas (UAE) de la subunidad Xa (UAE 4.1 y 4e). Sin embargo, llegaron a la conclusión de que esas unidades a su vez englobaban distintas ocupaciones humanas, probablemente efímeras y separadas por períodos de tiempo que no superarían el rango de la estacionalidad. En otro estudio basado en el análisis de conjuntos líticos de varias UAEs de la unidad Xa, Machado et al. (2016) también sugirieron que las ocupaciones humanas habrían sido breves. Posteriormente, Pérez et al. (2020) estudiaron la fauna de 12 UAEs de la subunidad Xa, dentro de las cuales llegaron a identificar algunas actividades de corta duración e interpretaron que el yacimiento se ocupó repetida y efímeramente. Para esta misma subunidad, Mayor et al. (2020) ha propuesto nuevas unidades analíticas dentro de algunas UAEs, basándose en el análisis estratigráfico de la relación espacial entre las unidades de materia prima y los hogares, así como también teniendo en cuenta los taxones faunísticos representados. Puesto que existían estructuras sedimentarias que reflejaban hiatos entre las UAEs, pero no las había entre las nuevas unidades analíticas que proponen internamente (dentro de las UAEs), sugirieron que existieron ocupaciones recurrentes y separadas por períodos de abandono.

Leierer et al. (2019) estudiaron múltiples estructuras de combustión de la unidad Xb mediante micromorfología de suelos y biomarcadores (química orgánica). Observaron que para un grupo de estructuras superpuestas unas sobre otras, las capas negras estaban compuestas por materiales geogénicos y pedogénicos. Por ello, sugirieron que entre los episodios de combustión no existió ocupación humana, lo cual permitió que se formaran las superficies vegetadas y con excrementos de herbívoros que posteriormente serían quemadas y darían lugar a las capas negras. Teniendo en cuenta que eran cuatro las estructuras superpuestas, propusieron que para la subunidad Xb al menos existieron cuatro momentos de ocupación de bajo impacto separados por una cantidad de tiempo desconocida, pero suficiente para generar un suelo rico en materia orgánica. Además, también apuntaron que las ocupaciones no fueron de largo período, aunque no llegan a cuantificarlas. Previamente, (Mallol et al., 2013b) también propusieron el abandono del yacimiento mientras se formaba el sustrato que posteriormente daría origen a las capas negras de la unidad Xa cuando se realizaran los hogares.

Los resultados que aquí se han presentado son compatibles con la hipótesis de ocupaciones efímeras (corta duración), separadas por períodos de abandono de duración indeterminada, aunque es cierto que se pueden proponer algunos matices. En algunos casos se detectan diferencias temporales mínimas de hasta al menos 174 años (a un 95% de probabilidad) entre fuegos de una misma subunidad. Esto puede ser coherente con la hipótesis comentada. Pero, hay otros casos en los que las diferencias temporales mínimas al 95% de probabilidad son bastante bajas (<50 años). Esto no implica que sea exactamente ese el tiempo que haya pasado, pero es posible que esté en ese orden de magnitud. En estos casos, cabe la posibilidad de que

se trate de eventos de ocupación recurrentes y más o menos cercanos en el tiempo. En cualquier caso, esto no puede ser confirmado porque (i) hablamos de un mínimo de años y (ii) las direcciones del CMT se pueden repetir a lo largo del tiempo, por lo que en realidad podrían estar incluso más separados en el tiempo que aquellos que presentan diferencias mínimas mayores. Sin embargo, estos resultados indican el tiempo mínimo necesario para la formación de los depósitos en los que se incluyen los materiales estudiados (al menos varios siglos).

El arqueomagnetismo aquí es un aporte metodológico asociado a los hogares, pero las ocupaciones humanas no sólo son los hogares. Por eso, el siguiente paso requiere cruzar estos datos con los de otras disciplinas para integrar e interpretar correctamente estas ocupaciones.

6.4.5. Una nueva metodología para el estudio de palimpsestos arqueológicos

El método presentado para la individualización y temporalización de ocupaciones en palimpsestos del Paleolítico medio supone una innovación en sí mismo y puede ser usado en otros contextos de cualquier cronología en los que existan problemáticas similares y en los que aparezcan estructuras de combustión. Sin embargo, antes de aplicarlo, conviene tener en cuenta varias cuestiones importantes.

En primer lugar, debido a las características de la variación secular, hay que recordar que mediante este método se puede detectar si dos registros son diacrónicos, pero no se puede afirmar que sean sincrónicos. (Carrancho et al., 2016b) sugirieron que algunos hogares del nivel O del Abric Romaní podrían corresponder a registros sincrónicos basándose en que las direcciones arqueomagnéticas no eran distinguibles y apoyándose en las evidencias arqueológicas. Sin embargo, la hipótesis de trabajo sólo permite trabajar en términos de diacronía (es decir, identificar si se trata de registros diacrónicos). Esto se debe fundamentalmente a que los cambios de la dirección del campo magnético terrestre relacionados con la variación secular pueden hacer que una misma dirección pueda repetirse en distintos momentos. Por tanto, si se obtienen dos direcciones arqueomagnéticas indistinguibles, no es posible saber si esos registros corresponden a un mismo momento o a dos momentos separados en el tiempo pero con dirección coincidente.

Por otro lado, conviene recordar que las estimaciones temporales presentadas no se han realizado a partir de una curva detallada de variación secular que corresponda a la época de formación de la unidad X de El Salt (hace ~50.000 años), puesto que no existe ninguna que llegue hasta época tan antigua con suficiente resolución. No obstante, se puede asumir que el comportamiento general de la variación secular (amplitud y velocidad de cambio) era similar al de los tiempos más

recientes que abarca el modelo geomagnético SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014). Recientemente se ha publicado el modelo GGF100k (Panovska et al., 2018), que cubre los últimos 100.000 años, elaborado a partir de datos procedentes fundamentalmente de secuencias sedimentarias (con las implicaciones que eso tiene en términos de calidad del registro paleomagnético), aunque también incluye datos obtenidos a partir de materiales arqueológicos y volcánicos. El GGF100k, a diferencia del SHA.DIF.14k, sí incluye el período en el que se formó la unidad X, pero para los momentos más antiguos los materiales sedimentarios tienen más peso y los errores de las dataciones pueden ser mayores, por lo que la incertidumbre también puede ser mayor. Sin embargo, el GG100k resulta útil para realizar una aproximación a las tendencias generales de la variación secular en la época que nos interesa y evaluar si su comportamiento se corresponde a un período estable, comparable al de la actualidad. Aunque la excursión de Laschamp, datada en torno ~40.000 años antes del presente (Guillou et al., 2004; Nowaczyk et al., 2012; Plenier et al., 2007), está relativamente cerca, no se observan comportamientos anómalos que no respondan a los cambios típicos de la variación secular en momentos de estabilidad (Fig. 6.19). Korte et al. (2019) han estudiado el período que va desde hace 50.000 hasta hace 30.000 años con el fin de evaluar las dinámicas de las excursiones de Laschamp y Mono Lake y han corroborado que el período entre hace 50.000 y hace 43.000 años es una época estable en la que domina el dipolo axial. Por tanto, podemos asumir que las características de la variación secular en el momento en que se formó la unidad X de El Salt serían comparables a las actuales. En general, para la aplicación del método es necesario tener en cuenta previamente este aspecto, evaluando si para la edad de los materiales de estudio el CMT tiene una configuración estable.

Al margen de estas consideraciones, el método representa una contribución inédita y muy importante para aislar y temporalizar ocupaciones humanas en contextos arqueológicos tan complejos como son los palimpsestos paleolíticos con registros de hogares asociados.

6. Temporalización de ocupaciones neandertales en palimpsestos del Paleolítico medio

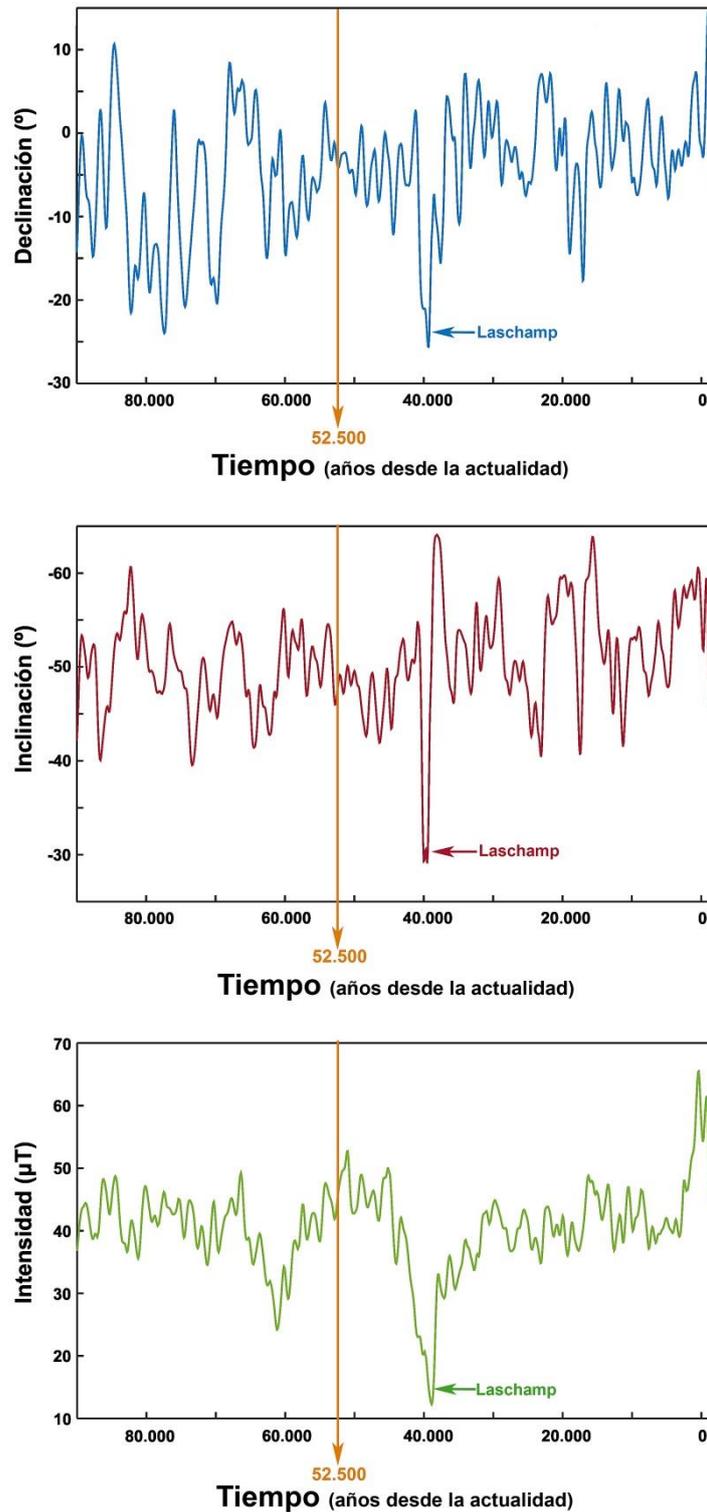


Fig. 6.19. Variación secular para los últimos ~100.000 años estimada a partir del modelo GGF100k (Panovska et al., 2018) relocalizado a las coordenadas de El Salt: (a) declinación, (b) inclinación, (c) intensidad. La línea naranja marca la edad aproximada de la unidad X de El Salt (la datación recogida en Galván et al. (2014b) es 52.3 +/- 4.6 ka BP). Se muestra también la excursión de Laschamp.

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

7.1. Conjunto P2A

7.2. Conjunto P2B

7.3. Discusión

7.3.1. Mineralogía magnética

7.3.2. Evidencias de posibles materiales quemados en los conjuntos P2A y P2B



La identificación de materiales quemados en el registro arqueológico no siempre es una tarea sencilla. En ocasiones, las evidencias del fuego son bastante claras en el campo. Cuando encontramos, por ejemplo, la recurrente secuencia estratigráfica de facies de cenizas a techo y un sustrato termoalterado subyacente (generalmente, en forma de capa negra (Mallol et al., 2013b) en aquellos sitios en donde hay abundancia de materia orgánica, aunque también puede presentar otras apariencias, como la rubefacción), parece bastante claro que nos encontramos ante los restos de una estructura de combustión. Sin embargo, hay ocasiones en las que encontramos elementos que presentan características compatibles con el impacto térmico, pero que también podrían ser el resultado de otros procesos que no precisan de la existencia de fuego. Tal es el caso de los parches de coloraciones variables (rojizos, negruzcos, etc.) que a veces aparecen en los sedimentos de las secuencias arqueológicas y que despiertan dudas sobre su génesis (véase, p. ej., la recopilación y discusión de casos de Goldberg et al. (2017) y referencias incluidas en ese texto).

Debido a las implicaciones evolutivas que tiene el uso del fuego (p. ej.: Brown et al., 2009; Gowlett y Wrangham, 2013), la identificación de materiales quemados es especialmente importante en contextos antiguos como los paleolíticos. Es por ello que a lo largo de los años se han publicado numerosos trabajos que se sirven de técnicas muy variadas para este fin. Algunas de las técnicas utilizadas han sido la espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared spectroscopy*, FTIR) para evaluar el grado de alteración térmica en huesos y sedimentos (p. ej.: Berna et al., 2007; Walker et al., 2016), la espectroscopía de reflectancia difusa (Zhang et al., 2014), análisis elementales y difracción de rayos X (p. ej.: Walker et al., 2016; Zhong et al., 2014), termoluminiscencia (p. ej.: Walker et al., 2016), micromorfología de suelos (p. ej.: Goldberg et al., 2017), análisis moleculares e isotópicos (Jambrina-Enríquez et al., 2019), y también los análisis arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas (p. ej.: Herries, 2009; Morinaga et al., 1999; Urban et al., 2019; Zhang et al., 2014) entre otros.

Aunque los métodos magnéticos por sí mismos pueden no ser resolutivos para la detección de materiales quemados dependiendo de los contextos, aportan evidencias que, combinadas con otras técnicas, pueden corroborar la presencia de alteración térmica. A continuación se presentan los resultados de los análisis de propiedades magnéticas realizados sobre distintas facies de los perfiles 1 (conjunto P2B) y 2 (conjunto P2A) de las unidades IX-X de El Salt (Figs. 4.18 y 4.19 en el capítulo 4 y Anexo 3), donde se plantea la disyuntiva de si corresponden a facies termoalteradas.

7.1. Conjunto P2A

Los valores de la magnetización remanente natural (NRM) del conjunto P2A (perfil 2) oscilan entre 6.18×10^{-6} y $7.10 \times 10^{-5} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. Se observan dos picos de valores máximos correspondientes a P2A-8 y P2A-18 (Fig. 7.1). Se observa otro pico algo menor correspondiente a P2A-5 (Fig. 7.1). Por su parte, los valores de susceptibilidad magnética a temperatura ambiente abarcan un rango que va desde 2.71×10^{-7} hasta $1.58 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Se observa de nuevo un pico claro correspondiente a P2A-8 (Fig. 7.1). Los valores del ratio de Köenigsberger oscilan entre 0.4 y 1.76, y de las 18 muestras, 11 presentan valores iguales o mayores que 1 (P2A-1, P2A-2, P2A-4, P2A-6, P2A-7, P2A-12, P2A-13 y P2A-14 son las únicas que tienen $Q_n < 1$). El pico más destacable es P2A-18 (Fig. 7.1).

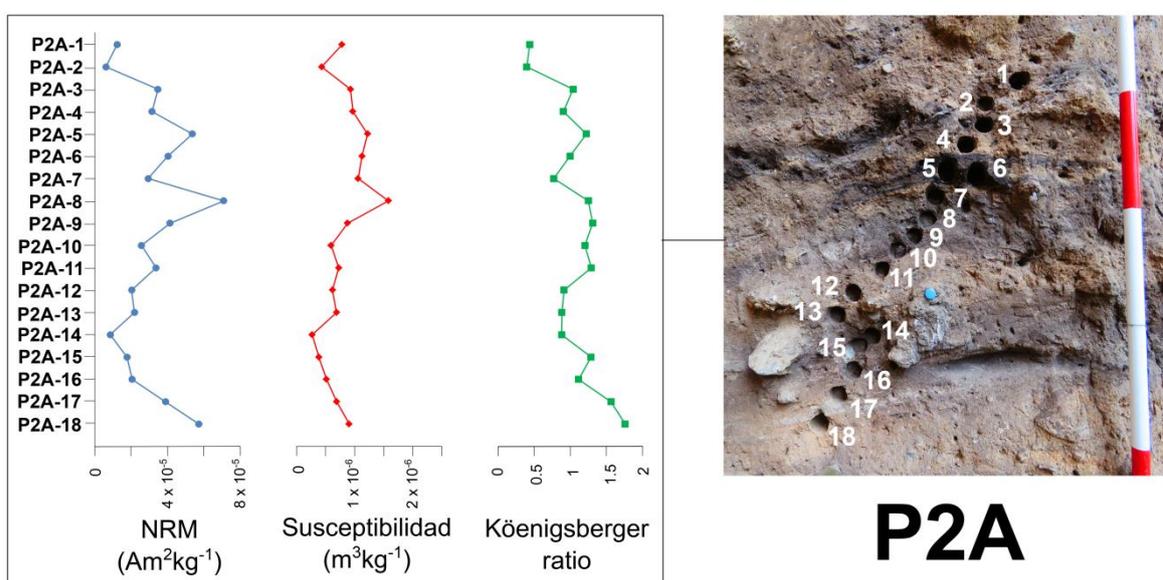


Fig. 7.1. Representación gráfica de la variación en profundidad de los valores de magnetización remanente natural (NRM), susceptibilidad magnética a temperatura ambiente y ratio de Köenigsberger para el conjunto P2A (Perfil 2, El Salt). Entre el primer espécimen y el último hay unos 35 cm aproximadamente.

La adquisición progresiva de la IRM muestra el predominio de minerales de baja coercitividad (Fig. 7.2). Sólo en P2A-3 se observa una posible contribución de alta coercitividad.

La mayor parte de las muestras presenta valores de magnetización similares una vez alcanzada la saturación. Sin embargo, P2A-6 y P2A-18 presentan valores mucho más altos que los demás especímenes. Por su parte, P2A-5 y P2A-15 presentan los valores más bajos.

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

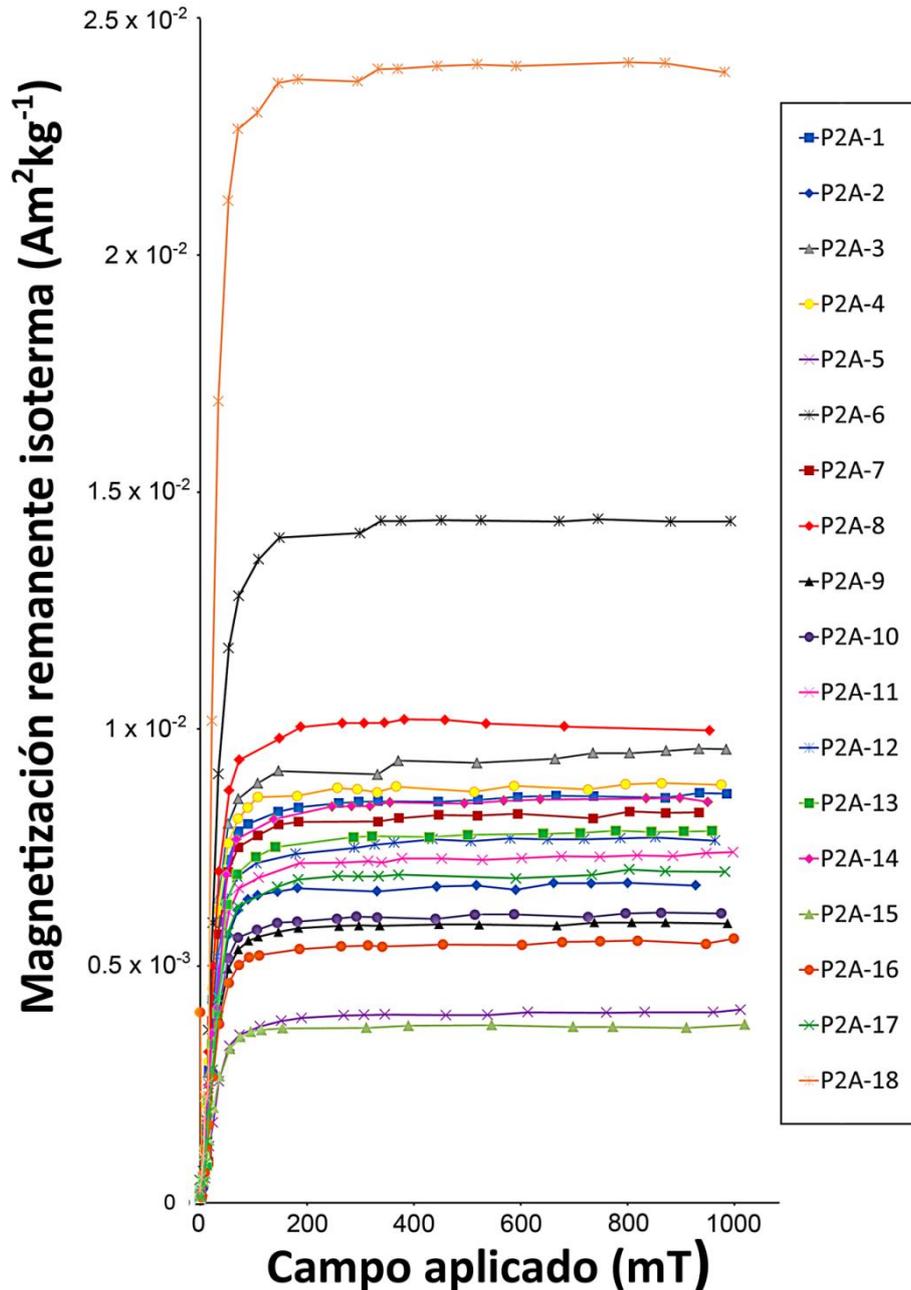


Fig. 7.2. Curvas de adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma de los especímenes del conjunto P2A.

En todas las curvas termomagnéticas se detecta la presencia de magnetita manifiesta porque la más clara inflexión de estas curvas se produce alrededor de la temperatura de Curie de este mineral (aproximadamente a 580°C, Fig. 7.3). Además, en la mayoría de ellas y en diferente grado se observa un pico de aumento de la magnetización o una cierta inflexión en la curva de calentamiento hacia 200° C, lo cual no se detecta en el enfriamiento. Este comportamiento recuerda al observado en los materiales no quemados de la unidad X de El Salt (capítulo 6). La diferencia es que aquí existe una visible diferencia en la morfología y en la magnitud de magnetización de la curva de enfriamiento respecto a la de calentamiento. En P2A-6 (Fig. 7.3f) se

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

observa además una caída clara hacia 300° C en el calentamiento. A la caída hacia 300° C le sigue inmediatamente un pico de incremento de magnetización. Ninguno de estos dos picos es visible en el enfriamiento. El comportamiento de esta muestra podría indicar la presencia de pirrotina en ella. Parece que podría haber cierta inflexión hacia 300° C también en la curva de calentamiento de P2A-5 (Fig. 7.3e; no se observa bien por la escala, pues al incremento de magnetización experimentado en el enfriamiento es muy grande). Sin embargo, en este último caso la caída no es clara y podría tratarse, en realidad, de un artefacto causado por la combinación de la curva generada por la presencia de magnetita con el pico de 200 °C.

En resumen, se pueden observar tres grandes patrones de comportamiento en las curvas termomagnéticas de las muestras del conjunto P2A, que tienen como elemento común la presencia de magnetita como principal portador de la magnetización:

- 1) Curvas altamente reversibles. El único caso de este tipo es P2A-18 (Fig. 7.3q).
- 2) Curvas irreversibles en las que, al enfriar la muestra, se produce una reducción de la magnetización. Este decrecimiento podría ser debido a la oxidación de la magnetita y formación secundaria de hematites a alta temperatura. En la mayoría de los casos se observa un pico de 200-250° C en la curva de calentamiento, aunque su magnitud es variable según la muestra que se observe. Siguen este patrón las muestras P2A-1 (Fig. 7.3a), P2A-2 (Fig. 7.3b), P2A-3 (Fig. 7.3c), P2A-4 (Fig. 7.3d), P2A-7 (Fig. 7.3g), P2A-8 (Fig. 7.3h), P2A-11 (Fig. 7.3.k), P2A-12 (Fig. 7.3l), P2A-13 (Fig. 7.3m), P2A-14 (Fig. 7.3n), P2A-15 (Fig. 7.3ñ), P2A-16 (Fig. 7.3o) y P2A-17 (Fig. 7.3p). Cabe mencionar que, aunque se ha incluido P2A-9 en esta categoría porque la curva de enfriamiento también va por debajo de la del calentamiento y su morfología es claramente diferente, su valor final de magnetización es similar al inicial (Fig. 7.3i).
- 3) Curvas irreversibles en las que, al enfriar la muestra, se produce un aumento de la magnetización. Se interpreta que el aumento se debe a la neoformación de magnetita. Aquí también aparece el pico en la curva de calentamiento hacia 200° C. Siguen este patrón las muestras P2A-5 (Fig. 7.3e), P2A-6 (Fig. 7.3f) y P2A-10 (Fig. 7.3j). En los casos de P2A-5 y P2A-6, como ya se ha comentado, aparece además una caída hacia 300° C. En P2A-6, a esta caída le sigue otro pico de incremento de la magnetización que alcanza un máximo hacia 350° C para luego volver a caer hasta llegar a la temperatura de Curie de la magnetita (580° C).

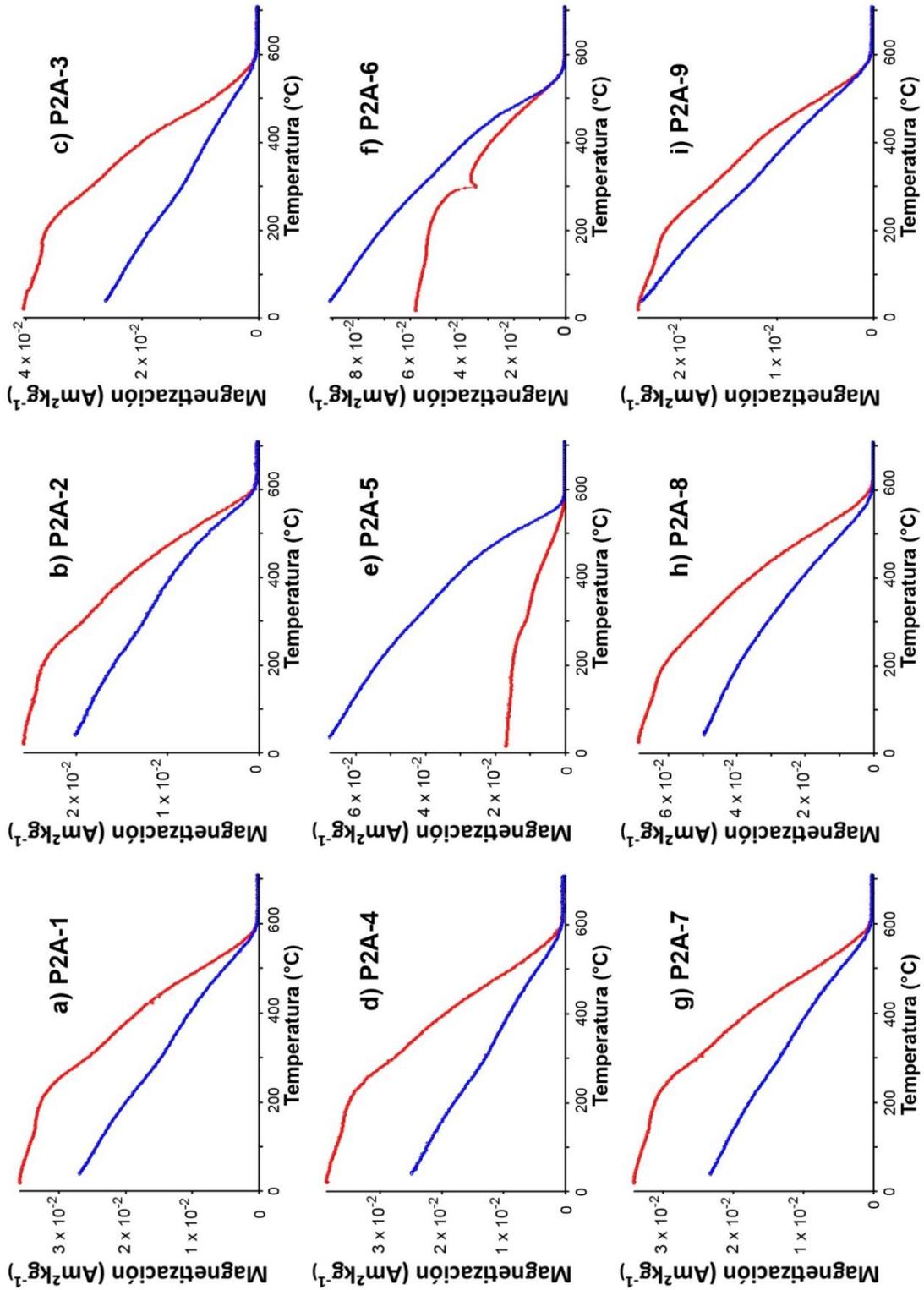
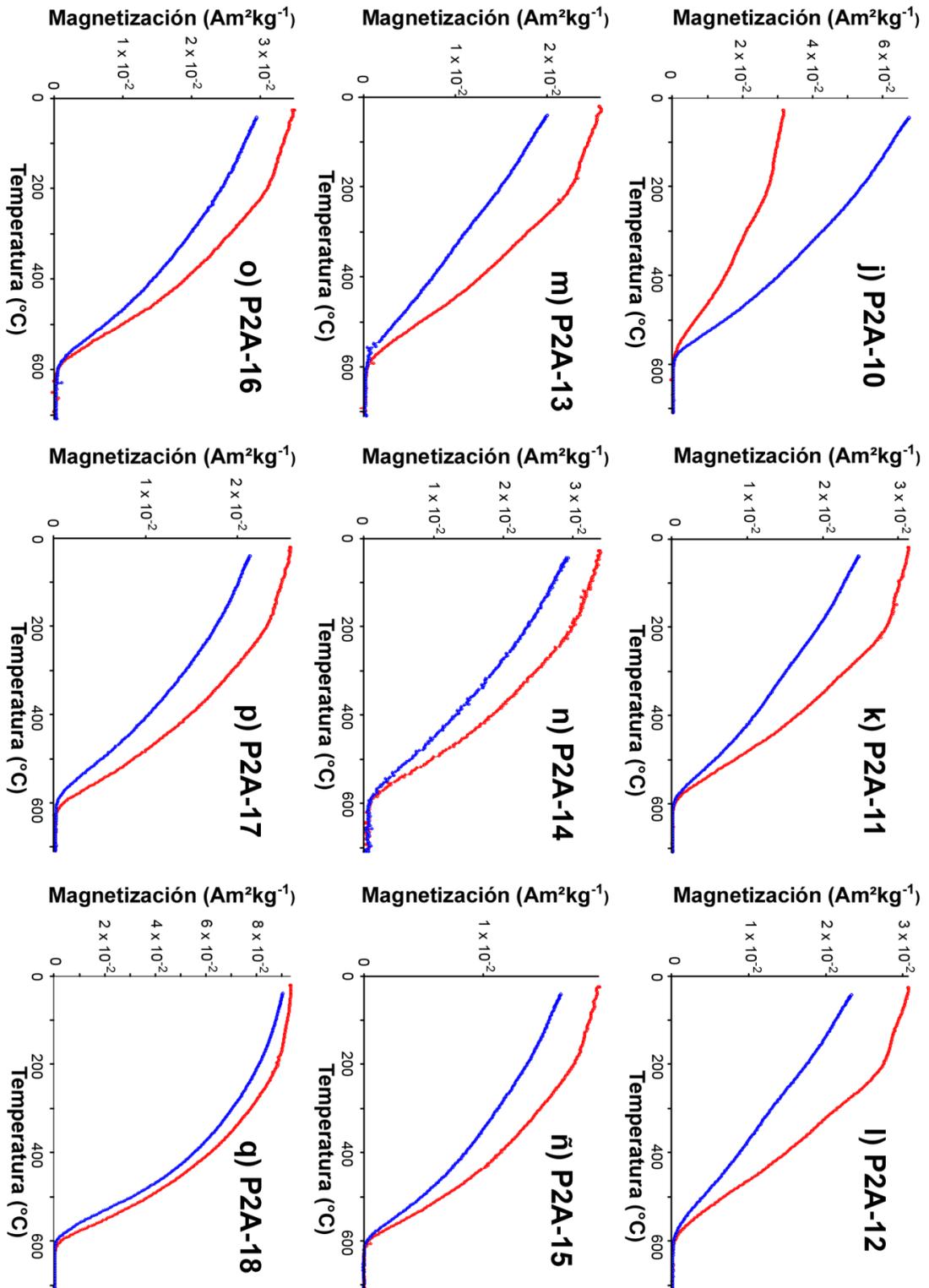


Fig. 7.3. Curvas termomagnéticas (magnetización vs. temperatura) de los especímenes P2A-1 a P2A-18.

[Continúa en la página siguiente]

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

[Continuación de la Fig. 7.3]



7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

Si se observa el diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002), todas las muestras del conjunto P2A quedan agrupadas en el área de comportamiento pseudo-monodominio (PSD) o de mezcla de monodominio con multidominio (SD+MD) (Fig. 7.4). No se detectan diferencias significativas entre muestras. Más bien, es llamativo el comportamiento tan homogéneo y el alto grado de agrupamiento de los parámetros magnéticos.

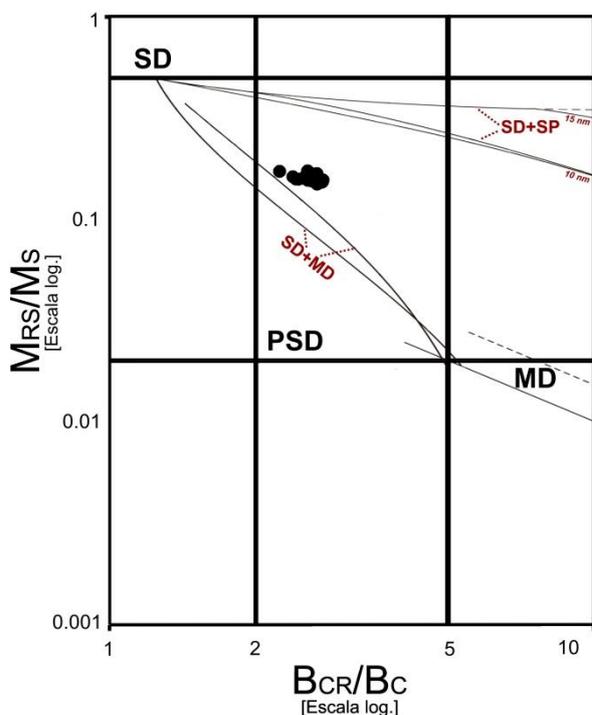


Fig. 7.4. Diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) con los resultados de todas las muestras del conjunto P2A. En el gráfico se indican las áreas de comportamiento mono-dominio (SD), pseudo-monodominio (PSD) y multidominio (MD), así como también las líneas teóricas de mezcla: monodominio + multidominio (SD+MD), monodominio + superpara-magnéticos (SD+SP) para magnetita establecidas por Dunlop (2002).

A partir del análisis de los diagramas de desmagnetización de la NRM por campos alternos de los especímenes orientados se ha observado que prácticamente toda la colección de P2A presenta una única componente entre 10-30 mT y 100 mT, con dirección norte, que se interpreta como la componente característica (comp. A en Fig. 7.5). Se interpreta que existe además una componente de origen viscoso (comp. V. en Fig. 7.5) que se aísla entre 4-6 y 8-25 mT y tiene dirección norte. Los pasos por debajo de 4-6 mT suelen aparecer considerablemente desviados y suelen presentar cierto solapamiento con el inicio de la componente viscosa que se acaba de definir. Se interpreta que este comportamiento a tan bajas coercitividades se debe al efecto de la viscosidad adquirida tras recoger los especímenes (desde que se tomaron en el campo hasta que se llevó a cabo la desmagnetización). El único espécimen que no sigue este patrón es P2A-2, que presenta un diagrama multicomponente, con solapamientos y poca estabilidad a partir de 15 mT (Fig. 7.5b). Sin embargo, la componente de origen viscoso (4-8 mT) parece que sigue presente. En todos los casos, hacia 10-12 mT ya se ha destruido el 50% de la magnetización (campo destructor medio).

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

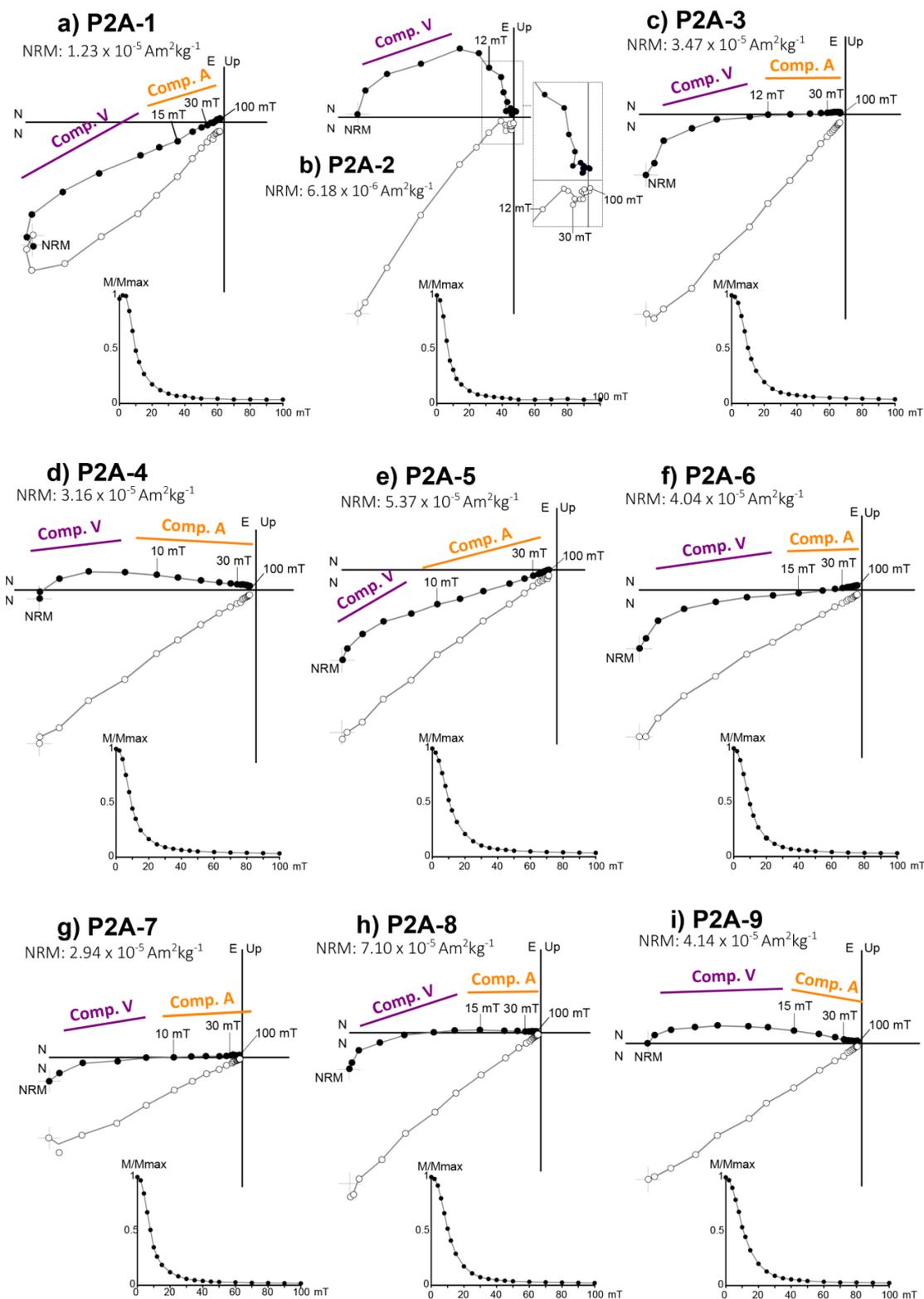
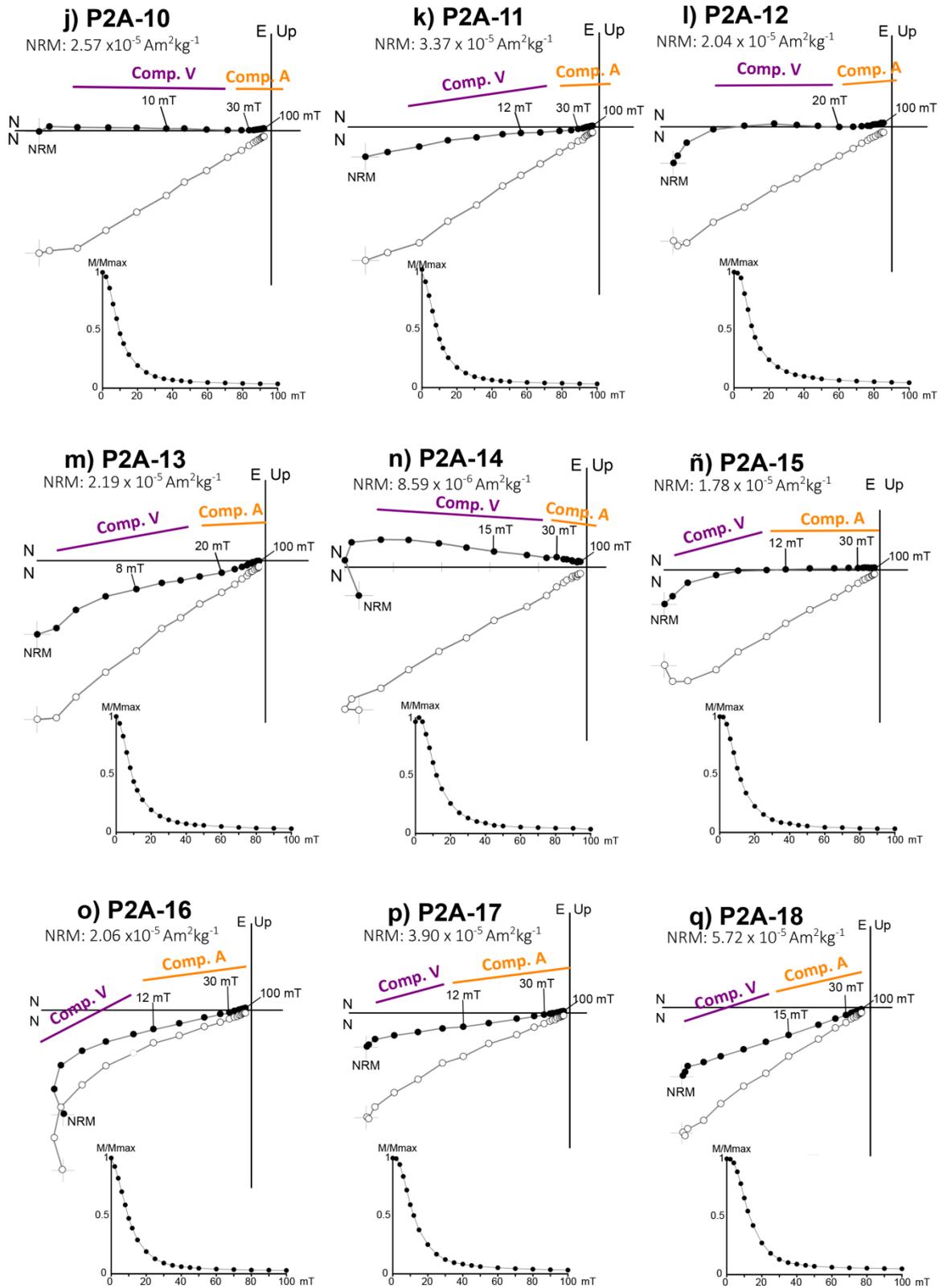


Fig. 7.5. Diagramas de desmagnetización de la NRM de los especímenes orientados del conjunto P2A. Los símbolos negros representan el plano horizontal y los blancos el vertical. Se muestran también las caídas de intensidad normalizadas. Comp. A = Componente característica; Comp. V. = Componente viscosa. (Continúa en la página siguiente)

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas



(Continuación de Fig. 7.5)

7.2. Conjunto P2B

Los valores de la NRM del conjunto de especímenes P2B (perfil 1) oscilan entre 1.04×10^{-5} y $4.07 \times 10^{-5} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. La NRM presenta aquí menos variaciones de las observadas en P2A, donde llegaba a apreciarse una diferencia de un orden de magnitud entre algunas muestras. No se detectan picos destacados, sino pequeñas oscilaciones con algunos valores algo mayores (P2B-4, P2B-6, P2B-9 y P2B-11, Fig. 7.6). La susceptibilidad magnética a temperatura ambiente oscila entre 4.23×10^{-7} y $1.95 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Los especímenes P2B-4 y P2B-8 presentan valores de susceptibilidad mayores que el resto (Fig. 7.6). Los valores del ratio de Königsberger van desde 0.36 hasta 1.55. De los 13 especímenes incluidos en este conjunto, sólo 4 (P2B-9, P2B-10, P2B-11 y P2B-12) presentan valores iguales o mayores que 1 (Fig. 7.6). Cabe destacar que los especímenes con mayores valores de susceptibilidad (P2B-4 y P2B-8) presentan los valores del ratio de Königsberger más bajos del conjunto.

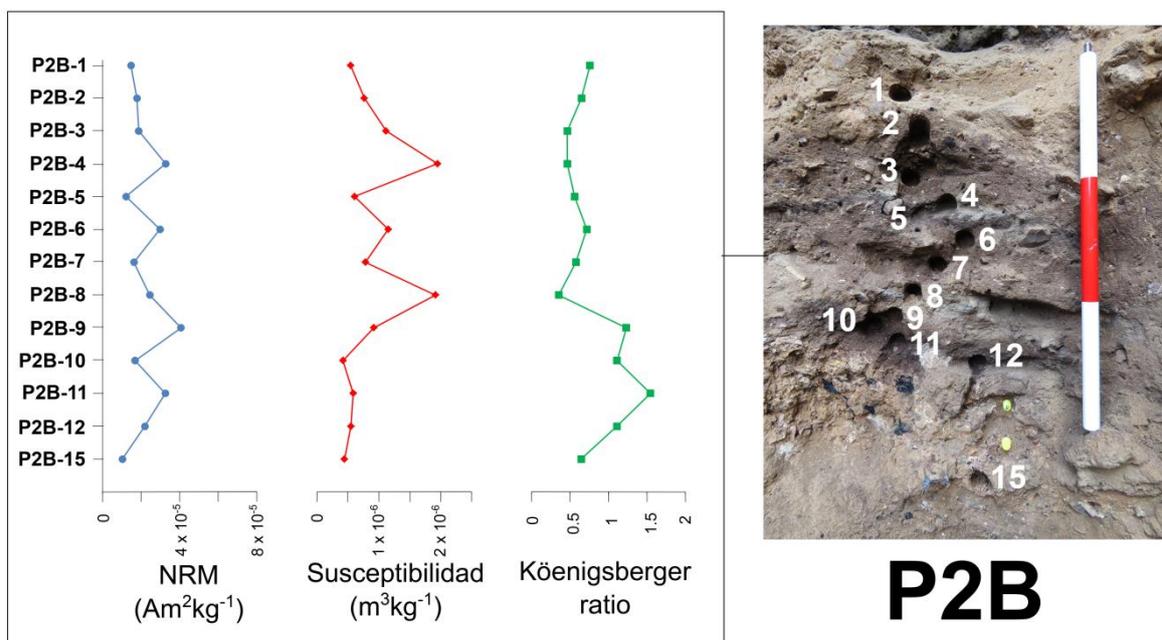


Fig. 7.6. Representación gráfica de la variación en profundidad de los valores de magnetización remanente natural (NRM), susceptibilidad magnética a temperatura ambiente y ratio de Königsberger para el conjunto P2B (Perfil 1 - El Salt). Entre el primer y el último espécimen hay unos 34 cm aproximadamente. No se muestran los datos de P2B-13 y P2B-14 porque no eran especímenes orientados.

En las curvas de adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM) se observa un predominio de los minerales de baja coercitividad (Fig. 7.7). Los valores de magnetización de saturación alcanzados presentan una variabilidad de aproximadamente un orden de magnitud. Hay una serie de muestras (P2B-1, P2B-10, P2B-11, P2B-12, P2B-13, P2B-14, P2B-15) que presentan valores

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

máximos de magnetización agrupados entre 4.8 y $5.9 \times 10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. El resto de muestras presenta más variabilidad, alcanzando valores máximos que oscilan entre 8.4×10^{-3} y $1.7 \times 10^{-2} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$. Dentro de este último grupo, P2B-8 y P2B-4 sobresalen con valores más altos. Considerando que el mineral predominante es la magnetita, esto se puede interpretar en términos de mayor concentración.

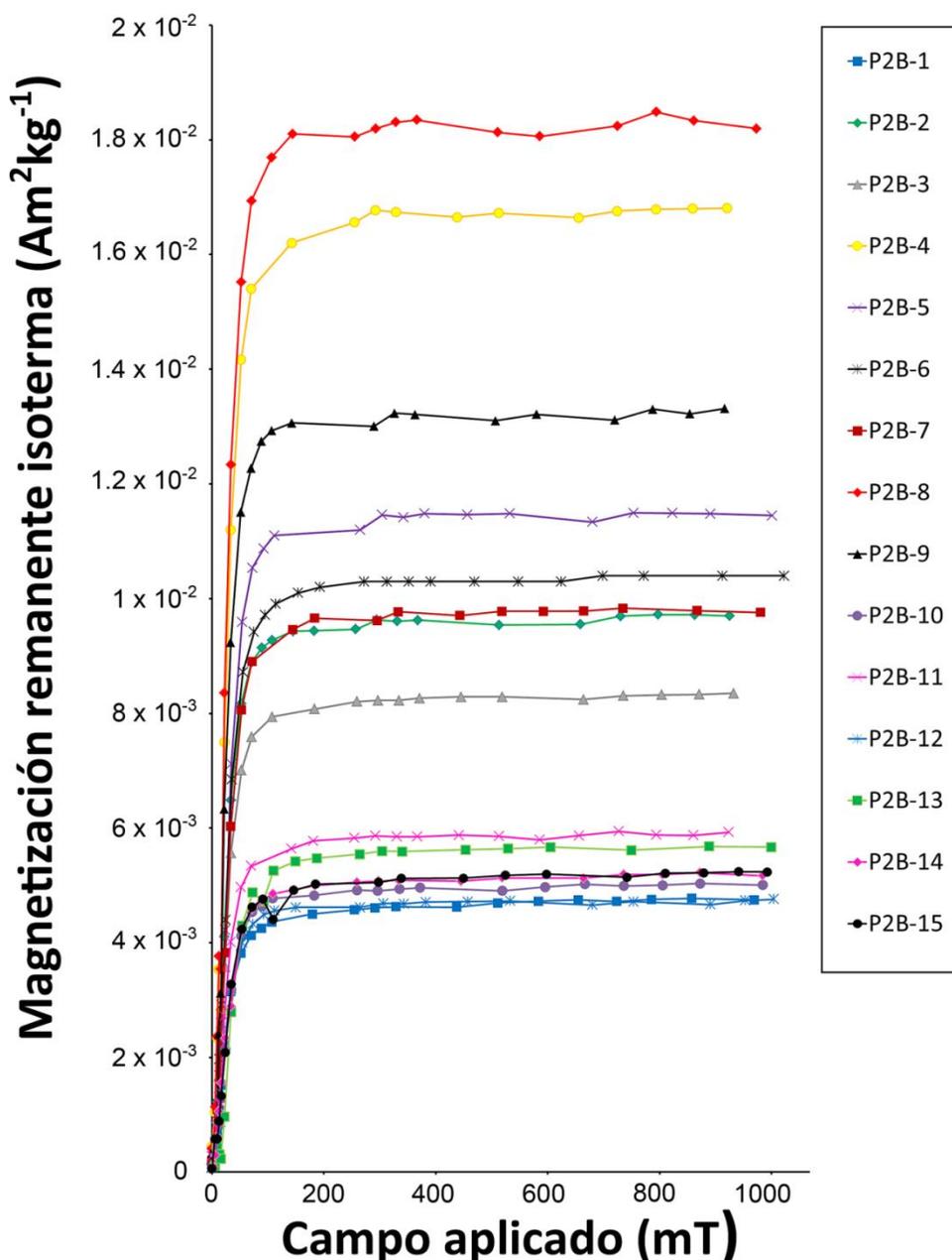


Fig. 7.7. Curvas de adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma de los especímenes del conjunto P2B.

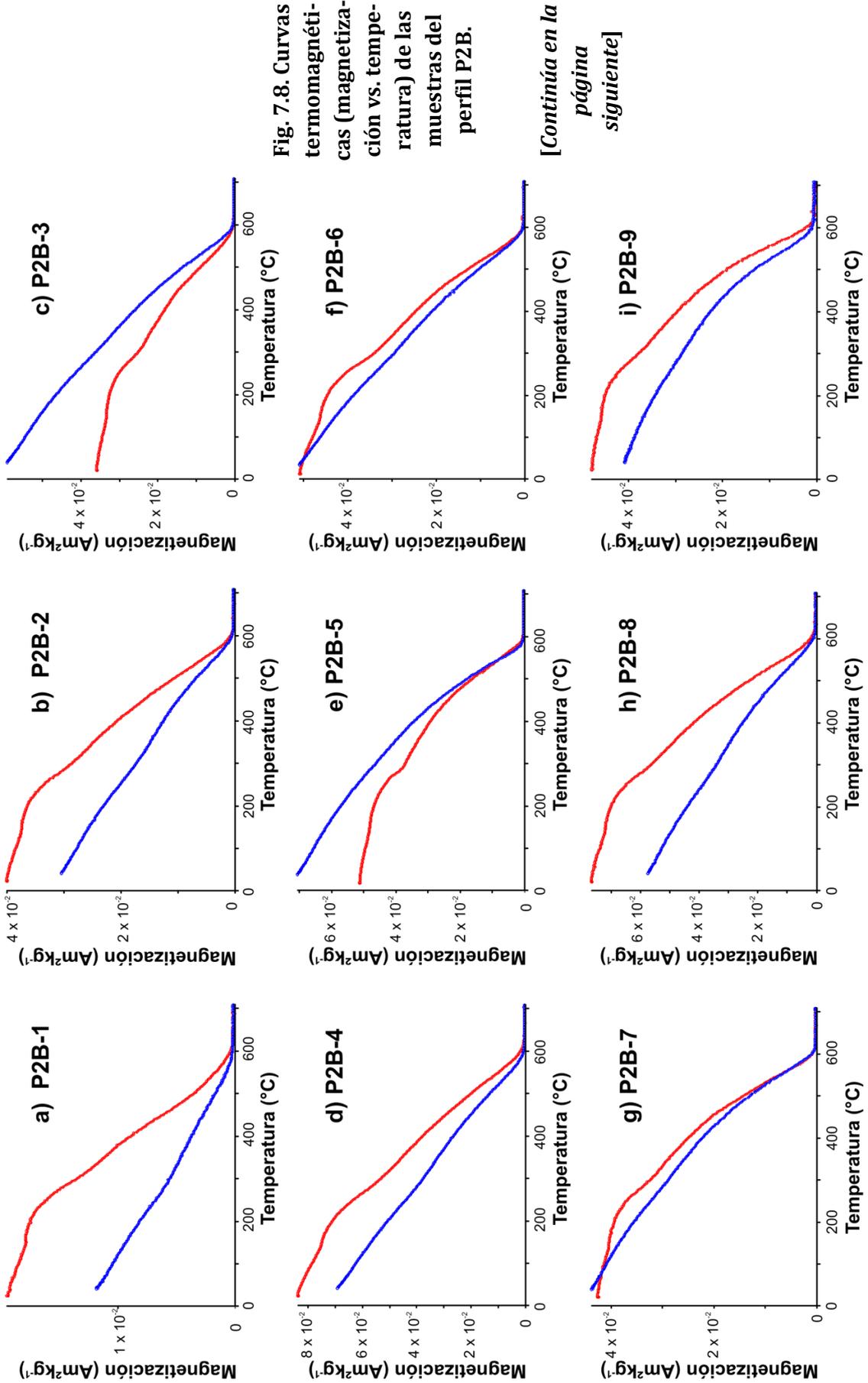
Al igual que ocurría en el conjunto P2A, en todas las muestras se detecta la presencia de magnetita (Fig. 7.8). También en todas las muestras se detecta el pico de aumento de magnetización (de mayor o menor magnitud según el espécimen

observado) hacia 200-250° C que se observó en muchas de las muestras del conjunto P2A. En P2B-5 (Fig. 7.8e), P2B-10 (Fig. 7.8j), P2B-11 (Fig. 7.8k), P2B-12 (Fig. 7.8l) y P2B-13 (Fig. 7.8m) parece que hay una caída hacia 300° C, aunque no se suele apreciar bien en los gráficos debido a la escala (el gran incremento de magnetización en las curvas de enfriamiento lo enmascara). Tal y como se dijo para P2A, esta aparente caída puede ser en realidad el efecto de la combinación de la curva generada por la magnetita más el pico hacia 200° C. En P2B-13 (Fig. 7.8m), además, se observa un aumento de la magnetización, que alcanza su máximo hacia 350° C, para después volver a caer hasta ~580° C.

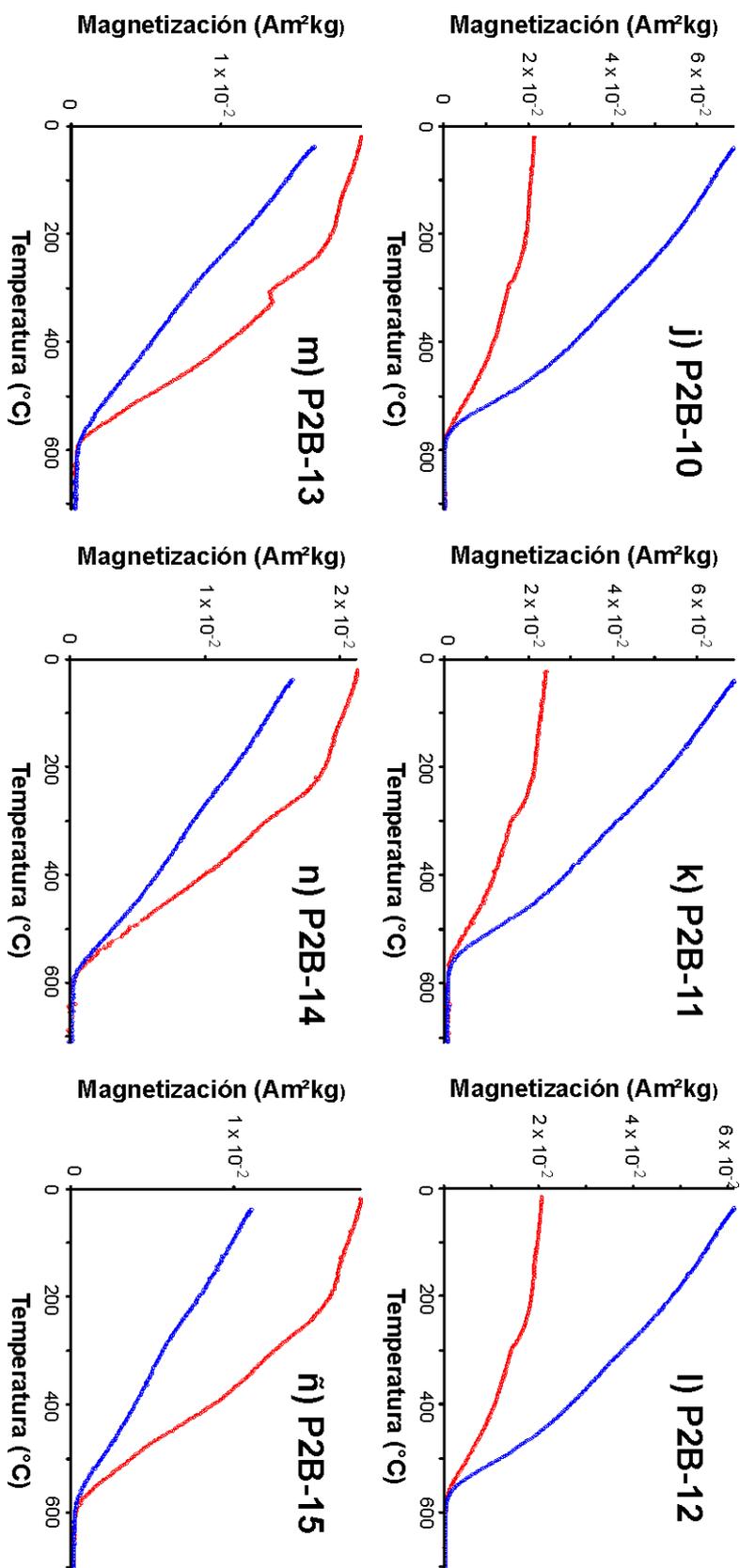
Basándonos en la reversibilidad de los ciclos de calentamiento/enfriamiento, los comportamientos observados en las curvas termomagnéticas del conjunto P2B se pueden resumir en tres tipos fundamentalmente, cuyo nexo común es, nuevamente, la presencia de magnetita como principal portador de la magnetización:

- 1) Curvas termomagnéticas en las que la morfología y la magnitud de la magnetización de la curva de enfriamiento no difieren mucho de las del calentamiento, salvo por el pico de 200° C al calentar. El valor de magnetización al final del experimento es muy similar al del inicio. Las muestras en las que se detecta este comportamiento son P2B-6 (Fig. 7.9f) y P2B-7 (Fig. 7.8g).
- 2) Curvas irreversibles en las que se observa una reducción de la magnetización al enfriar. Es el caso de P2B-1 (Fig. 7.8a), P2B-2 (Fig. 7.8b), P2B-4 (Fig. 7.8d), P2B-8 (Fig. 7.8h), P2B-9 (Fig. 7.8i), P2B-13 (Fig. 7.8m), P2B-14 (Fig. 7.8n) y P2B-15 (Fig. 7.8ñ). Se interpreta que la reducción en la magnetización en el enfriamiento se debe a la formación secundaria de hematites.
- 3) Curvas irreversibles en las que la magnitud de la magnetización en la curva del enfriamiento es mayor que la de calentamiento. Esto ocurre en P2B-3 (Fig. 7.8c), P2B-5 (Fig. 7.8e), P2B-10 (Fig. 7.8j), P2B-11 (Fig. 7.8k) y P2B-12 (Fig. 7.8l). Se interpreta que en estos casos hay formación secundaria de magnetita.

En el diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) se puede observar que todas las muestras se ubican en el área de comportamiento pseudo-monodominio (PSD) o de mezcla de monodominio con multidominio (SD+MD) (Fig. 7.9). No se detectan diferencias significativas entre muestras, observándose una alta homogeneidad en la granulometría ferromagnética al igual que en el conjunto P2A (Fig. 7.4). Además, el área en que se confinan todas las muestras el diagrama es coincidente para los dos grupos de muestras ($0,1 < M_{RS}/M_S < 0,2$; $2,1 < B_{CR}/B_C < 3,1$).



7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas



[Continuación de la Fig. 7.8]

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

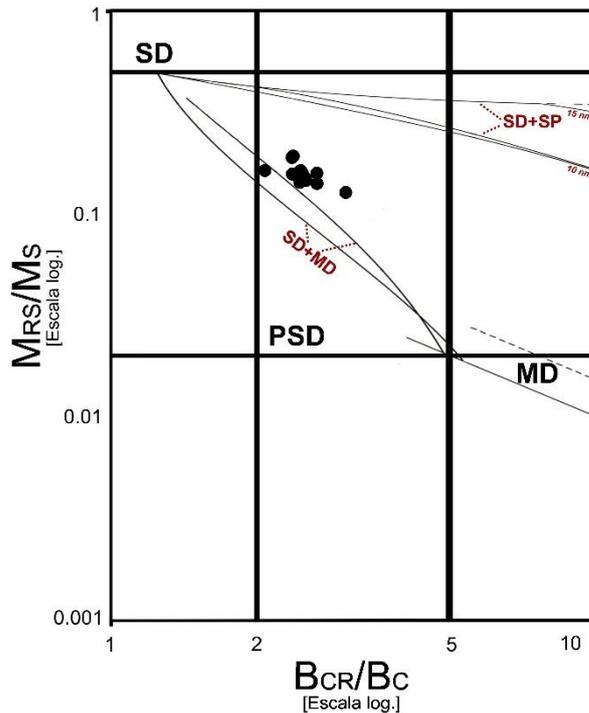


Fig. 7.9. Diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) con los resultados de todas las muestras del conjunto P2B. En el gráfico se indican las áreas de comportamiento monodominio (SD), pseudo-monodominio (PSD) y multidominio (MD), así como también las líneas teóricas de mezcla: monodominio + multidominio (SD+MD), monodominio + superparamagnéticos (SD+SP) establecidas por Dunlop (2002).

En cuanto a la desmagnetización de la NRM de los especímenes orientados del conjunto P2B, se han observado dos comportamientos.

- 1) Diagramas con una única componente interpretada como la característica (comp. A en la Fig. 7.10, aislada entre 10-30 y 45-100 mT), además de otra componente de origen viscoso (comp. V en la Fig. 7.10, aislada entre 2-6 y 8-20 mT). Al igual que ocurría en el conjunto P2A, se interpreta que los granos con coercitividad menor de 4 mT podrían estar afectados por la viscosidad adquirida entre el muestreo y el momento en que los especímenes fueron desmagnetizados. Se incluyen en este grupo los especímenes P2B-1 (Fig. 7.10^a), P2B-2 (Fig. 7.10b), P2B-5 (Fig. 7.10e), P2B-6 (Fig. 7.10f), P2B-7 (Fig. 7.10g), P2B-9 (Fig. 7.10i), P2B-10 (Fig. 7.10j), P2B-11 (Fig. 7.10k), P2B-12 (Fig. 7.10l) y P2B-15 (Fig. 7.10m). En algunos casos (p. ej. P2A-2, Fig. 7.10b), se observa una pequeña desviación en los últimos pasos de desmagnetización. No se puede determinar si realmente se trata de un componente o de algún artefacto relacionado con algún campo residual durante la desmagnetización o con el posible movimiento de los granos debido a la deshidratación. Sea como sea, se trata de una fracción muy pequeña de la NRM (<10%).
- 2) Diagramas con fuertes solapamientos que no permiten identificar y aislar con precisión las componentes existentes. Se incluyen en este grupo las muestras P2B-3 (Fig. 7.10c), P2B-4 (Fig. 7.10d) y P2B-8 (Fig. 7.10h).

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

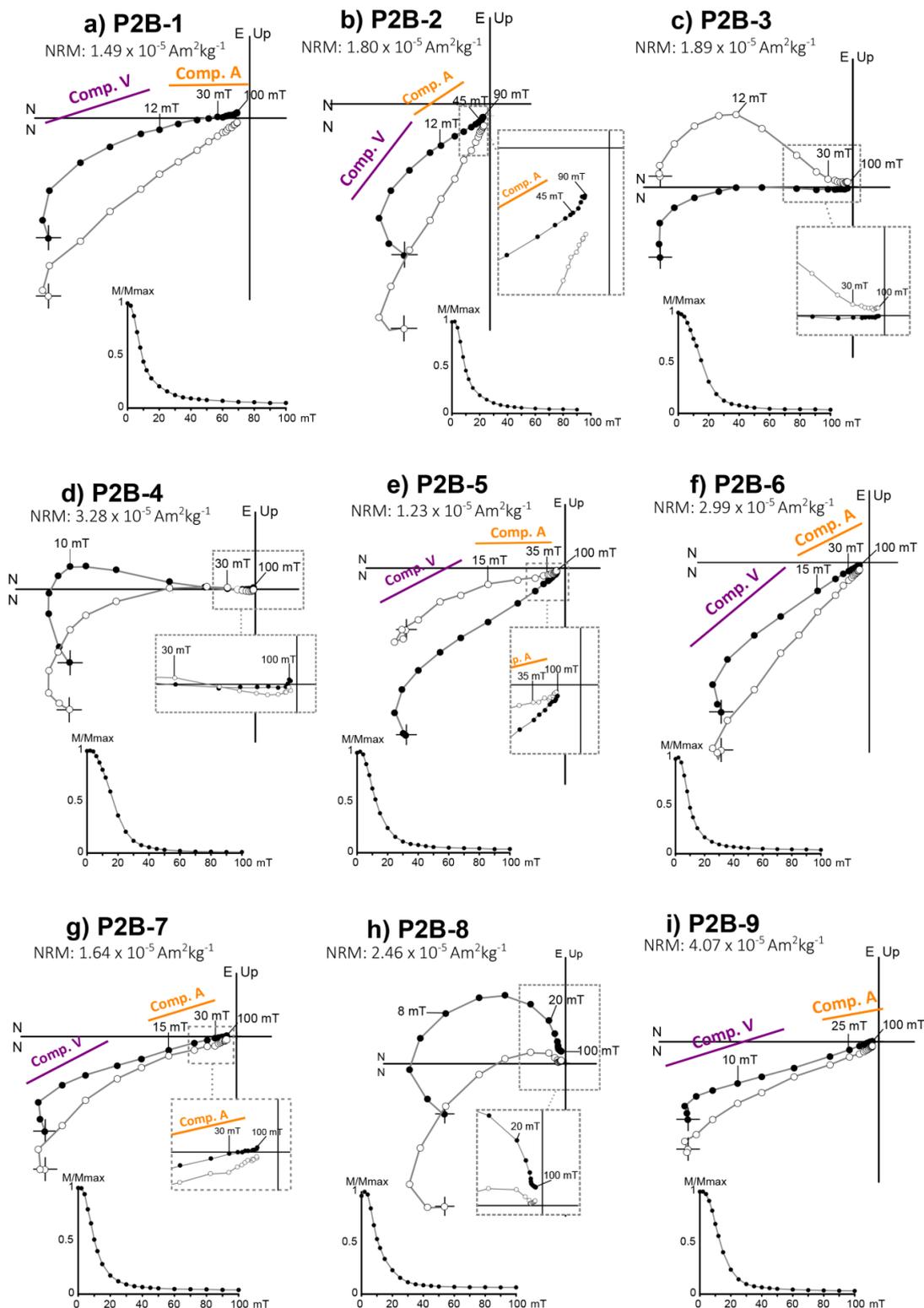
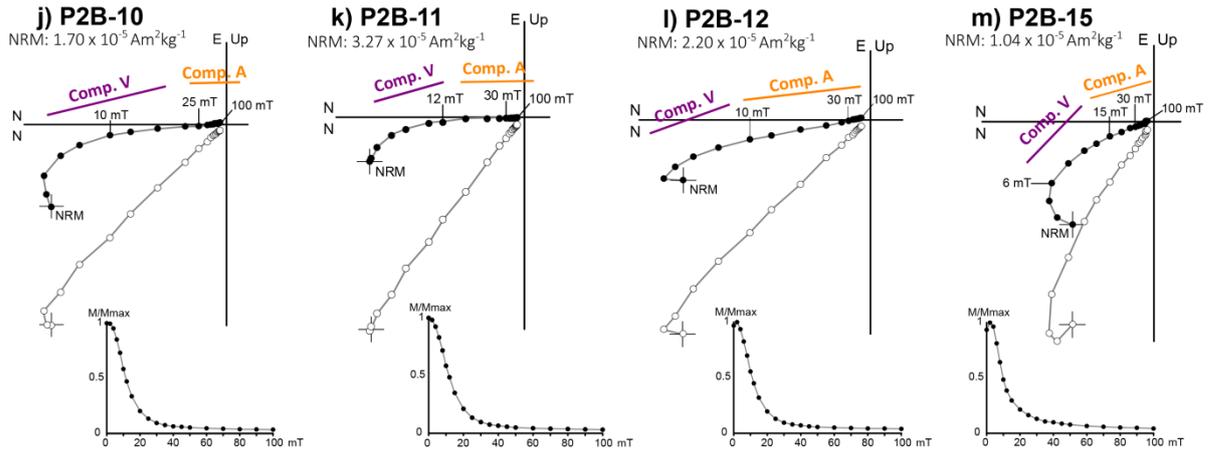


Fig. 7.10. Diagramas de desmagnetización de la NRM de los especímenes orientados del conjunto P2B. Los símbolos negros representan el plano horizontal y los blancos el vertical. Se muestran también las caídas de intensidad normalizadas. Comp. A = Componente característica; Comp. V. = Componente viscosa. Ver texto para la interpretación de las componentes B y C. *(Continúa en la página siguiente).*

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas



(Continuación de la Fig. 7.10)

7.3. Discusión

7.3.1. Mineralogía magnética

La presencia dominante de magnetita es clara en todas las muestras. Ahora bien, se observan algunos fenómenos que merece la pena comentar. Por un lado, es bastante frecuente la presencia de un pico hacia 200-250° C, que observado en los materiales no quemados de la unidad X de El Salt (véase el apartado 6.4.2 del capítulo 6). Además, detrás del pico, parece haber cierta inflexión hacia 300 °C, si bien esta puede ser un artefacto resultante de la suma de la caída de la magnetita con el incremento de 200 °C.

El pico hacia 200-250 °C podría corresponder a la transición λ de la pirrotina hexagonal (Dunlop y Özdemir, 1997 y referencias contenidas en ese texto). Sin embargo, sólo las curvas de P2A-6 (Fig. 7.3f) y P2B-13 (Fig. 7.3m), con una caída clara hacia 300° C, seguida de un incremento de la magnetización que alcanza (el máximo hacia 350° C) y la posterior caída hasta 550-580° C correspondiente a la temperatura de Curie de la magnetita, parecen sugerir la presencia de pirrotina (Roberts et al., 2011 y referencias citadas en ese texto).

Otra posibilidad es que estos comportamientos sean una manifestación relacionada con la inflexión hacia 200-300° C que suele aparecer en el calentamiento de muestras con greigita (Roberts et al., 2011 y referencias recogidas en ese texto). Curvas como por ejemplo las de P2A-1 o P2A-3 (Fig. 7.3a y Fig. 7.3c), con el pico de 200° C no muy marcado y cierta inflexión posterior hacia 300° C, recuerdan a las curvas de muestras con mezcla de magnetita/titanomagnetita y greigita (véanse los ejemplos recopilados en la Fig. 15 de Roberts et al., 2011). Sin embargo, no hay evidencias claras (p. ej.

giroremanencias en las desmagnetizaciones por campos alternos) que apunten hacia la presencia de este sulfuro de hierro.

Otra posible explicación del pico de 200-250 °C puede ser la que dio Day (1975) para comportamientos similares observados en titanomagnetitas sintéticas. Su explicación se basaba en la no saturación de la muestra al iniciar el calentamiento. Como el campo aplicado durante el experimento no era suficiente para lograrlo, interpretó que los picos se debían a la alineación de los granos ferromagnéticos a favor del campo aplicado a medida que se iban desbloqueando por el aumento de la temperatura. Sin embargo, inmediatamente antes de comenzar las curvas termomagnéticas de las muestras aquí presentadas, se les aplicó un campo de aproximadamente 1 T. Puesto que, según las IRM, parece que predomina la baja coercitividad, cabría esperar que la muestra estuviera saturada y estos picos no se observaran.

La aparente caída hacia 300 °C podría apuntar también hacia la existencia de inversión de maghemita a hematites que, sumada a una posterior generación de magnetita secundaria, podría enmascarar la esperable reducción de la magnetización durante el enfriamiento. Sin embargo, esto no explicaría el aumento previo de la magnetización hacia 200 °C.

Por ahora, no se puede dar una respuesta definitiva a los fenómenos mencionados. En cualquier caso, la magnetita es el mineral predominante en todos los casos.

7.3.2. Evidencias de posibles materiales quemados en los conjuntos P2A y P2B

El fuego produce transformaciones que afectan a la composición, la concentración y granulometría de los minerales ferromagnéticos contenidos en los materiales quemados. Es frecuente que, por efecto del fuego, se genere una importante cantidad de minerales ferrimagnéticos como la magnetita o la maghemita, lo cual produce un realce (en la literatura especializada suele llamarse *magnetic enhancement*) de parámetros dependientes de la concentración mineral como por ejemplo la susceptibilidad magnética (p. ej.: Carrancho y Villalaín, 2011). Sin embargo, también pueden producirse ciertas transformaciones de unos minerales ferromagnéticos (*s.l.*) a otros, como la transformación de magnetita a hematites o la inversión de maghemita a hematites, que precisamente tienen el efecto contrario (Maki et al., 2006). En otros casos, debido a las condiciones originales del sustrato, puede no existir una gran alteración de las propiedades magnéticas. Son buen ejemplo de esto último los resultados de los materiales experimentales expuestos en el capítulo 5 de la presente tesis: en los materiales al aire libre, el sustrato original ya era rico en minerales ferrimagnéticos antes de

quemarse, y el fuego no generó un realce muy destacado ni transformaciones mineralógicas drásticas. De todo esto se puede extraer que la ausencia de grandes cambios en las propiedades magnéticas entre diferentes muestras no necesariamente implica que no exista termoalteración. Sin embargo, cambios bruscos en las propiedades magnéticas sí que pueden apuntar hacia la posible presencia de materiales quemados.

Existen una serie de parámetros básicos que permiten detectar las posibles y esperables diferencias en las propiedades magnéticas de materiales quemados y no quemados. La NRM es uno de ellos. La magnitud de este parámetro está influida por la concentración de ferromagnéticos (*s.l.*) pero también por la ordenación de sus momentos magnéticos. Puesto que el efecto del fuego implica la adquisición de una remanencia térmica o termoquímica que por lo general es bastante eficiente y estable, y, además, puede generar neoformación de minerales ferromagnéticos, los incrementos notables de la NRM respecto al contexto circundante pueden ser indicativos de la presencia de materiales quemados. Lógicamente, se entiende que el contexto arqueológico ofrece ciertos indicios al respecto (ej.: coloraciones características en sedimento o restos arqueológicos, presencia de carbones, etc). Otro parámetro útil que permite evaluar específicamente la eficiencia de la remanencia magnética es el ratio de Köenigsberger (Q_n), que relaciona el valor de la magnetización remanente frente a la inducida. De este modo la NRM se normaliza por la susceptibilidad magnética que es fuertemente dependiente de la concentración minerales ferromagnéticos, de modo que el parámetro Q_n destaca la eficiencia de la magnetización para una concentración de granos ferromagnéticos determinada. Como acabamos de mencionar, el mecanismo térmico es bastante eficiente (generalmente más que otros como por ejemplo el detrítico). Por ello, valores altos de este parámetro suelen ser indicativos de un mecanismo de adquisición de la magnetización de origen térmico. En general, los valores de Q_n mayores de 1 se interpretan como un indicio de una considerable estabilidad de la magnetización remanente natural, lo cual es compatible con una remanencia de origen térmico. Sin embargo, conviene ser cautos, puesto que puede haber casos en que existan muestras no quemadas pero con altos valores de Q_n forzados por valores de susceptibilidad muy bajos debidos a la contribución de la matriz diamagnética (por ejemplo, los materiales experimentales calcíticos de la cueva mostrados en el capítulo 5). Por su parte, la susceptibilidad magnética es un parámetro que da información acerca de la concentración de minerales ferromagnéticos: a mayor susceptibilidad, mayor concentración. Aunque la susceptibilidad depende también del tipo de mineral (composición) y del estado de dominios (granulometría), si un contexto arqueológico está dominado por una misma mineralogía ferromagnética, las variaciones en concentración mineral pueden ser indicativas de termoalteración. Si el fuego genera un incremento grande de la concentración de los minerales ferromagnéticos o cambios en la mineralogía magnética, como la transformación de magnetita/maghemita a

hematites, es esperable ver cambios significativos en la susceptibilidad. Cada uno de estos parámetros, individualmente, puede no ser suficientemente diagnóstico, pero la combinación de todos ellos puede aportar información útil para identificar materiales potencialmente quemados. Partiendo de estas hipótesis, a continuación se discuten los resultados obtenidos para los conjuntos P2A y P2B.

El pico observado en la NRM y la susceptibilidad de la muestra P2A-8 del conjunto P2A, así como un $Q_n > 1$, pueden ser indicativos de alteración térmica (Fig. 7.1). Además de esto, se detecta un patrón decreciente en profundidad tanto en la NRM como en la susceptibilidad de las muestras P2A-8, P2A-9 y P2A-10, curiosamente muestras con un marcado color oscuro (Fig. 7.1). Cabría esperar que, si se trata de muestras quemadas y existe esa gradación en profundidad en estos parámetros, pudieran observarse termorremanencias parciales con temperaturas máximas de desbloqueo cada vez más bajas a medida que descendemos en profundidad. Sin embargo, la desmagnetización llevada a cabo en estos especímenes fue por campos alternos, por lo que no se puede realizar esta inferencia. Además, en los tres especímenes se observa una única componente (aparte de la viscosa). Es cierto que podría corresponder a un mecanismo de origen termoquímico (tal y como se planteó para algunos ejemplos de las capas negras de los fuegos experimentales de NFT –capítulo 5- o como propusieron Carrancho y Villalaín (2011) para otros materiales experimentales), pero con los datos disponibles no se puede demostrar.

Algo similar ocurre para P2A-5, P2A-6 y P2A-7, que muestran valores de NRM, susceptibilidad y, en este caso, también del Q_n , decrecientes en profundidad (Fig. 7.1). La reducción de estos parámetros en función de la profundidad ha sido observada en fuegos experimentales realizados bajo condiciones controladas (Carrancho y Villalaín, 2011), así como también en las estructuras experimentales estudiadas en la presente tesis (capítulo 5). Nuevamente, las desmagnetizaciones por campos alternos no aportan información concluyente, presentando una única componente (aparte de la viscosa). Cabe mencionar que tanto P2A-5, como P2A-6, P2A-8, P2A-9 y P2A-10 corresponden a facies bastante oscuras que a simple vista eran especialmente sospechosas de estar quemadas (Fig. 7.1). La posibilidad de que estas muestras correspondan efectivamente a episodios de combustión está reforzada no sólo por los valores relativamente elevados de los parámetros analizados sino especialmente por ese patrón decreciente. El color únicamente es orientativo y es verdad que podría ser también algo no quemado (ej.: horizontes húmicos). Sin embargo, en ese caso, habría que explicar esa gradación en profundidad.

El máximo de NRM, susceptibilidad magnética y Q_n observado en P2A-18, así como los altos valores de magnetización alcanzados durante la adquisición de IRM también son compatibles con el efecto del impacto térmico. Recordamos que esta muestra incorpora una facies blanquecina y otra más parda. Estos resultados llevan a pensar que al menos una de las dos facies podría corresponder a cenizas o

incorporarlas. El diagrama de desmagnetización intenso, univectorial y estable también apoya esta hipótesis, que sería el comportamiento esperado para las cenizas.

Cabe comentar el comportamiento de P2A-14, P2A-15 y P2A-16. Estas tres muestras correspondían a un horizonte de facies muy oscuras sospechosas de ser posibles capas negras (entendiendo por *capa negra* las facies termoalteradas llamadas “*black layers*” por (Mallol et al., 2013b). Sus valores de NRM y susceptibilidad magnética están entre los más bajos del conjunto P2A. P2A-15 y P2A-16 presentan $Q_n > 1$, pero P2A-14 no.

En el conjunto P2B, destacan los resultados obtenidos para la secuencia de muestras que va desde la P2B-8 hasta la P2B-12 (Fig. 7.6). Estas muestras forman parte de una serie de facies que podría corresponder a las cenizas (P2B-8 y P2B-9, aunque ambas muestras incluyen otros materiales: sedimento aparentemente no quemado en la primera y supuesta capa negra en la segunda) y la capa negra (P2B-10/P2B-11/P2B-12) de una hipotética estructura de combustión (usamos el término *capa negra* en referencia a las facies termoalteradas llamadas “*black layers*” según (Mallol et al., 2013b). El patrón decreciente de la susceptibilidad en profundidad observado entre P2B-8 y P2B-10, tal y como se comentó previamente para algunos especímenes del conjunto P2A, es similar al observado en materiales que se sabe con certeza que están quemados. La estabilización de la susceptibilidad entre P2B-10 y P2B-12 es coherente con lo esperado, pues estas tres muestras corresponderían ya exclusivamente a capa negra (facies termoalterada; Mallol et al., 2013b) y estarían ubicadas a una cota muy parecidas. Además de esto, las muestras de P2B-9, P2B-10, P2B-11 y P2B-12 presentan los Q_n más altos (y los únicos de este conjunto mayores que 1). Todos estos resultados son compatibles con la hipótesis de una estructura de combustión o un horizonte termoalterado. Hay un dato que puede parecer no encajar del todo en esta propuesta: P2B-8 presenta uno de los dos valores de susceptibilidad más grandes, pero ni su NRM ni su $Q_n (< 1)$ están entre los especímenes con valores más altos, como cabría esperar para supuestas cenizas. Cabe recordar que cuando se presentaron estos materiales (capítulo 4; Anexo 3), se apuntó la presencia de dos materiales diferenciados dentro de esta muestra, que podrían corresponder a cenizas y a otros materiales posiblemente no quemados. Las cenizas en P2B-8 son tan finas que inevitablemente la muestra puede incorporar otro tipo de materiales (como, por ejemplo, sedimento no quemado). Eso podría explicar sus valores de NRM y Q_n moderadamente bajos y también que su curva termomagnética no sea completamente reversible, algo que cabría esperar si fuese ceniza pura (Fig. 7.8h). Otra posibilidad es que estas supuestas cenizas (P2B-8) pudieran haber sido afectadas por algún proceso mecánico post-quema. La desmagnetización de estos especímenes apoya esta última hipótesis. P2B-9, P2B-10, P2B-11 y P2B-12 presentan diagramas univectoriales. Sin embargo, P2B-8 muestra un diagrama multicomponente con fuertes solapamientos.

P2B-4 presenta valores de susceptibilidad magnética y de magnetización en la IRM de los más altos del conjunto P2B. Debido a que, en general, la mineralogía predominante es muy similar entre todas las muestras (domina la magnetita fundamentalmente) esto se puede interpretar en términos de concentración de minerales ferromagnéticos (*s.l.*). En el campo, esta muestra se describió como posibles cenizas, si bien es cierto que incorporaba otras facies. La alta susceptibilidad y los altos valores de magnetización en la IRM son coherentes con el comportamiento esperado para las cenizas. Respecto a la NRM, no existe mucha diferencia dentro del conjunto P2B, aunque parece que el de P2B-4 es algo más alto. El valor del ratio Q_n es bajo (<0.5). Aunque es esperable que las cenizas bien preservadas muestren altos valores de NRM y ratio $Q_n > 1$, la inclusión de otros materiales en las muestras y/o quizás algún tipo de reorganización mecánica tras la hipotética quema podrían haber generado el comportamiento observado. Al igual que ocurría con P2B-8, el diagrama de desmagnetización de P2B-4 muestra solapamientos que no permiten aislar de manera clara la componente característica. Esto apoya la hipótesis propuesta.

Las curvas termomagnéticas aportan información adicional para la identificación de materiales quemados. Por lo general, aunque puede haber excepciones debidas fundamentalmente a los efectos de procesos post-deposicionales (p. ej., cenizas de estructuras experimentales del capítulo 5), cabe esperar que las cenizas presenten curvas con alta intensidad y ciclos de calentamiento y enfriamiento altamente reversibles (Carrancho et al., 2016a). Por su parte, a través de los resultados de la presente tesis se ha observado un comportamiento bastante reproducible para las capas negras (término que hace referencia a las facies termoalteradas descritas por (Mallol et al., 2013b) y denominadas *black layers*): cuando se calientan hasta 700° C en aire (en un único calentamiento) se produce una importante formación de magnetita secundaria (ej.: Fig. 7.8j-l). Esto genera un aumento en la magnitud de la magnetización de la curva de enfriamiento y hace que el valor de magnetización al final del experimento sea claramente mayor que el inicial. Como se propuso en el capítulo 6, este comportamiento muy probablemente está relacionado con la materia orgánica carbonizada que no se llega a destruir con la quema y cuya presencia es característica en esta facies. Esto, a su vez, e interpreta en términos de las temperaturas experimentadas. Los estudios previos realizados sobre capas negras de fuegos experimentales y facies carbonosas de episodios de combustión de secuencias de fumiers (que vendrían a ser un equivalente a las capas negras de las estructuras paleolíticas) indican temperaturas máximas de calentamiento en torno a 400 – 450 °C (Carrancho et al., 2016a; Carrancho et al., 2013, 2009), en línea con lo descrito por (Mallol et al., 2013b). Las propuestas realizadas para los fuegos experimentales del capítulo 5 de la presente tesis y los hogares de la unidad X de El Salt del capítulo 6 también apuntan en esta dirección. Por lo tanto, *a priori*, las muestras que no presenten ese aumento en la magnetización muy probablemente no correspondan a capas negras. Puesto que una buena parte de los horizontes

estudiados en este apartado corresponden a facies oscuras que podrían ser capas negras (termoalteradas), este criterio es importante para identificar posibles materiales quemados. Ahora bien, esto tampoco es un criterio definitivo, pues un horizonte húmico rico en materia orgánica en descomposición también podría mostrar un comportamiento magnético similar. Pero el hecho de que no aparezcan curvas altamente reversibles hace que no se invalide la hipótesis de que pueden tratarse de capas negras termoalteradas.

En el conjunto P2A, las muestras P2A-5, P2A-6 y P2A-10 presentan un comportamiento compatible con el de una capa negra (según lo definido por (Mallol et al., 2013b)). La observación macroscópica (color oscuro), y los valores y patrones de comportamiento de NRM, susceptibilidad magnética y Q_n apuntan en esta dirección. Del mismo modo, la clara irreversibilidad de sus curvas termomagnéticas es coherente con las características magnéticas que se conocen de las capas negras.

Por su parte, la muestra P2A-18 presenta una alta reversibilidad termomagnética, compatible con el comportamiento esperado para una ceniza (material que ha alcanzado muy altas temperaturas). Esta hipótesis también es apoyada por los altos valores de NRM, susceptibilidad, Q_n y magnetización durante la adquisición de la IRM. Esta muestra incorpora una facies blanquecina y otra más parda/rojiza subyacente (Fig. 4.18, capítulo 4). Si una de las dos correspondiese a material no quemado se podría esperar que la curva termomagnética no fuese tan reversible. Sin embargo, podría tratarse de ceniza y un sustrato rubefactado subyacente también afectado por el efecto del fuego, pues se ha observado en un fuego de El Salt que la rubefacción puede presentar curvas termomagnéticas altamente reversibles (Leierer *et al.*, en preparación). Otra posibilidad es que al llevar a cabo el submuestreo para la realización de las curvas termomagnéticas no se incluyeran realmente las dos facies. En todo caso, todo parece indicar que la P2A-18 presenta termoalteración.

Para las muestras P2A-8 y P2A-9 se planteó, en función de los resultados de la NRM, la susceptibilidad y el Q_n , que podrían corresponder a materiales quemados. Sin embargo, las curvas termomagnéticas no se parecen a las que suelen presentar las capas negras. Como se podía observar en la Fig. 4.18 (capítulo 4), las muestras P2A-8 y P2A-9 presentaban un color algo más grisáceo que la muestra P2A-10, que tiene un comportamiento similar al esperado para las capas negras. Teniendo en cuenta que las estructuras de combustión en buen estado presentan cenizas a techo sobre una capa negra termoalterada subyacente, y recordando los altos valores de NRM, susceptibilidad y Q_n para las muestras P2A-8 y P2A-9, éstas podrían corresponder en realidad a cenizas. Ninguna de las dos curvas es altamente reversible como cabría esperar para cenizas, pero, como ya se ha comentado, los procesos tafonómicos pueden hacer que se incluyan otros materiales no quemados (o menos quemados), lo cual puede alterar visiblemente

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

la estabilidad termomagnética observada. La confirmación de esta hipótesis requiere cruzar estos datos con observaciones micromorfológicas y mineralógicas.

Las curvas termomagnéticas de P2A-14, P2A-15 y P2A-16 no muestran el esperable aumento de la magnetización en la curva del enfriamiento. Aunque en el campo presentaban una coloración muy oscura, los experimentos aquí realizados no permiten identificarlas como capas negras.

En el caso del conjunto P2B, las muestras P2B-3, P2B-5, P2B-10, P2B-11 y P2B-12 muestran un comportamiento similar al de las capas negras termoalteradas. En el caso de la muestra P2B-3, los valores de NRM, susceptibilidad y ratio Q_n son bajos, por lo que no parece que se trate realmente de una *capa negra* termoalterada (Mallol et al., 2013b). Es importante recordar que se trataba de una facies muy oscura que a simple vista parecía ser realmente una capa negra. Por ello, resulta de especial interés cruzar los datos aquí presentados con los de otras disciplinas como la micromorfología de suelos para evaluar si esta muestra puede corresponder a un horizonte húmico. Para P2B-5, los valores de NRM, susceptibilidad y ratio tampoco parecen indicar que se trate de un material quemado. Sin embargo, para P2B-10, P2B-11 y P2B-12, los resultados de los otros parámetros apoyan la hipótesis de presencia de alteración térmica.

Cabe mencionar el comportamiento de las muestras P2B-8 y P2B-9. En función de los parámetros estudiados, se ha sugerido que podrían contener cenizas de la supuesta estructura de combustión que aparece entre las muestras P2B-8 y P2B-12. Pero se comentó que, en el caso de la muestra P2B-8, las hipotéticas cenizas podrían incluir otros materiales no quemados (ya sea por no haber podido aislar correctamente la facies durante el muestreo debido a su fino espesor o por a algún tipo de alteración mecánica) que hiciera que sus valores de NRM y Q_n no fueran tan altos. Las curvas termomagnéticas también parecen apuntar en esa dirección, pues no son tan reversibles como cabría esperar. Algo similar se puede decir de P2B-4, para la que se propuso lo mismo.

Las muestras P2B-6 y P2B-7 presentan curvas altamente reversibles, salvo por la presencia del pico de 200° C. Un comportamiento similar se observó en materiales no quemados de la unidad X de El Salt (capítulo 6) pero también se presenta en algunas cenizas de contextos de *fumiers* (capítulo 8). Si se observa el resto de los parámetros, no presentan valores especialmente altos, por lo que se sugiere que puedan ser en realidad materiales sin quemar.

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

Considerando todo lo comentado a lo largo de esta discusión, se interpreta lo siguiente:

• **Conjunto P2A:**

-Las muestras P2A-8, P2A-9 y P2A-10 presentan propiedades compatibles con el efecto de la alteración térmica y pueden formar parte de una misma estructura de combustión. P2A-8 y P2A-9 corresponderían a las cenizas (quizás afectadas por algún proceso tafonómico de carácter mecánico), y P2A-10 correspondería a la capa negra termoalterada.

-Las propiedades magnéticas de las muestras P2A-5, P2A-6 son compatibles con las de las capas negras termoalteradas, si bien es cierto que no se puede descartar que correspondan a horizontes ricos en materia orgánica en descomposición. Si se acepta la hipótesis de que P2A5 y P2A6 son facies calentadas, el hecho de que P2A-7 presente otra coloración, valores de NRM, Q_n y susceptibilidad menores que los de P2A-5 y P2A-6 y un comportamiento termomagnético diferente sugieren que esta muestra puede corresponder ya al sustrato no quemado por debajo de la hipotética estructura de combustión a la que pertenecerían P2A-5 y P2A-6.

- La muestra P2A-18 puede contener cenizas, y quizás trazas de una posible rubefacción subyacente.

- A pesar de su coloración oscura, P2A-14, P2A-15 y P2A-16 no presentan el comportamiento esperable para las capas negras.

-Las muestras restantes (P2A-1, P2A-2, P2A-3, P2A-4, P2A-7, P2A-8, P2A-11, P2A-12, P2A-13 y P2A-17) no presentan evidencias claras de haber sufrido algún tipo de alteración térmica.

• **Conjunto P2B:**

- Las propiedades magnéticas de las muestras P2B-8, P2B-9, P2B-10, P2B-11 y P2B-12 son compatibles con las esperadas para la secuencia de facies de una estructura de combustión. P2B-8 y P2B-9 corresponderían a las cenizas, de espesor muy fino y probablemente incorporan otros materiales (probablemente por el efecto de algún tipo de proceso tafonómico) y P2B-10, P2B-11 y P2B-12 corresponderían a la capa negra.

-P2B-4, cuya composición fue descrita como ceniza con inclusiones de otras facies durante el muestreo, presenta un comportamiento coherente con la identificación propuesta en el campo.

- P2B-3 y P2B-5 presentan curvas termomagnéticas similares a las esperadas para las capas negras (facies termoalteradas), pero el resto de los parámetros no parecen indicar que nos encontremos ante materiales quemados.

7. Identificación de materiales quemados a partir de análisis de propiedades magnéticas

- Según la alta reversibilidad de las curvas termomagnéticas de P2B-6 y P2B-7, estas muestras podrían corresponder a materiales sin quemar o a cenizas. Sin embargo, el resto de los parámetros hacen sugerir que realmente puedan tratarse de materiales no quemados.

-No hay evidencias claras de que las muestras restantes (P2B-1, P2B-2, P2B-13, P2B-14, P2B-15) correspondan a materiales quemados.

Las interpretaciones aquí propuestas complementan las observaciones macroscópicas realizadas en el campo. Los resultados indican que en ambos microperfiles hay evidencias de posible termoalteración en alguno de los horizontes muestreados, aunque no en todos. Por sí mismos no solventan el problema de la identificación de materiales quemados, pero dan algunos indicios que, combinados con análisis de otras disciplinas, podrán ayudar a resolver la cuestión. Para confirmar nuestras observaciones, el siguiente paso en el futuro requerirá la comparación e integración de estos resultados con los de la micromorfología de suelos y otros análisis mineralógicos disponibles.

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*: actualización de la curva de variación secular en Iberia durante la Prehistoria reciente.

8.1. Propiedades magnéticas

8.2. Análisis paleomagnéticos

8.3. Calidad de las direcciones arqueomagnéticas y criterios de selección

8.4 Nueva curva de variación secular para la península ibérica (1000 a.C.-6000 a.C.)

8.4.1. Base de datos

8.4.2. Generación de la curva de variación secular

8.5. Discusión

8.5.1. Comparativa de propiedades magnéticas en secuencias de *fumiers*

8.5.2. El comportamiento de la variación secular en Iberia entre el 1000 a.C. y el 6000 a.C.

8.5.3. El potencial de las secuencias de *fumiers*: límites y posibilidades



Las secuencias arqueostratigráficas de *fumiers* (J.-E. Brochier, 1983) son materiales de interés para el arqueomagnetismo. Se trata de depósitos arqueológicos relacionados con la actividad ganadera llevada a cabo en contextos de cueva (cuevas o abrigos) desde los inicios del Neolítico e incluyen episodios de combustión generados por la quema periódica de excrementos de ganado doméstico y restos vegetales. Dichos episodios, caracterizados por una facies de ceniza sobre otra facies carbonosa subyacente de color oscuro, pueden haber registrado y preservado la dirección del campo magnético terrestre (CMT) en el momento del último calentamiento/enfriamiento. Suelen preservarse en secuencias estratigráficas más o menos continuas y los estudios arqueológicos de muchas de ellas aportan dataciones independientes por métodos radiométricos (fundamentalmente radiocarbono sobre restos óseos, carbones o semillas). Por ello, son muy buenos candidatos para aportar datos direccionales que permitan extender y mejorar las curvas de variación secular. Algunos estudios previos realizados sobre secuencias de *fumiers* o sedimentos quemados en cuevas (Carrancho et al., 2013, 2009, Kapper et al., 2014a, 2014b) presentan registros direccionales estables que pueden ser utilizados con esa finalidad.

En las siguientes páginas se presentan los resultados del estudio arqueomagnético y de propiedades magnéticas de varios episodios de combustión prehistóricos en secuencias de *fumiers* procedentes de cuatro yacimientos del norte de la península ibérica: la Cueva del Mirador (Sierra de Atapuerca, Burgos), la Cueva del Estillín (Hortigüela, Burgos), el abrigo de San Cristóbal (Laguardia, Álava) y el abrigo de la Castañera (Obregón, Cantabria). Los datos direccionales obtenidos han sido combinados con los ya disponibles previamente para generar una nueva curva de variación secular en Iberia entre aproximadamente el 1000 a.C. y el 6000 a.C. Esta información es útil no sólo para estudiar la evolución del CMT en los últimos milenios, sino también para mejorar la técnica de datación arqueomagnética en cronologías de la prehistoria reciente.

8.1. Propiedades magnéticas

Los valores de magnetización remanente natural (NRM) registrados en la colección de especímenes orientados oscilan entre 1.5×10^{-6} y $9.1 \times 10^{-4} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ (Fig. 8.1a-b). Los valores para las cenizas oscilan en ese mismo rango y las facies carbonosas entre 3.2×10^{-6} y $4.4 \times 10^{-4} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ (Fig. 8.1b). Los especímenes de rubefacción presentan valores entre 1.4×10^{-4} y $3 \times 10^{-4} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ (Fig. 8.1b).

La susceptibilidad magnética a temperatura ambiente para la misma colección de especímenes presenta valores que van desde 6×10^{-8} hasta $6.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ (Fig. 8.2a-b). En las cenizas, la susceptibilidad oscila entre 6×10^{-8} y $6.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, y en las facies carbonosas, entre 1.7×10^{-7} y $6.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ (Fig. 8.2b). Para los especímenes con rubefacción, se han obtenido valores entre 8.7×10^{-7} y

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

$3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ (Fig. 8.2b). Al igual que ocurría con la NRM, aunque hay algunas excepciones (véase por ejemplo, Ci2; Fig. 8.1a y Fig. 8.2a), parece que hay más variabilidad entre distintos episodios de combustión que individualmente dentro de cada uno de ellos (Fig. 8.2).

En general, las cenizas alcanzan los valores de la NRM y de susceptibilidad más elevados, pero presentan gran variabilidad, alcanzando también los valores más bajos (Fig. 8.1b y Fig. 8.2b). Las facies carbonosas tienden a presentar valores más bajos que los de la mayoría de las cenizas y no alcanzan valores tan extremos (ni por la parte superior ni por la inferior) (Fig. 8.1b y Fig. 8.2b). Por su parte, las rubefacciones presentan la menor variabilidad y sus valores de NRM y susceptibilidad son similares a los más altos de las facies carbonosas (Fig. 8.1b y Fig. 8.2b).

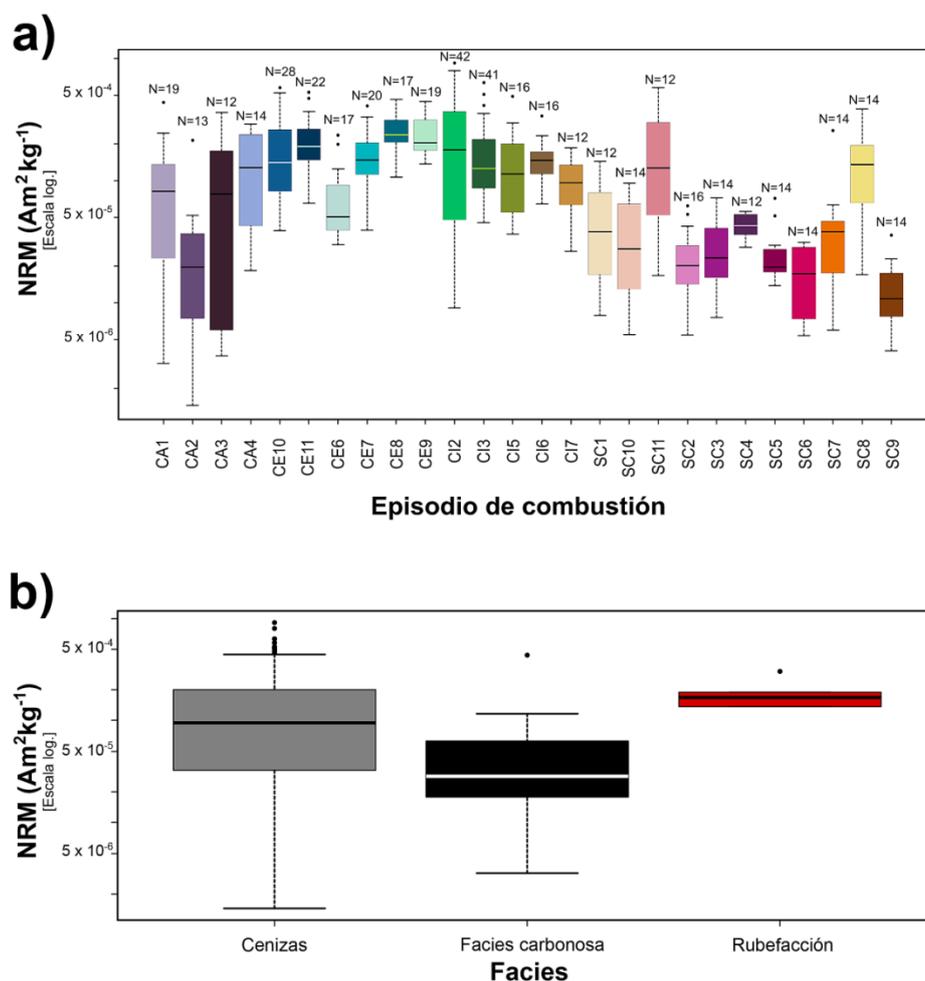


Fig. 8.1. Diagramas de cajas y bigotes para los valores de magnetización remanente natural (NRM) de la colección de muestras orientadas quemadas procedentes de secuencias de *fumiers*. En el panel (a) los resultados se muestran por episodios de combustión. [CA = La Castañera; CE = Cueva del Estillín; Ci = Cueva del Mirador; SC = Abrigo de San Cristóbal]; en el panel (b), se muestran por facies.

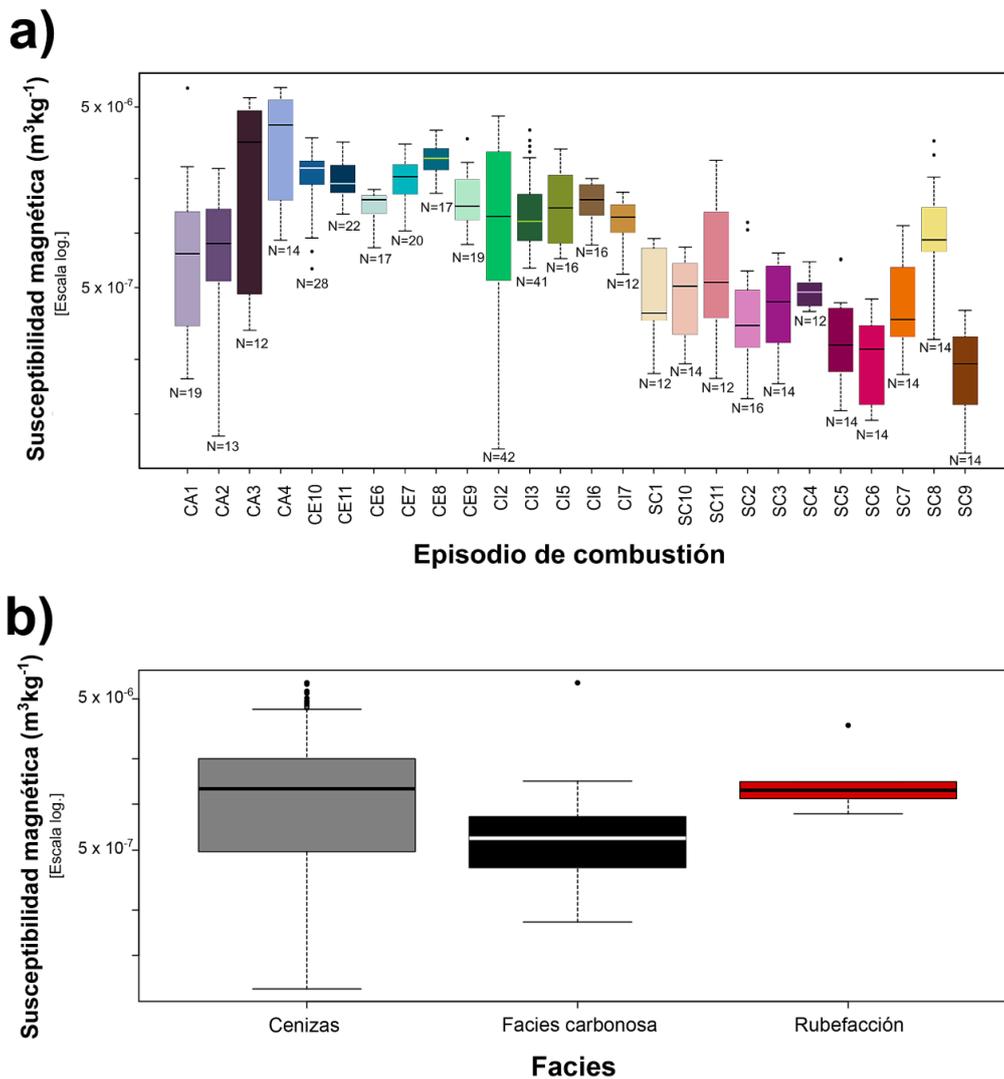


Fig. 8.2. Diagramas de cajas y bigotes para los valores de susceptibilidad magnética a temperatura ambiente de la colección de muestras quemadas orientadas procedentes de secuencias de *fumiers*. En el panel (a), los resultados se muestran por episodios de combustión. [CA = La Castañera; CE = Cueva del Estillín; Ci = Cueva del Mirador; SC = Abrigo de San Cristóbal]; en el panel (b) se muestran por facies.

La mayor parte de la colección presenta valores de Königsberger o Q_n ratio (Stacey, 1967) iguales o mayores que 1 (Fig. 8.3). En las cenizas, los valores oscilan entre 0.22 y 8.87 (Fig. 8.3a). Por su parte, las facies carbonosas presentan valores de Q_n ratio entre 0.18 y 4.84 (Fig. 8.3a). En el caso de los especímenes de rubefacción se observan Q_n ratio de entre 2.53 y 4.81 (Fig. 8.3a). A nivel de episodios de combustión, la mayoría de ellos muestran valores de Q_n mayoritariamente iguales o mayores de 1. Sin embargo, la mayoría de los especímenes de CA2 y CA3 presentan valores menores de 1 (Fig. 8.3b).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

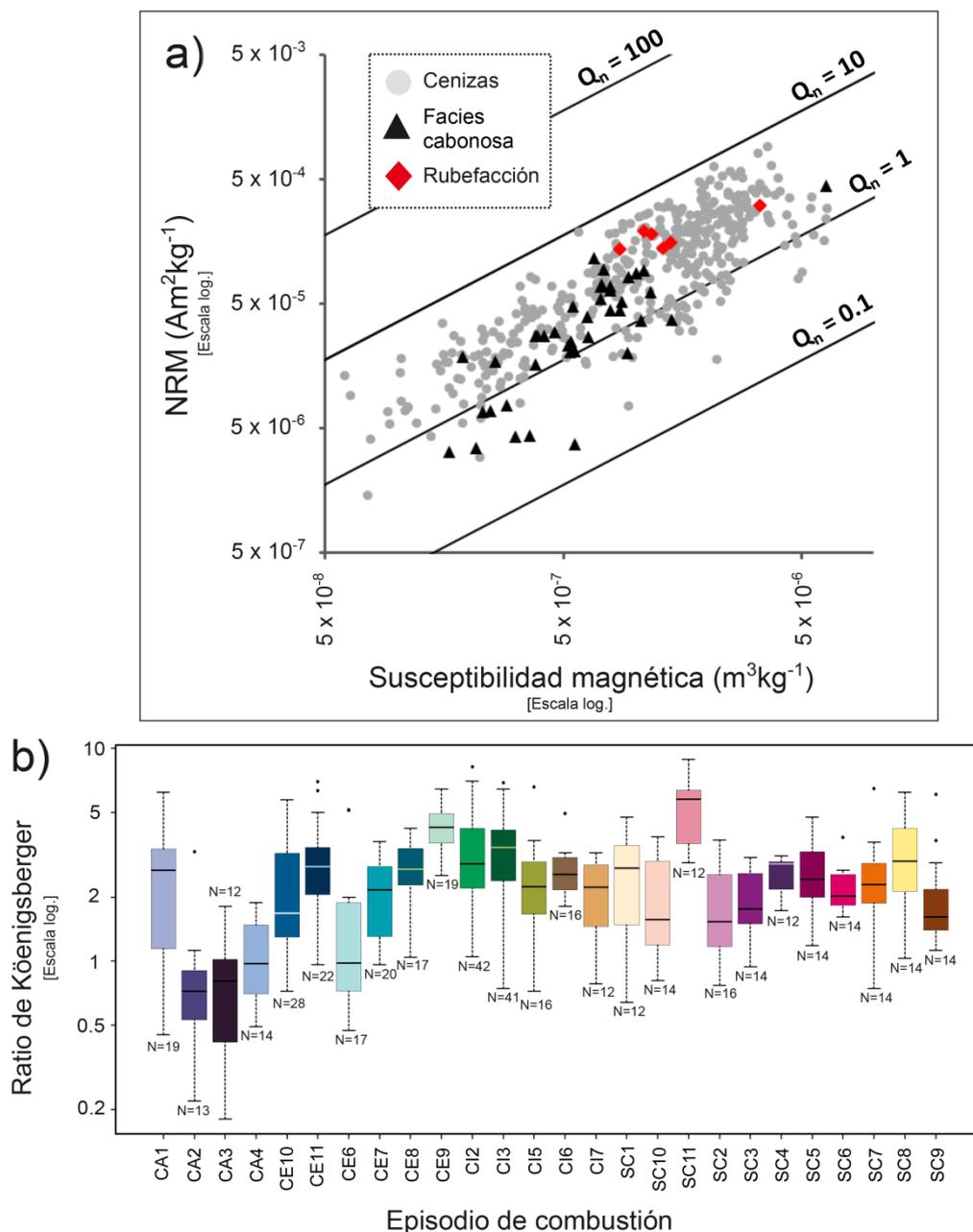


Fig. 8.3. (a) Diagrama del ratio Q_n de Königsberger (Stacey, 1967) para los especímenes quemados orientados, incluyendo las isolíneas para valores de $Q_n = 0.1, 1, 10$ y 100 ; (b) diagrama de caja y bigotes. En el panel (a) los resultados se muestran separados por facies y en el (b), por episodios de combustión. [CA = La Castañera; CE = Cueva del Estillín; Ci = Cueva del Mirador; SC = Abrigo de San Cristóbal]

Las curvas de adquisición progresiva de la IRM, indican que la magnetización, tanto en cenizas como en facies carbonosas, está dominada por minerales de baja coercitividad, alcanzando la saturación en torno a 150–200 mT (Fig. 8.4a). La descomposición de componentes de coercitividad mediante funciones acumulativas de tipo Log-Gaussiana indica la presencia de una

componente con campo saturador medio $B_{1/2}$ entre 20.9 y 40.7 mT en todas las muestras (Fig. 8.4b-c). Parece que podría existir una segunda componente de alta coercitividad, pero no se puede identificar y aislar con precisión.

En la Fig. 8.5 se muestran ejemplos representativos de curvas termomagnéticas de cenizas y facies carbonosas. En las cenizas se observa la presencia de magnetita ligeramente oxidada o magnetita “parcialmente maghemitizada” (véase p. ej.: Almeida et al., 2015), con temperaturas de Curie en torno a 600-620° C (Fig. 8.5a-e). Aunque esto es común a todas las cenizas, existe cierta variabilidad en los comportamientos observados, que se describen a continuación:

- 1) Algunas cenizas exhiben un grado de reversibilidad total. Es decir, los ciclos de calentamiento y enfriamiento coinciden indicando la ausencia de alteraciones (ej.: Fig. 8.5a).
- 2) En algunos casos aparece una caída hacia 300 °C tanto en el calentamiento como el enfriamiento (Fig. 8.5b). Esta caída podría relacionarse con la inversión de maghemita en hematites. Sin embargo, no se observa la esperable reducción de la magnetización en la curva de enfriamiento, por lo que parece descartable. Alternativamente, la alta reversibilidad de esta inflexión sugiere una fase espinela (magnetita o maghemita) termomagnéticamente estable con una gran cantidad de cationes sustituyentes (Ti, Al o Mg). Una tercera opción que podría explicar esa inflexión reversible es la presencia de pirrotina que no se destruye por efecto del calentamiento (Torres-López et al., 2014; Villalaín et al., 2014).
- 3) Es muy frecuente la presencia de un pico hacia 180-200 °C durante el calentamiento que no aparece en el enfriamiento (Fig. 8.5c-d). Salvo por ese pico, ambos ciclos termomagnéticos son bastante reversibles. Algunas veces la inflexión aparece en muestras en las que también se ve cierta inflexión reversible hacia 300°C (Fig. 8.5e). Esta inflexión hacia 180-200 °C también se observó en algunas muestras del yacimiento de El Salt (véanse los capítulos 6 y 7).
- 4) Las cenizas del evento de combustión CA2 (La Castañera) y la facies blanca de Ci2 muestreada como ceniza (El Mirador), presentan comportamientos anómalos (Fig. 8.5e-f). La primera exhibe dos importantes picos de aumento de la magnetización en el calentamiento (uno hacia 325-350° C y otro hacia 450-500° C; Fig. 8.5e), lo que sugiere la neoformación de magnetita al calentar. En el enfriamiento se observa la generación de más magnetita secundaria. Por su parte, la facies blanca del evento Ci2 presenta ciclos muy ruidosos y valores de magnetización muy bajos, lo cual se interpreta como una baja presencia de ferromagnéticos (*s.l.*). Los ciclos de histéresis apoyan esto, pues muestran la presencia de una importante contribución diamagnética.

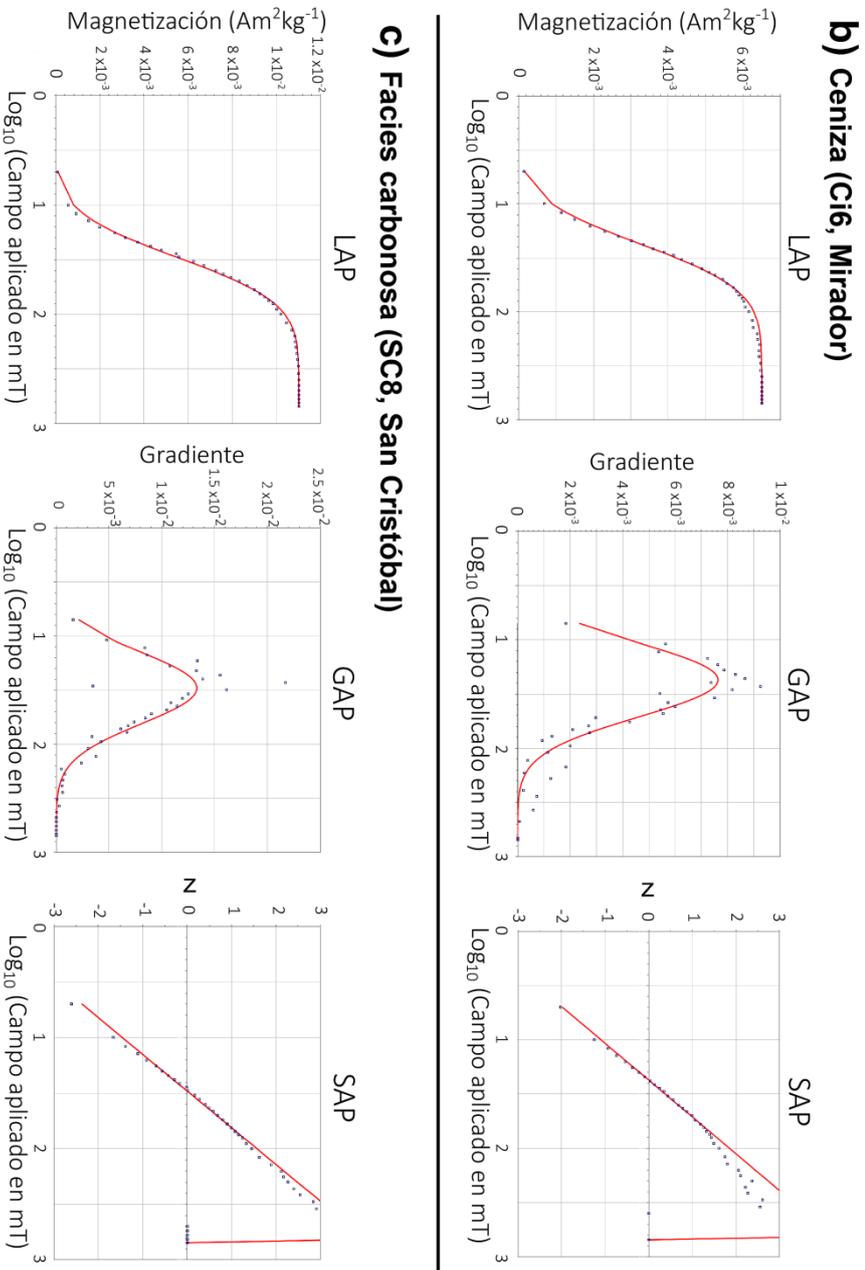
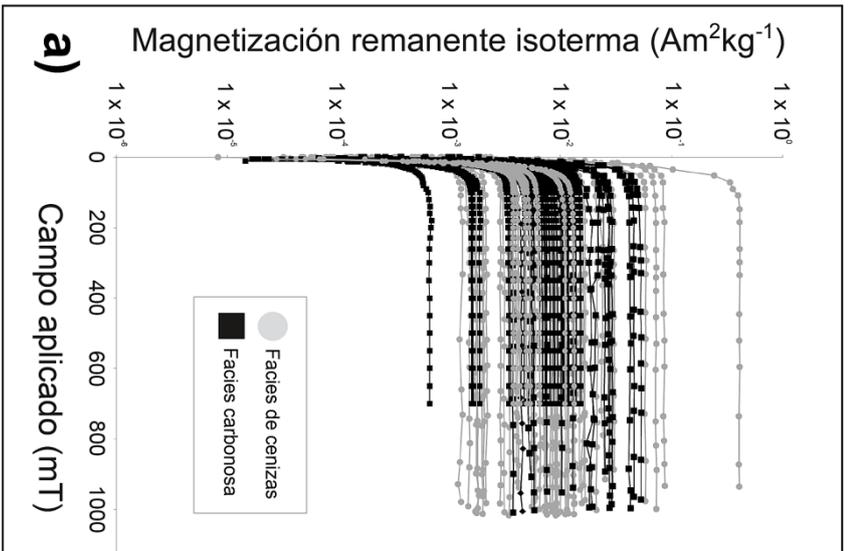


Fig. 8.4. (a) Curvas de adquisición progresiva de la IRM de facies de cenizas (círculos grises) y facies carbonosa (cuadrados negros); (b) ejemplos representativos de descomposición de componentes de coercitividad de la IRM mediante funciones acumulativas de tipo Log-Gausiana de facies de cenizas y (c) facies carbonosa, realizada con el programa IRM-CLG 1.0 (Kruiver et al., 2001). [LAP = *Linear Acquisition Plot*; GAP = *Gradient Acquisition Plot*; SAP = *Standardised Acquisition Plot*]

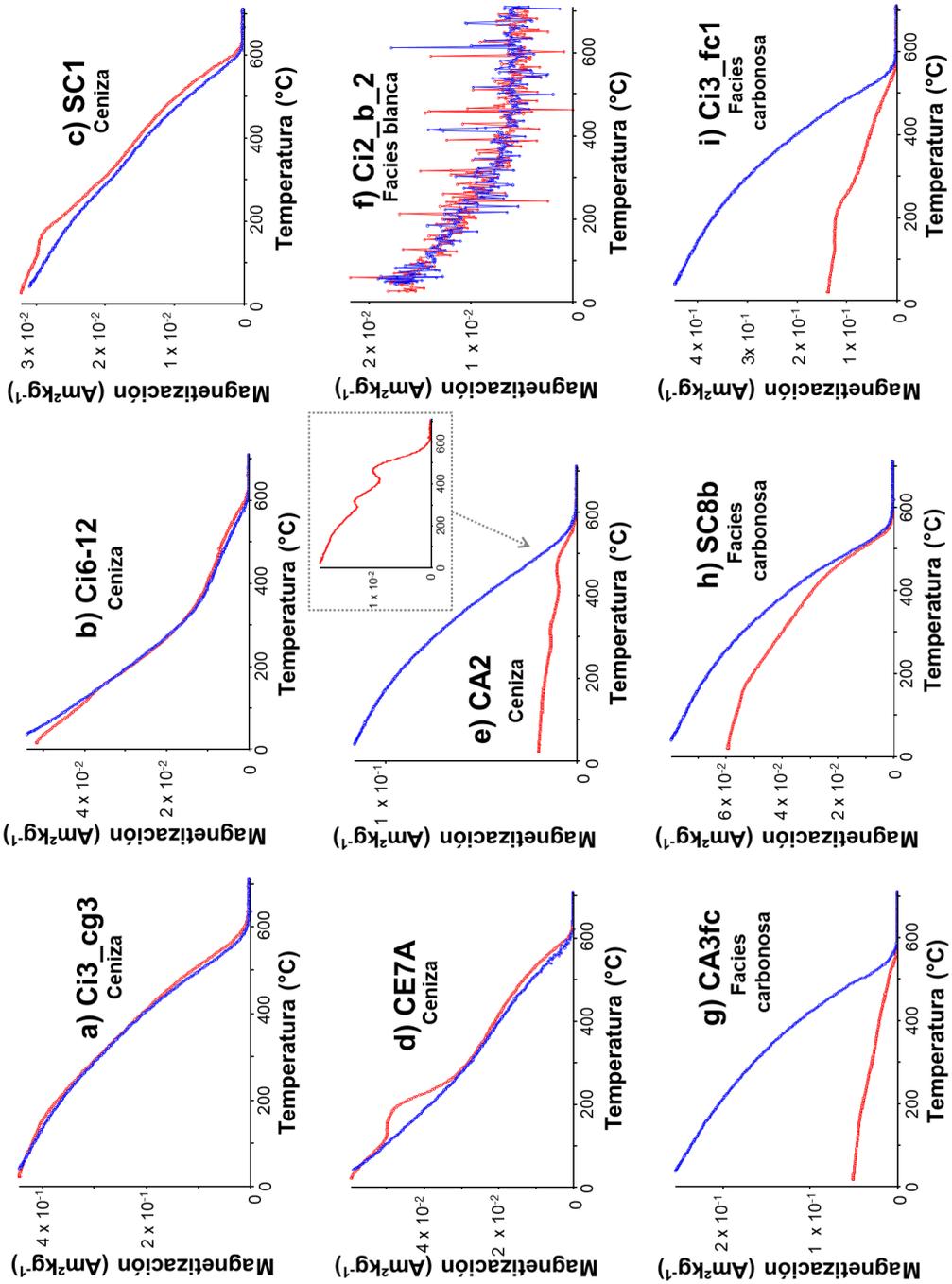


Fig. 8.5. (a-i) Ejemplos representativos de curvas termomagnéticas (magnetización vs temperatura): (a-f) cenizas y (g-i) facies carbonosas. En el panel (e) se muestra aumentada la curva de calentamiento. Todas las curvas están corregidas por su fracción dia/paramagnética.

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

- 1) Según la Dra. Ana Polo (*comunicación personal*, 4/12/19), experta en micromorfología de El Mirador, esta facies blanca del evento Ci2 incorpora bastantes restos de espeleotemas que fundamentalmente son calcita (diamagnética) y seguramente, es lo que domina la señal magnética de esta facies. En ese sentido, no son cenizas puras estrictamente hablando.

En el caso de las facies carbonosas, se observa la presencia de magnetita con temperaturas de Curie hacia 550-580° C (Fig. 8.5g-i). En todos los casos, son curvas irreversibles aunque en grado variable (véase Fig. 8.5g *versus* Fig. 8.5h), debido a la generación de magnetita secundaria adicional durante el enfriamiento. Ocasionalmente, se observa el pico hacia 180-200° C durante el calentamiento previamente descrito en las cenizas (Fig. 8.5i).

La figura 8.6 ilustra el diagrama de Day, que informa sobre el estado de dominios (granulometría) en los materiales estudiados, lo que está relacionado con la estabilidad de la remanencia. El ratio de histéresis M_{RS}/M_S oscila entre 0.08 y 0.22 en las cenizas, y entre 0.13 y 0.17 en las facies carbonosas. En el caso del ratio B_{CR}/B_C los valores oscilan entre 2.02 y 4.08 en las cenizas y entre 2.35 y 3.05 en las facies carbonosas. Al representar estos resultados en el diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) se puede observar que todas las muestras se ubican en la región asociada a un comportamiento de pseudo-monodominio (PSD) o dentro del área teórica de mezcla de monodominio (SD) y multidominio (MD) (Fig. 8.6). Cabe mencionar que las muestras de cenizas tienen mayor dispersión en el diagrama que las facies carbonosas.

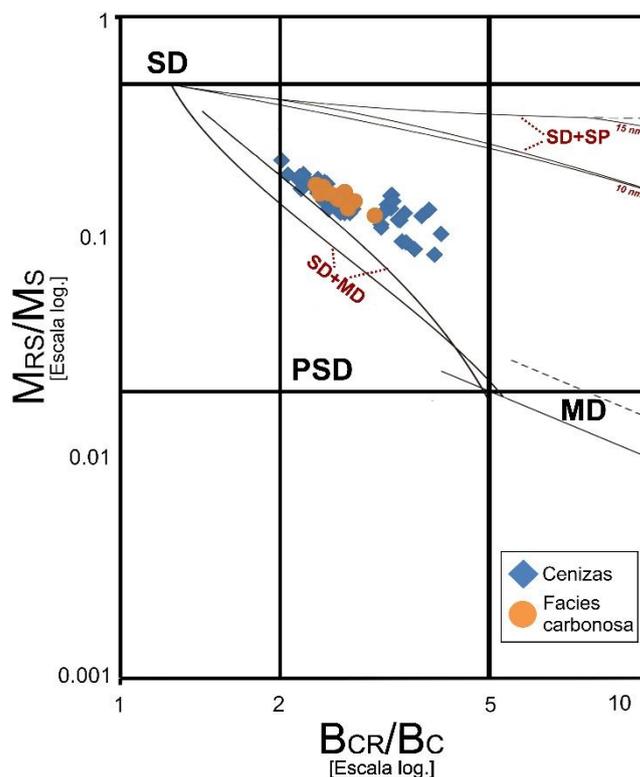


Fig. 8.6. Diagrama de Day (Day et al., 1977; Dunlop, 2002) de muestras de cenizas y facies carbonosas. En el gráfico se indican las áreas de comportamiento monodominio (SD), pseudomonodominio (PSD) y multidominio (MD), así como también las líneas teóricas de mezcla: monodominio + multidominio (SD + MD), monodominio + superparamagnéticos (SD+SP).

Los análisis de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) han mostrado que el grado de anisotropía no es muy alto. El factor de anisotropía corregido P_j oscila entre 1.007 (SC3) y 1.065 (CA2), aunque la práctica totalidad de los episodios presenta $P_j < 1.02$ (Tabla 8.1). Las figuras 7.8 a 7.12 ilustran los resultados de ASM de los 4 yacimientos estudiados y en la Tabla 8.1 se desglosan todos los parámetros estadísticos asociados. Se han observado distintos tipos de fábrica:

1) Episodios de combustión en los que $K3$ (eje mínimo) está claramente en la vertical (perpendicular al plano de estratificación). Este es el caso de todos los episodios de El Estillín (Fig. 8.7a-f) y del Ci5 de El Mirador (Fig. 8.8c). La fábrica fundamentalmente es oblonga (parámetro de forma T entre 0.046 y 0.602) y predomina la foliación sobre la lineación (la foliación magnética F oscila entre 1.005 y 1.013 y la lineación magnética L entre 1.003 y 1.005). Dentro de este grupo de muestras se pueden distinguir dos tipos teniendo en cuenta la orientación de $K1$ y $K2$ (ejes máximo e intermedio, respectivamente):

- a. En algunos casos (CE8, Fig. 8.7c; CE10, Fig. 8.7e; Ci5, Fig. 8.8c), la distribución de $K1$ y $K2$ parece *aleatoria*. Esta fábrica es similar a la típica sedimentaria y es la que Carrancho et al. (2009) observaron en varios episodios de combustión neolíticos de la Cueva de El Mirador. Esta fábrica apunta hacia la ausencia de procesos como corrientes de agua que podrían haber afectado a estos episodios.
- b. En los demás casos en los que $k3$ es vertical (CE6, Fig. 8.7a; CE7, Fig. 8.7b; CE9, Fig. 8.7d; CE11, Fig. 8.7f) las orientaciones de $k1$ y $k2$ están más diferenciadas y mejor agrupadas. No parece existir una relación entre la orientación del $K1$ y la dirección de perforación (muestreo) de las muestras de estos episodios. No hay ninguna evidencia geomorfológica que pueda explicar esa lineación aunque una corriente de agua podría ser la responsable.

2) Episodios en los que la fábrica es anómala y presentan el $k1$ vertical (es decir, perpendicular a la forma lenticular del episodio de combustión). Se trata de los episodios del abrigo de San Cristóbal (Fig. 8.9a-k), Ci6 de la Cueva del Mirador (Fig. 8.8d) y CA3 y CA4 de la Castañera (Fig. 8.10c-d). Suele predominar la lineación sobre la foliación (Tabla 8.1). Sólo en SC7 (Fig. 8.9g) y Ci6 (Fig. 8.8d) predomina la foliación, y en CA3, CA4 (Fig. 8.10c-d), SC6 y SC10 foliación y lineación tienen el mismo valor. Del mismo modo, en mayor parte de los episodios T está por debajo de 0, lo que sugiere un elipsoide prolato (Tabla 8.1). Los casos en los que $T > 0$ son CA3, SC6, SC7, SC10 y Ci6. Al igual que ocurría en el primer grupo descrito, aquí se observan dos subtipos:

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

- a. Episodios en los que las orientaciones de los ejes $K2$ y $K3$ están relativamente bien definidas. Es el caso de SC1, SC2, SC3, SC4 (Fig. 8.9a-d), SC9, SC10, SC11 (Fig. 8.9i-k), Ci6 (Fig. 8.8d), CA3 y CA4 (Fig. 8.10c-d).
- b. En el resto de episodios, $K2$ y $K3$ aparecen distribuidos de manera aleatoria o definiendo una guirnalda (SC5, SC6; Fig. 8.9e-f; SC8 Fig. 8.9h).

Para evaluar si la orientación vertical de $k1$ podría estar generada por una fábrica inversa de la contribución de la magnetita a la susceptibilidad magnética, se realizaron medidas de la anisotropía de la magnetización remanente anhisterética (AARM) sobre algunos especímenes. Si el elipsoide de la AARM mostrara una forma oblata con $K3$ en la vertical entonces la fábrica anómala observada en la ASM se explicaría como una fábrica inversa debida a la contribución de los granos SSD ferrimagnéticos. Los resultados se resumen en la Tabla 8.2. El grado de anisotropía de los especímenes analizados oscila entre 1.006 y 1.096, con la excepción de los especímenes SC1-3 y SC1-5, que presentan valores atípicos (Tabla 8.2). La lineación oscila entre 1.003 y 1.046 y la foliación entre 1.003 y 1.075 (exceptuando nuevamente SC1-3 y SC1-5, Tabla 8.2). Los resultados no son concluyentes. En SC3 (Fig. 8.9c) y quizás SC2 (Fig. 8.9b), SC7 (Fig. 8.9g), SC8 (Fig. 8.9h) y SC11 (Fig. 8.k) la AARM muestra fábricas sedimentarias con el eje $K3$ en la vertical al contrario de la anomalía observada en la ASM, lo que implicaría la contribución de una fábrica inversa a la ASM. Sin embargo, en los demás casos no se observa una diferencia clara entre ambos elipsoides. En algunos casos las diferencias podrían explicarse como una contribución parcial de una fábrica inversa. Basándose en estudios de ASM, Bradák *et al.* (en revisión, *Geophys. J. Int.*) han detectado fábricas anómalas similares, con $K1$ vertical, en cenizas de episodios de combustión paleolíticos en una cueva en Montenegro. Los autores lo relacionan con procesos post-deposicionales específicos acontecidos en ese yacimiento (ej.: filtración de agua) que habrían promovido la migración vertical de los granos. Según observaciones de lámina delgada (C. Mallol, *comunicación personal*), el origen podría estar en procesos de congelación y deshielo (geliflucción) acontecidos allí.

3) Episodios en los que $K3$ está bien definido, pero algo desviado de la horizontal (no del todo perpendicular al plano basal). Se trata de CA2 de La Castañera (Fig. 8.10b) y Ci7 de Mirador (Fig. 8.8e). CA2 tiene un P_j bastante alto (el mayor de toda la colección) y predomina ligeramente la foliación (1.032) sobre la lineación (1.030) (Tabla 8.1). En el caso de Ci7 predomina la foliación (1.010) sobre la lineación (1.004) de una manera más clara y la orientación de $K1$, $K2$ y $K3$ está mejor definida (Fig. 8.8e). La desviación del $K3$ respecto al plano horizontal podría deberse a un depósito de los materiales en pendiente (Bradák *et al.*, en revisión, *Geophys. J. Int.*, Kapper *et al.*, 2014b), pero no se dispone de datos de campo que confirmen esa

hipótesis. El buen agrupamiento de k_1 en Ci7 lleva a plantear la hipótesis alternativa de que, en su caso, la fábrica haya podido ser generada o afectada por algún flujo de agua o migración/infiltración de fluidos que hubiese reorientado los granos. Otra hipótesis es que se trate de algún efecto del muestreo, pero la orientación de K_1 en el evento Ci7 (Dec.: 318° ; Inc.: 22.5°) no se asemeja a la dirección de perforación ($30^\circ/66^\circ$). Una fábrica muy parecida fue presentada por Kapper et al. (2014a, 2014b) en sedimentos quemados neolíticos en la cueva de Arconciel (Suiza). En su caso, interpretan que esta fábrica refleja el efecto de la compactación y el buzamiento original de las capas, si bien no observan infraestimaciones en la inclinación. En Kapper et al. (2014b) se plantea que esta discrepancia pueda indicar que el elipsoide de AMS esté portado por minerales paramagnéticos. En todo caso, el valor promedio de anisotropía de nuestra colección (P_j) es bajo y no parece lo suficientemente significativo como para distorsionar la magnetización remanente.

4) El episodio CA1 de La Castañera (Fig. 8.10a) presenta un K_1 con una orientación bien definida no vertical (Dec.: 205° ; Inc.: 38.6°), mientras que K_2 y k_3 aparecen formando una guirnalda. Predomina la foliación y el parámetro T indica una fábrica oblonga. Esta fábrica podría relacionarse con flujos de agua o migración de fluidos, o bien por un efecto de la perforación, puesto que los azimuts de los especímenes oscilan entre 183° y 252° .

5) Por último, Ci2 y Ci3 de El Mirador (Fig. 8.8a-b) y SC7 de San Cristóbal (Fig. 8.9g) muestran orientaciones de K_1 , K_2 y K_3 mal definidas, que parecen distribuirse de manera aleatoria o desordenada. En los tres casos el factor de anisotropía es bajo, predomina la foliación y el parámetro T apunta hacia una fábrica oblonga (Tabla 8.1).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

EPISODIO DE COMBUSTION	N	N'	K _m	Desviación estándar de K _m	L	Desviación estándar de L	F	Desviación estándar de F	P _i	Desviación estándar de P _i	T	Desviación estándar de T
CA1	10	12	3.89 x 10 ⁻⁴	2.33 x 10 ⁻⁴	1.007	0.003	1.013	0.008	1.021	0.010	0.203	0.359
CA2	9	10	3.36 x 10 ⁻⁴	1.07 x 10 ⁻⁴	1.030	0.031	1.032	0.024	1.065	0.047	0.079	0.533
CA3	6	7	1.33 x 10 ⁻³	4.55 x 10 ⁻⁴	1.005	0.003	1.005	0.001	1.010	0.003	0.059	0.372
CA4	7	8	1.59 x 10 ⁻³	2.54 x 10 ⁻⁴	1.009	0.005	1.009	0.005	1.018	0.007	-0.004	0.424
CE6	16	17	4.86 x 10 ⁻⁴	8.01 x 10 ⁻⁵	1.004	0.002	1.005	0.003	1.010	0.003	0.046	0.384
CE7	19	20	6.94 x 10 ⁻⁴	1.97 x 10 ⁻⁴	1.003	0.002	1.007	0.003	1.011	0.004	0.421	0.364
CE8	17	17	8.60 x 10 ⁻⁴	1.62 x 10 ⁻⁴	1.003	0.003	1.013	0.006	1.017	0.007	0.553	0.282
CE9	17	19	6.51 x 10 ⁻⁴	2.66 x 10 ⁻⁴	1.004	0.002	1.013	0.005	1.018	0.006	0.495	0.208
CE10	25	25	8.14 x 10 ⁻⁴	1.58 x 10 ⁻⁴	1.003	0.003	1.008	0.005	1.012	0.007	0.415	0.268
CE11	22	2	7.17 x 10 ⁻⁴	1.45 x 10 ⁻⁴	1.003	0.002	1.012	0.005	1.016	0.006	0.602	0.318
CI2	7	8	4.37 x 10 ⁻⁴	2.67 x 10 ⁻⁴	1.004	0.001	1.007	0.005	1.011	0.004	0.117	0.353
CI3	12	13	3.69 x 10 ⁻⁴	1.73 x 10 ⁻⁴	1.005	0.003	1.006	0.004	1.012	0.007	0.114	0.223
CI5	13	13	4.17 x 10 ⁻⁴	1.64 x 10 ⁻⁴	1.005	0.002	1.009	0.005	1.014	0.006	0.220	0.464
CI6	11	12	3.86 x 10 ⁻⁴	1.03 x 10 ⁻⁴	1.003	0.002	1.012	0.005	1.016	0.006	0.649	0.209
CI7	10	10	3.94 x 10 ⁻⁴	7.76 x 10 ⁻⁵	1.004	0.002	1.010	0.004	1.015	0.005	0.351	0.292
SC1	8	9	2.33 x 10 ⁻⁴	1.58 x 10 ⁻⁴	1.009	0.004	1.005	0.003	1.014	0.004	-0.276	0.360
SC2	10	11	1.95 x 10 ⁻⁴	1.44 x 10 ⁻⁴	1.007	0.003	1.005	0.003	1.012	0.004	-0.184	0.292
SC3	11	11	2.12 x 10 ⁻⁴	9.74 x 10 ⁻⁵	1.004	0.002	1.003	0.003	1.007	0.005	-0.086	0.365
SC4	9	9	2.10 x 10 ⁻⁴	5.65 x 10 ⁻⁵	1.010	0.006	1.003	0.002	1.014	0.008	-0.449	0.196
SC5	9	9	1.30 x 10 ⁻⁴	7.69 x 10 ⁻⁵	1.010	0.003	1.007	0.005	1.017	0.005	-0.212	0.394
SC6	9	10	1.04 x 10 ⁻⁴	5.61 x 10 ⁻⁵	1.006	0.005	1.006	0.005	1.012	0.008	0.011	0.352
SC7	9	10	1.90 x 10 ⁻⁴	1.69 x 10 ⁻⁴	1.005	0.003	1.010	0.005	1.016	0.007	0.286	0.245
SC8	7	8	4.92 x 10 ⁻⁴	3.33 x 10 ⁻⁴	1.007	0.002	1.002	0.001	1.010	0.003	-0.533	0.191
SC9	9	10	1.11 x 10 ⁻⁴	4.81 x 10 ⁻⁵	1.008	0.003	1.005	0.004	1.013	0.005	-0.315	0.391
SC10	9	10	2.49 x 10 ⁻⁴	1.39 x 10 ⁻⁴	1.006	0.006	1.006	0.005	1.013	0.008	0.065	0.506
SC11	10	10	4.03 x 10 ⁻⁴	4.08 x 10 ⁻⁴	1.007	0.004	1.004	0.005	1.012	0.007	-0.315	0.410

Tabla 8.1. Parámetros estadísticos de la anisotropía de la susceptibilidad magnética en la colección de cenizas de los yacimientos holocenos (N= número de muestras tenidas en cuenta para los cálculos/N'= número total de muestras medidas/ Km= mediana del valor de susceptibilidad/ L= lineación magnética/ F= foliación magnética/ P_i= grado de anisotropía corregido / T= parámetro de forma). CA (La Castañera), CE (El Estillín), CI (El Mirador), SC (San Cristóbal).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

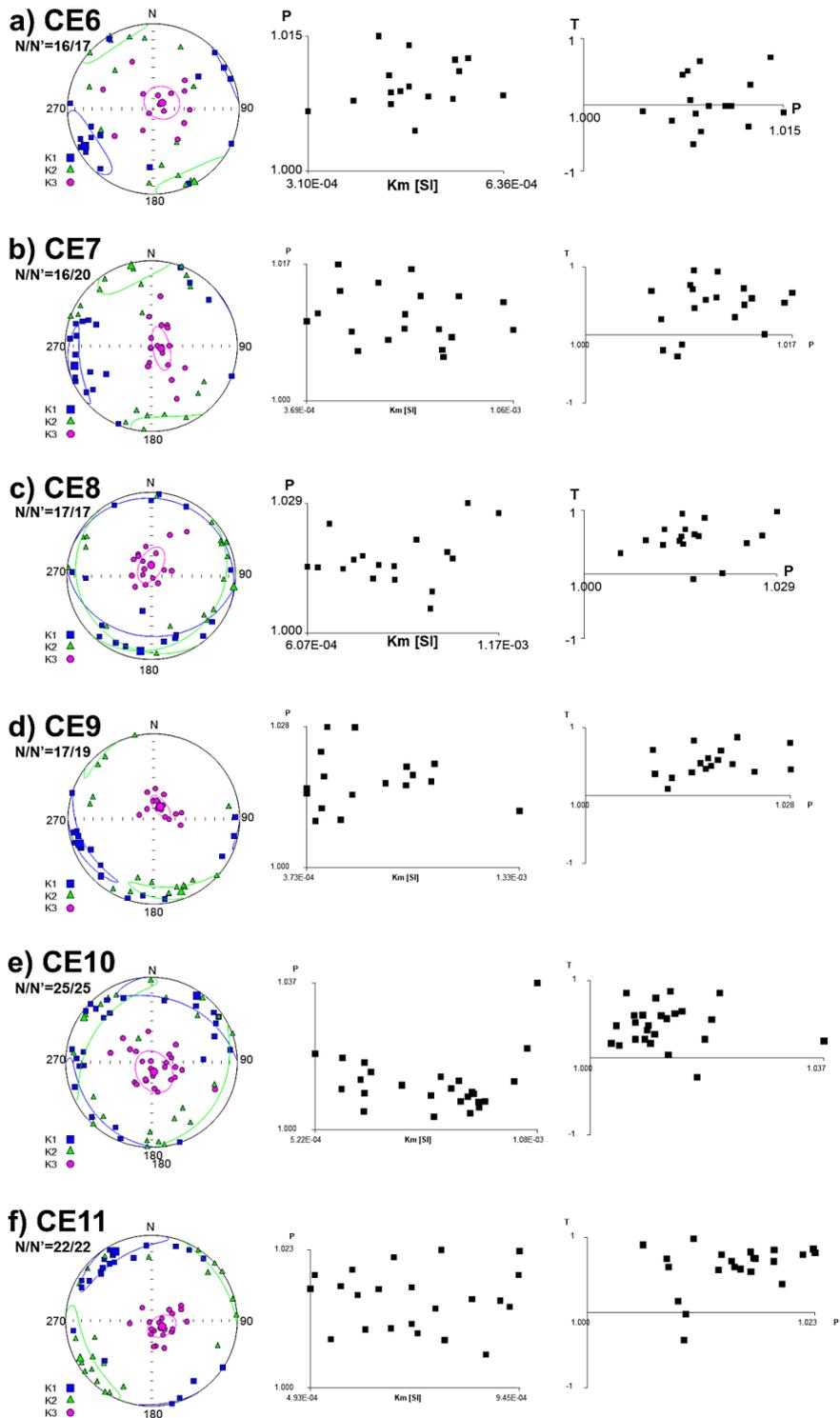


Fig. 8.7. Proyección de igual área de la fábrica magnética (izquierda), diagrama de grado de anisotropía corregido P vs. *Susceptibilidad magnética media* K_m (centro) y diagrama factor de forma T vs. P (derecha) para los episodios de combustión de la Cueva de El Estillín. En la proyección de igual área, K1 está representado mediante cuadrados azules, K2 mediante triángulos verdes y K3 mediante círculos rosas. Se muestran tanto los resultados individuales de cada espécimen (símbolos pequeños) como la dirección media (símbolos grandes) y sus elipses de confianza (al 95 % de probabilidad).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

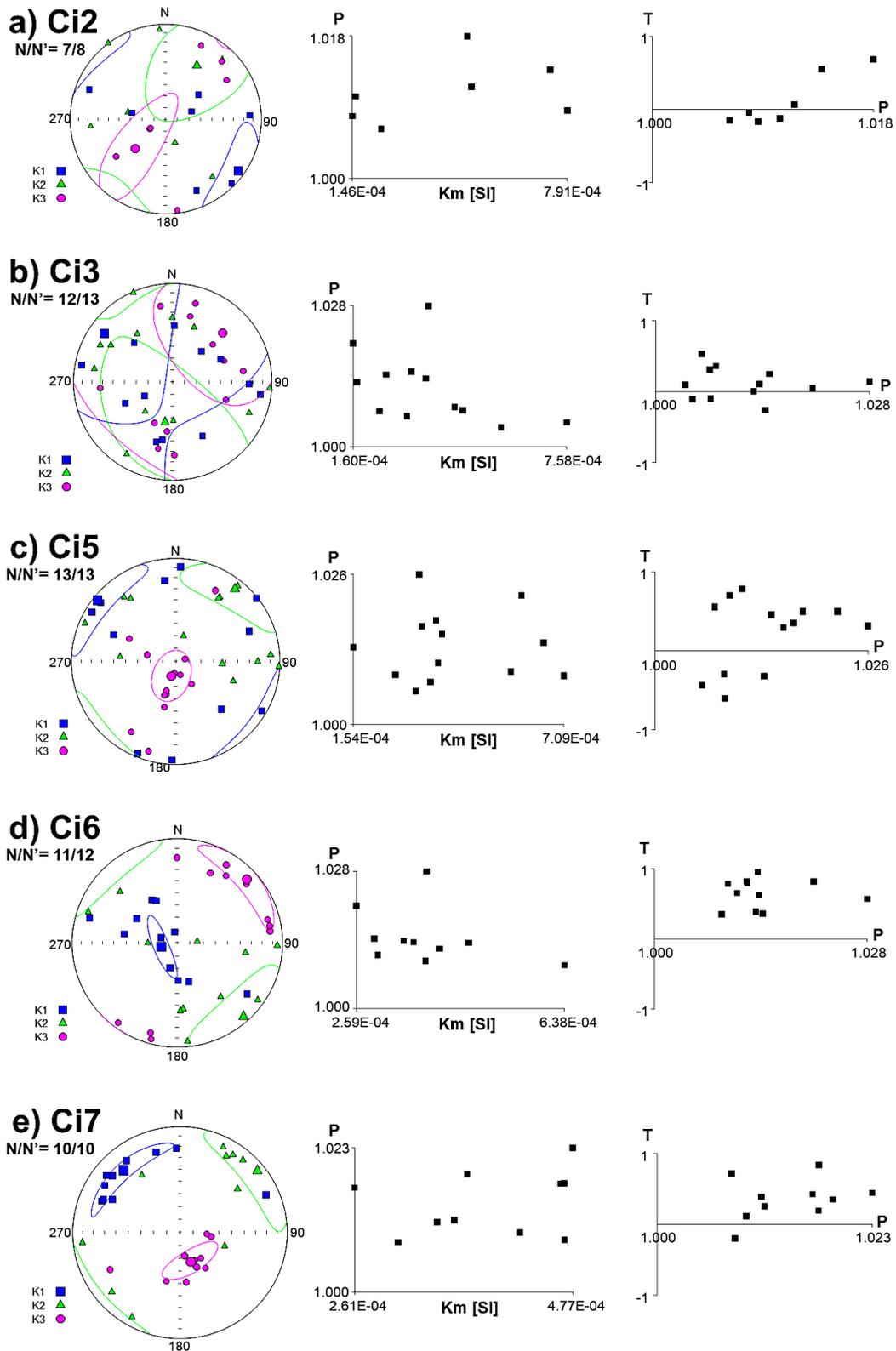


Fig. 8.8. Proyección de igual área de la fábrica magnética (izquierda), el diagrama grado de anisotropía corregido P vs. *Susceptibilidad magnética media* K_m (centro) y diagrama factor de forma (derecha) para los episodios de combustión de la Cueva de El Mirador. [Símbolos como en la Fig. 8.7]

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

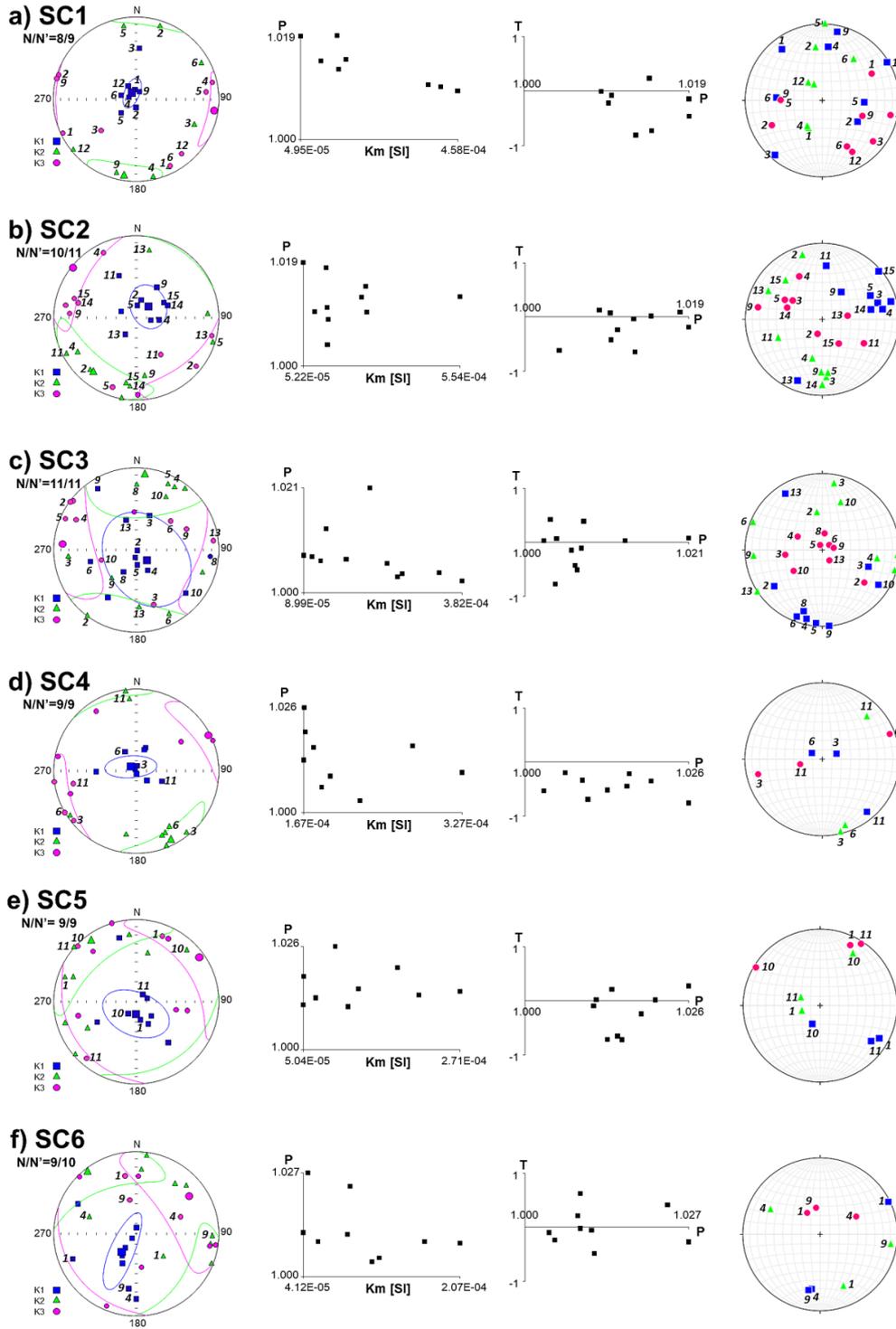
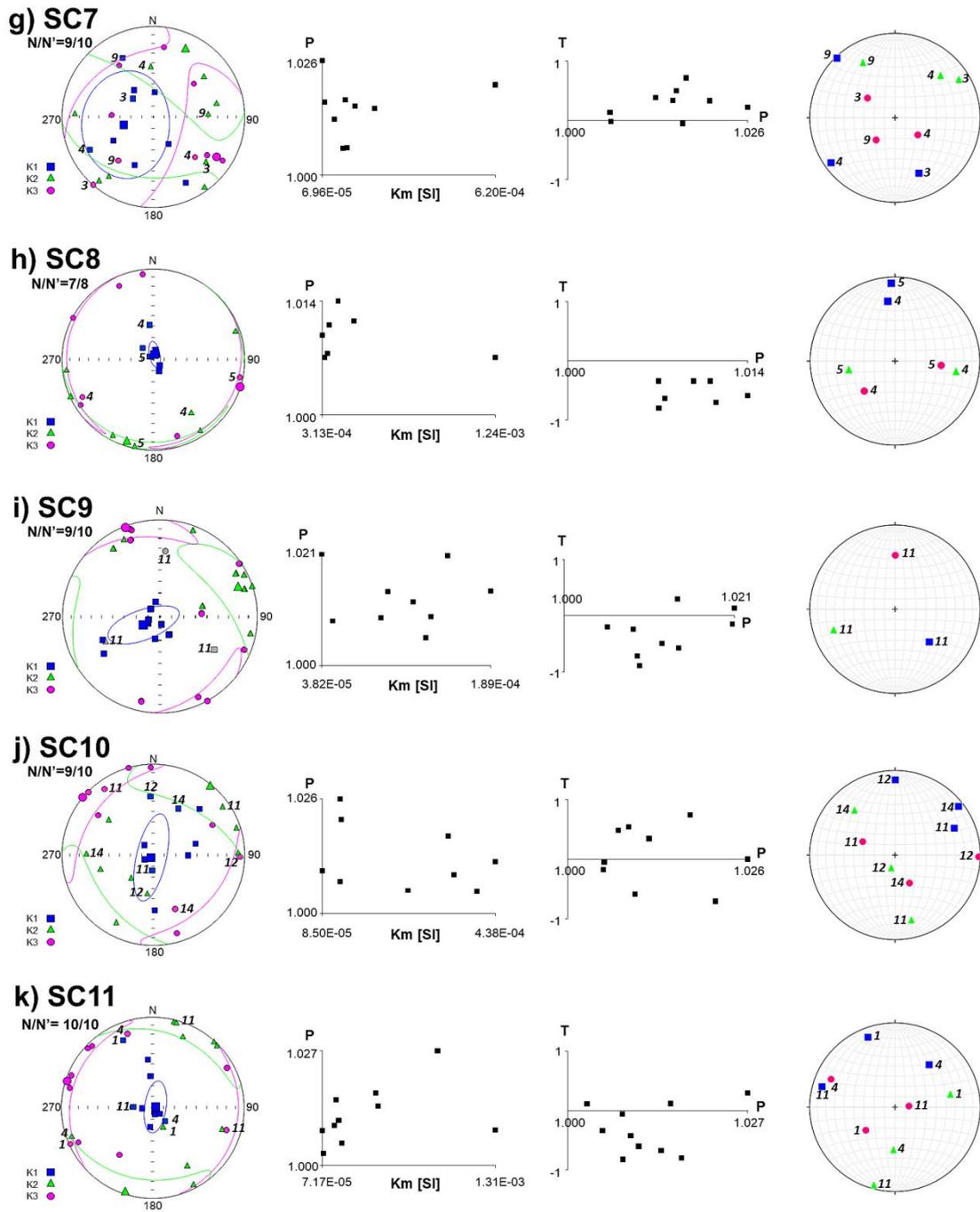


Fig. 8.9. De izquierda a derecha, proyección de igual área de la fábrica magnética inferida a partir de la ASM, diagrama de grado de anisotropía P vs. *Susceptibilidad magnética media* K_m (ASM), diagrama de factor de forma T vs. P (ASM) y proyección de igual área de la fábrica magnética inferida a partir de la AARM de episodios de combustión del abrigo de San Cristóbal. Los símbolos de la ASM como en la Fig. 8.7. Los símbolos amarillos son las muestras en las que se midió AARM; los números en cursiva son los números de identificación de las muestras. Los símbolos grises corresponden a muestras en las que se midió la AARM pero fueron consideradas *outliers* para el cálculo de los parámetros de la ASM (y por tanto, no están representadas en los diagramas de P vs. Km ni T vs. P). (Continúa en la página siguiente)

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*



(Continuación de Fig. 8.9)

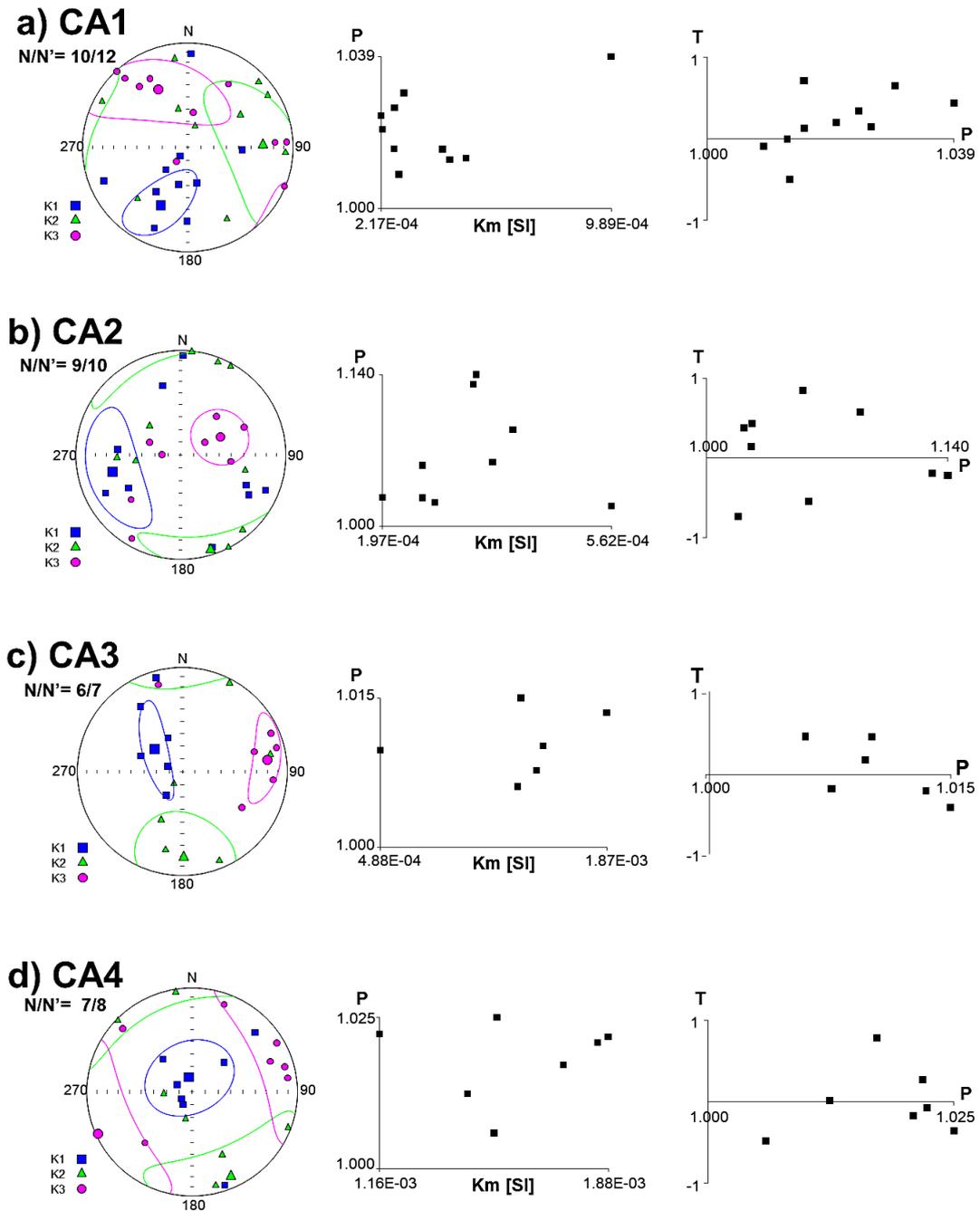


Fig. 8.10. Proyección de igual área de la fábrica magnética (izquierda), el diagrama de grado de anisotropía [P] vs. susceptibilidad magnética [Km] (centro) y el diagrama de parámetro de forma [T] vs. grado de anisotropía [P] (derecha) para los episodios de combustión de la Cueva de El Mirador. [Símbolos como en la Fig. 8.7]

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

ESPÉCIMEN	EPISODIO DE COMBUSTIÓN	L	F	P
SC1-1	SC1	1.017	1.036	1.053
SC1-2	SC1	1.020	1.075	1.096
SC1-3	SC1	1.057	1.122	1.186
SC1-4	SC1	1.009	1.009	1.017
SC1-5	SC1	1.129	3.920	4.424
SC1-6	SC1	1.004	1.013	1.017
SC1-9	SC1	1.004	1.011	1.016
SC1-12	SC1	1.007	1.022	1.029
SC2-2	SC2	1.005	1.006	1.011
SC2-3	SC2	1.023	1.062	1.087
SC2-4	SC2	1.016	1.015	1.031
SC2-5	SC2	1.025	1.062	1.088
SC2-9	SC2	1.019	1.058	1.078
SC2-11	SC2	1.031	1.031	1.063
SC2-13	SC2	1.024	1.008	1.032
SC2-14	SC2	1.020	1.019	1.040
SC2-15	SC2	1.004	1.008	1.012
SC3-2	SC3	1.008	1.015	1.022
SC3-3	SC3	1.046	1.017	1.063
SC3-4	SC3	1.004	1.007	1.011
SC3-5	SC3	1.003	1.007	1.010
SC3-6	SC3	1.003	1.012	1.015
SC3-8	SC3	1.010	1.017	1.027
SC3-9	SC3	1.004	1.018	1.022
SC3-10	SC3	1.020	1.04	1.060
SC3-13	SC3	1.010	1.012	1.022
SC4-3	SC4	1.004	1.006	1.009
SC4-6	SC4	1.012	1.009	1.021
SC4-11	SC4	1.003	1.043	1.046
SC5-1	SC5	1.006	1.016	1.022
SC5-10	SC5	1.017	1.005	1.022
SC5-11	SC5	1.009	1.013	1.023
SC6-1	SC6	1.010	1.010	1.021
SC6-4	SC6	1.027	1.045	1.073
SC6-9	SC6	1.004	1.018	1.022
SC7-3	SC7	1.003	1.003	1.006
SC7-4	SC7	1.026	1.040	1.067
SC7-9	SC7	1.022	1.007	1.030
SC8-4	SC8	1.018	1.014	1.033
SC8-5	SC8	1.010	1.005	1.015
SC9-11B	SC9	1.018	1.011	1.029
SC10-11	SC10	1.004	1.006	1.010
SC10-12	SC10	1.045	1.012	1.057
SC10-14	SC10	1.007	1.015	1.022
SC11-1	SC11	1.018	1.019	1.038
SC11-4	SC11	1.004	1.020	1.025
SC11-11	SC11	1.007	1.010	1.017

Tabla 8.2. Resumen de los parámetros básicos de la anisotropía de la magnetización remanente anhisterérica (AARM) obtenidos en los yacimientos holocenos: lineación magnética (L), foliación magnética (F) y grado de anisotropía (P). En rojo los especímenes que presentan valores atípicos. Las siglas de los yacimientos son como los de la Tabla 8.1.

8.2. Análisis paleomagnéticos

Los análisis paleomagnéticos han sido realizados sobre muestras orientadas de cenizas y facies carbonosas. Se presentan, en primer lugar, los resultados de la desmagnetización de la NRM por campos alternos. Estudios previos en este tipo de materiales (algunos de ellos procedentes además de alguno de los yacimientos estudiados en este trabajo) han mostrado que por debajo de 10-15 mT suelen presentar una componente viscosa secundaria (Carrancho et al., 2016a; Carrancho et al., 2013, 2009). En muchas de las muestras aquí estudiadas, salvo para las coercitividads más bajas (2-6 mT), los pasos que podrían estar afectados por viscosidad presentaban una dirección indistinguible de la dirección característica (ChRM) a simple vista. Sin embargo, al calcular las componentes paleomagnéticas en detalle, existe cierta desviación en los pasos de más baja coercitividad. Por esto, realizando una interpretación conservadora que nos asegure que estamos evitando la influencia viscosa en la medida de lo posible, se han excluido los pasos por debajo de 15 mT para calcular la dirección de la ChRM.

A la hora de seleccionar los especímenes para el cálculo direccional se han seguido los siguientes criterios:

- 1) Se han evitado los especímenes con ratio de Königsberger < 1 , tal y como sugirieron Carrancho et al. (2013).
- 2) Puesto que las cenizas alcanzaron temperaturas muy altas (>600 °C) sólo se han aceptado diagramas univectoriales (excluyendo la componente viscosa) para las muestras de esta facies (Fig. 8.11a-c). Este criterio también fue propuesto por Carrancho et al. (2013). No se ha aplicado a las facies carbonosas, puesto que es esperable que experimentaran temperaturas inferiores y por lo tanto es posible que aparezcan termorremanencias parciales (Fig. 8.11d).
- 3) Se han excluido los especímenes en los que no se ha podido identificar y aislar claramente la componente característica asociada al último calentamiento debido a su inestabilidad y/o la presencia de solapamientos (p. ej. Fig. 8.11e-f).
- 4) Una vez realizada la selección de especímenes aplicando los requisitos de los puntos anteriores, con el fin de refinar las direcciones y filtrar posibles *outliers*, se han excluido aquellos especímenes que se encuentren a una distancia angular mayor que $3 \times \alpha_{95}$ respecto a la media. De esta manera se sigue un criterio similar a lo empleado en trabajos previos (Kapper et al., 2014a, 2014b).

La componente característica (ChRM) tiene polaridad normal y se aísla desde 15-35 mT hasta 70-100 mT en las muestras desmagnetizadas por campos alternos (Fig. 8.11a-b). En el caso de las muestras desmagnetizadas térmicamente, la ChRM muestra polaridad normal y se aísla desde 150-250 °C hasta 500-625° C

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

en las cenizas (comp. A en Fig. 8.11c). En el caso de las facies carbonosas, la componente característica se aísla entre 150-200 °C y 350-585° C (comp. A₁ en Fig. 8.11d). Por encima de esa componente, se suele observar otra componente que se aísla entre 400-525 y 475-625 °C y que se interpreta como el registro previo a la quema (Comp. B en Fig. 8.11d).

Las direcciones arqueomagnéticas medias y sus principales parámetros estadísticos asociados se muestran en la Tabla 8.3 y se representan por yacimientos en la Fig. 8.12. Para los episodios de combustión CA2, CA3 y CA4 de La Castañera no se ha podido calcular la dirección media debido a la escasez de especímenes aceptados (<4).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

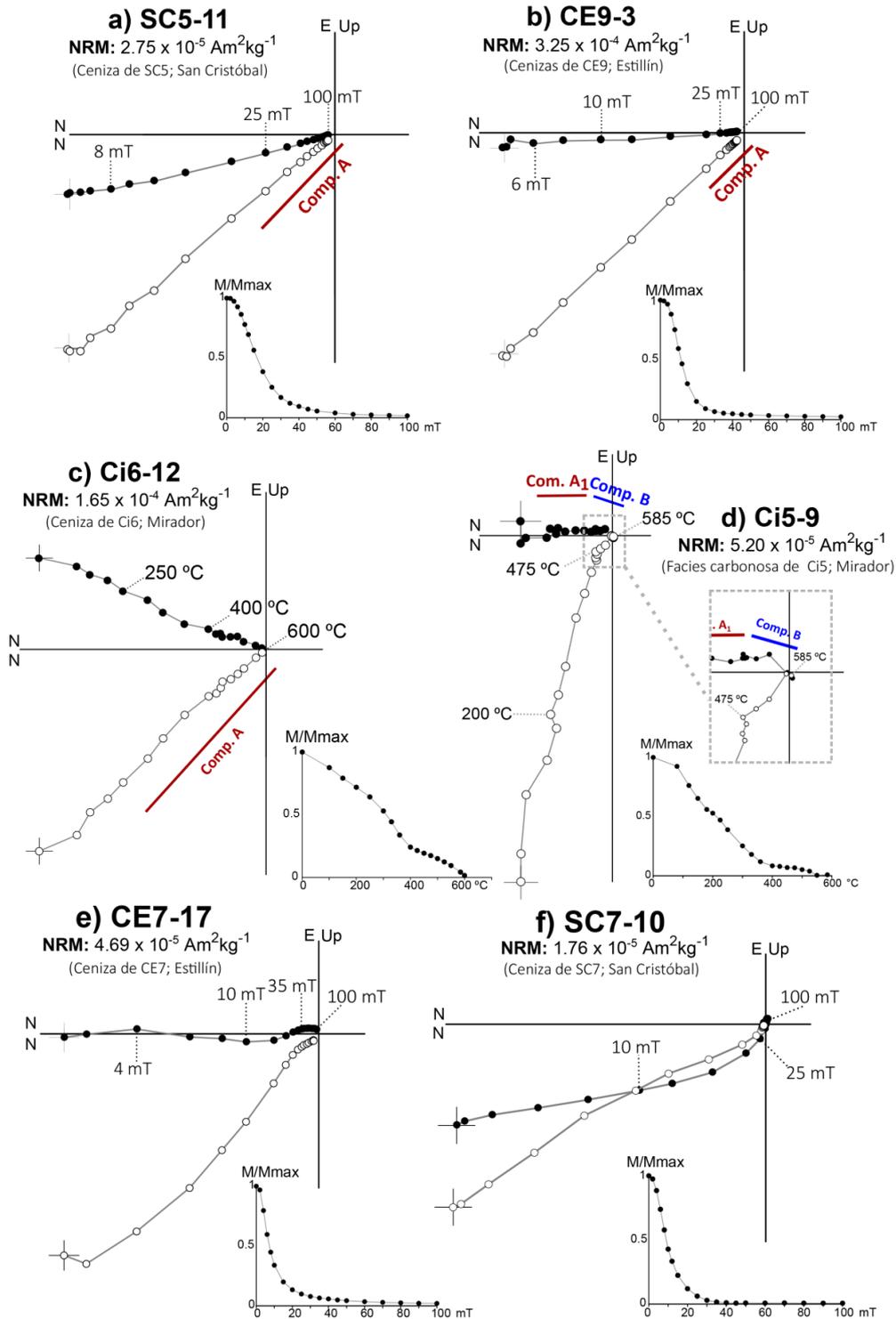


Fig. 8.11. Ejemplos representativos de diagramas ortogonales de desmagnetización de la NRM de especímenes procedentes de episodios de combustión de secuencias de *fumiers*: (a-b) especímenes desmagnetizados por campos alternos; (c-d) especímenes desmagnetizados térmicamente; (e-f) especímenes con comportamientos anómalos. Los símbolos negros representan la proyección en el plano horizontal y los blancos en el vertical. Se indica el nombre del espécimen, facies, yacimiento, intensidad de la NRM, principales pasos de desmagnetización y caída de intensidad normalizada.

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

Estructura de combustión	N/N'	Dec. (°)	Inc. (°)	<i>k</i>	α_{95}
CA1	8/19	328.8	61.3	20.3	12.6
CA2	1/13	-	-	-	-
CA3	2/12	-	-	-	-
CA4	2/14	-	-	-	-
CE6	5/17	357.6	40.4	14.6	20.7
CE7	13/20	3.6	42.0	11.0	13.1
CE8	15/17	353.3	39.3	11.9	11.6
CE9	14/19	359.7	44.3	71.2	4.7
CE10	11/28	7.5	56.5	8.75	16.4
CE11	13/22	11.3	53.7	43.6	6.4
Ci2	26/42	23.9	65.1	31.9	5.1
Ci3	24/41	28.1	58.3	78.2	3.4
Ci5	7/16	21.5	58.9	21.9	13.2
Ci6	10/16	14.1	48.5	37.6	8.0
Ci7	10/12	9.8	50.3	34.7	8.3
SC1	5/12	340.2	44.4	25.3	15.5
SC2	12/16	332.1	40.1	25.1	8.8
SC3	8/14	343.6	39.0	37.4	9.2
SC4	10/12	337.5	47.0	41.5	7.6
SC5	10/14	342.4	44.5	179	3.6
SC6	10/14	347.3	40.3	71.5	5.8
SC7	11/14	349.4	39.3	26.2	9.1
SC8	12/14	349.8	35.0	84.8	4.7
SC9	7/14	18.7	66.1	65.5	7.5
SC10	9/14	7.2	63.6	103	5.1
SC11	7/12	29.0	72.9	59.6	7.9

Tabla 8.3. Direcciones arqueomagnéticas medias obtenidas para los episodios de combustión estudiados y sus parámetros estadísticos asociados. De izquierda a derecha: nombre de la estructura de combustión; número de especímenes tenidos en cuenta para calcular la dirección media (N) vs. número total de especímenes desmagnetizados (N'); declinación; inclinación; parámetro de precisión (*k*); semiángulo del cono de error al 95% de probabilidad (α_{95}). [CA = La Castañera; CE = Cueva del Estillín; Ci = Cueva de El Mirador; SC = San Cristóbal]

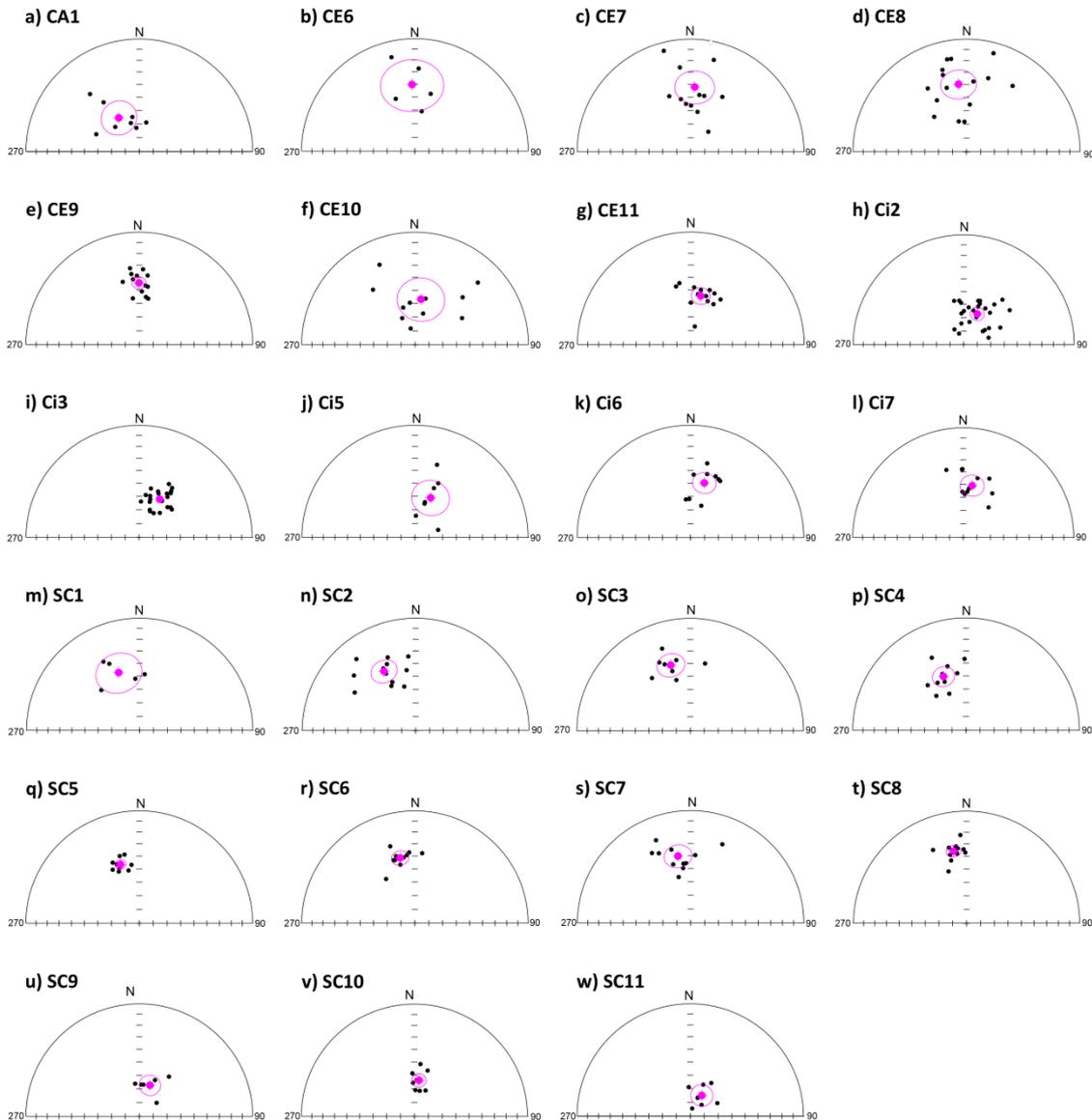


Fig. 8.12. Proyección de igual área con las direcciones medias obtenidas para los distintos episodios de combustión estudiados. En color rosa se muestran la dirección media y el cono de error al 95% de probabilidad (α_{95}) correspondiente. Los puntos negros representan las direcciones de cada uno de los especímenes tenidos en cuenta para calcular la media [CA = La Castañera; CE = Estillín; Ci = El Mirador; SC = San Cristóbal]

8.3. Calidad de las direcciones arqueomagnéticas y selección de datos

Para la actualización de la curva de variación secular, sólo se han aceptado aquellos episodios de combustión en los que la dirección media se haya calculado con al menos 6 especímenes y que tenga un $\alpha_{95} < 10^\circ$. De esta manera, quedan

excluidas las direcciones de CA1, CA2, CA3 y CA4 de La Castañera, CE6, CE7, CE8 y CE10 de Estillín, Ci5 de El Mirador y SC1 de San Cristóbal. Por otro lado, como se explicará más abajo, también se han descartado los episodios del perfil este de San Cristóbal ante la evidencia de posibles alteraciones post-quema en la zona de muestreo. En las siguientes líneas, se ofrecen más detalles acerca de la selección de los episodios de combustión y la calidad de las direcciones obtenidas.

Los malos resultados obtenidos para el Abrigo de La Castañera pueden interpretarse como el posible efecto de procesos post-quema que pudieron afectar a los episodios estudiados. Las condiciones de preservación de los episodios muestreados en términos de color (facies puras), espesor de cenizas y continuidad lateral de facies quemadas distaban de ser idóneas por nuestra experiencia. Por otra parte, durante el muestreo se detectó que la perforación podía generar deformación en los materiales debido a su falta de cohesión. Además, como se describió previamente, los resultados de la ASM de estos episodios de combustión no muestran el $K3$ vertical como era lo esperable en un contexto sedimentario (Fig. 8.10). Esto es coherente con posibles procesos mecánicos posteriores a la quema que hayan podido afectar al ordenamiento de los granos ferromagnéticos portadores de la remanencia, como por ejemplo migración o percolación de fluidos o bioturbación. Teniendo en cuenta todas estas razones, no es difícil entender los malos resultados direccionales obtenidos en este yacimiento.

Las direcciones de la Cueva del Estillín presentan características variables, oscilando los valores del parámetro de precisión k entre 8.8 y 71.2 y los de $\alpha95$ entre 4.7 y 20.7 (Tabla 8.3). CE6 es el episodio con el menor número de especímenes aceptados, y la dispersión de la dirección es muy grande. Aunque la ASM mostraba $K3$ en la vertical en todos los episodios de El Estillín, parece que CE6 es el que presenta un $k3$ algo peor agrupado (Fig. 8.7a). Además, $k1$ está bastante bien alineado y diferenciado. Ante estas evidencias, no se puede descartar algún proceso de alteración (ej.: fluidos o procesos análogos) que hayan afectado a este episodio. CE7, CE8 y CE10 presentan una mayor tasa de aceptación de especímenes, pero su $\alpha95$ es $>10^\circ$ y sus valores de k son los más bajos de la colección (Tabla 8.3). Esta mayor dispersión, observable a simple vista en el propio estereograma (Fig. 8.12c y e), sugiere algún tipo de reordenamiento de los granos por procesos como los mencionados anteriormente (ej.: migración de fluidos). CE9 y CE11 presentan parámetros estadísticos mejores ($k > 40$ y $\alpha95 < 10^\circ$; Tabla 8.3). Teniendo en cuenta la naturaleza no litificada del material estudiado, la razonablemente aceptable agrupación de las direcciones de estos tres episodios, la alta tasa de aceptación de especímenes y el hecho de haber obtenido una dirección dentro de los límites razonables para la variación secular apuntan a que los procesos post-deposicionales que hayan podido acontecer no han generado un desordenamiento caótico y masivo de estas estructuras. Por ello, consideramos CE9 y CE11 como válidos estos datos direccionales.

Los episodios de la Cueva de El Mirador muestran valores de k entre 21.9 y 78.2 y valores de α_{95} entre 3.4 y 13.2° (Tabla 8.3). Las direcciones de Ci2 y Ci3 tienen α_{95} pequeños (<5.5°; Tabla 8.3). La fábrica de estos dos episodios presenta k_1 , k_2 y k_3 muy mal definidos (Fig. 8.8a-b). Si esto se debiera a algún tipo de proceso de alteración posterior a la quema que hubiera desordenado los granos de forma severa, cabría esperar direcciones mucho más dispersas, pero no es el caso porque están razonablemente agrupadas (Fig. 8.12g-h). El episodio Ci5 presenta un $\alpha_{95} > 10^\circ$ por lo que se ha excluido para calcular la curva de variación secular (Tabla 8.3). Durante el muestreo se detectó que las cenizas de este episodio de combustión estaban bastante sueltas. Esto probablemente tenga relación con la dispersión de este dato direccional (Fig. 8.12j). Los episodios Ci6 y Ci7 presentan α_{95} menores de 10°, si bien no son tan pequeños como los de Ci2 y Ci3 (Tabla 8.3). Aunque pudiera haber habido cierta distorsión que haya empeorado la estadística de estas direcciones, en ninguna de las dos se observa una dispersión tan grande como la de los episodios excluidos de Estillín o la Castañera. En resumen, aunque la calidad es claramente mejorable, estas dos direcciones cumplen con los requisitos establecidos, por lo que han sido aceptadas.

En el Abrigo de San Cristóbal aparecen algunos de los valores más altos de k de todos los episodios estudiados, oscilando entre 25.1 y 179.1, y los α_{95} son <10° en todos ellos excepto en SC1 (Tabla 8.3). Sin embargo, es importante comentar un fenómeno observado en este yacimiento. Mientras que los episodios del perfil oeste muestran direcciones más hacia el oeste y con inclinaciones más bajas, los del este presentan direcciones que se van hacia el este y además con inclinaciones claramente más altas, existiendo diferencias de hasta 43° entre episodios muestreados en distintos perfiles (SC8-SC11) pero que teóricamente corresponden a un mismo nivel estratigráfico (Fig. 8.13). Los resultados de la ASM con el K_1 vertical son sistemáticos en ambos perfiles y no parecen explicar este comportamiento diferencial entre uno y otro.

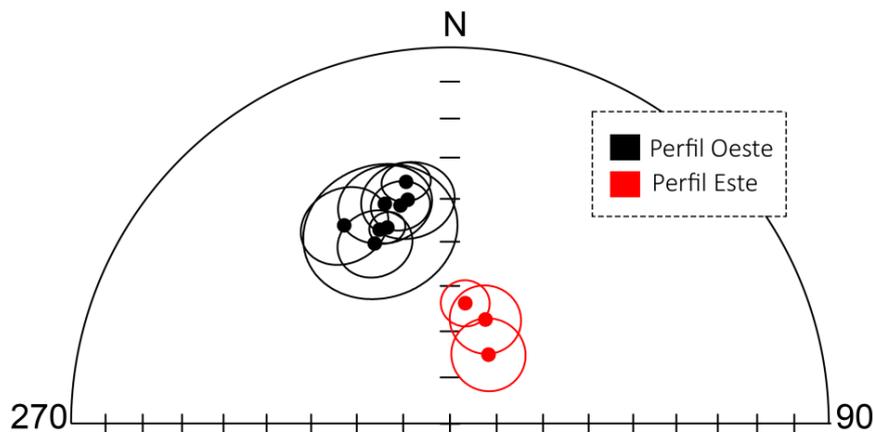


Fig. 8.13. Proyección de igual área con todas las direcciones arqueomagnéticas medias del Abrigo de San Cristóbal. En color negro, los episodios muestreados en el perfil Oeste; en rojo, los del perfil Este.

Una primera hipótesis que podría explicar esto sería que los niveles estratigráficos en los que esto ocurre (IV y VII) hayan tardado en formarse un tiempo lo suficientemente largo como para poder registrar cambios de ese calibre causados por la propia variación secular. Las dataciones ^{14}C disponibles para el nivel VII, en el que se incluyen los episodios SC6, SC9 y SC10, es de 2920-2870 cal. a.C. (Fernández-Eraso, 2002; Polo-Díaz et al., 2016). El rango temporal de esta datación es de solamente 50 años (2σ). Pero el tiempo de formación real podría ser mayor. Para realizar una estimación tan precisa como sea posible, se han evaluado las dataciones para los niveles que están justo por encima y por debajo para establecer el *terminus ante quem* y el *terminus post quem*. El nivel que está inmediatamente por debajo (VIII) está datado entre 3350 y 3020 cal. a.C. (Fernández-Eraso, 2011; Polo-Díaz et al., 2016) y referencias incluidas en ese trabajo). Para el nivel inmediatamente por encima (VI) se dispone de dos dataciones, que ubican la edad de este nivel entre 2890 y 2500 cal. a.C. (Fernández-Eraso, 2010; Polo-Díaz et al., 2016). Haciendo una estimación al alza tomando el *terminus post quem* del nivel VIII (la fecha posible más antigua: 3350 cal a.C.) y el *terminus ante quem* del nivel VI (la fecha más reciente: 2500 cal a.C.), el rango temporal máximo se amplía hasta 850 años. Si atendemos a la profundidad a la que se encontraban los distintos episodios, de más reciente a más antiguo encontraríamos en primer lugar SC9 (-301 cm), después SC6 (-296 cm) y por último SC10 (-294). La diferencia angular entre SC9 y SC6 alcanza 31.23° . Y la diferencia entre SC6 y SC10 es de 26.08° . Aunque en los últimos milenios ha habido algunos momentos de cambio rápido (p. ej., entre el 500 y el 800 d.C. o entre el 1500 d.C. y aproximadamente 1900 d.C., Fig. 8.14; o entre el 400 y el 700 a.C., Fig. 8.15), son excepcionales los cambios de la magnitud de los que aquí se han presentado. Si se tienen en cuenta las predicciones del modelo SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014) relocalizado a las coordenadas del yacimiento, para las fechas de las que estamos hablando (~ 3350 -2500 a.C.), la declinación tiende a estar al oeste todo el tiempo (alcanzando un mínimo de $\sim 344^\circ$ y un máximo de $\sim 2.5^\circ$) y la inclinación media oscila entre $\sim 39^\circ$ y 55° (Fig. 8.16). Sin embargo, la declinación de los episodios del perfil este de San Cristóbal sobrepasan con creces los 2.5° en declinación (llegando SC9 hasta casi 20°) y su inclinación está por encima de 60° . Por lo tanto, no parece ser coherente con lo esperado. Considerando si pudiera tratarse de un ligero desajuste de las fechas, se han evaluado las predicciones para los momentos inmediatamente anteriores y posteriores al rango de edad estimado. Entre ~ 3650 a.C. y 3450 a.C. hay un cambio nada desdeñable, en el que la declinación media pasa de $\sim 10^\circ$ a $\sim 350^\circ$, pero la inclinación no cambia demasiado (Fig. 8.16). Entre ~ 3550 y 3300 a.C. la inclinación sí cambia mucho (entre $\sim 60^\circ$ y 39.5°), pero entonces el cambio en la declinación es menor (entre $\sim 353^\circ$ y $\sim 2.5^\circ$). Por su parte, entre 2500 y 2000 a.C., ni la declinación (~ 353 - 6°) ni la inclinación (~ 51 - 55°) alcanzan valores muy dispares (Fig. 8.16). Si estimamos las diferencias angulares entre las direcciones con los valores máximos/mínimos de declinación e inclinación media entre 4000 a.C. y 2000 a.C.,

los resultados están por debajo de 25° . Sin embargo, las diferencias angulares entre las medias de SC6 y SC9 y entre la de SC6 y SC10 superan ese valor.

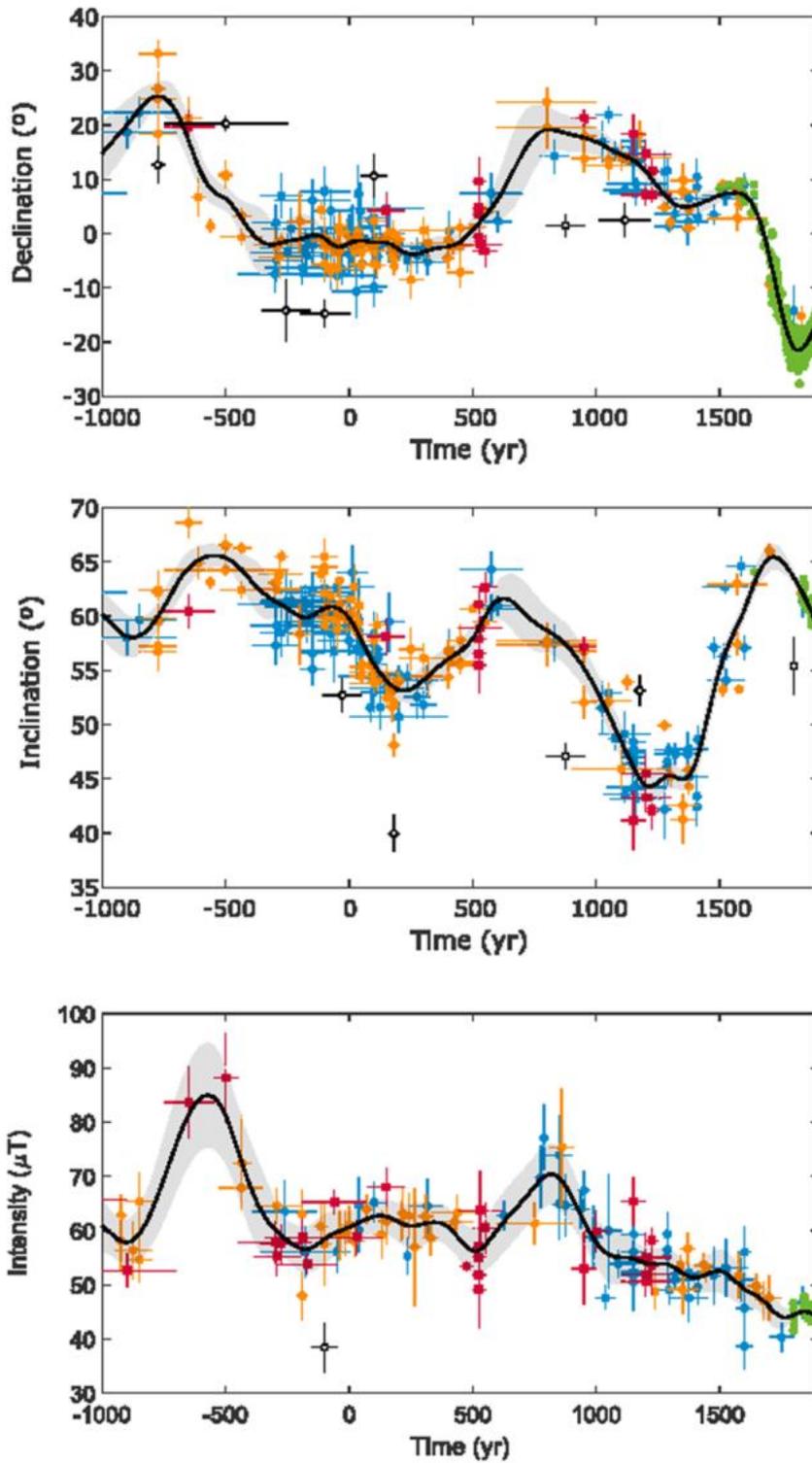


Fig. 8.14. Curva de variación secular de Iberia para los últimos 3000 años en la que se puede observar el importante cambio direccional detectado entre los años 500 y 800 d.C. y entre 1500 y 1900 d.C. De arriba abajo: declinación, inclinación e intensidad [Imagen tomada de Molina-Cardín et al. (2018)]

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

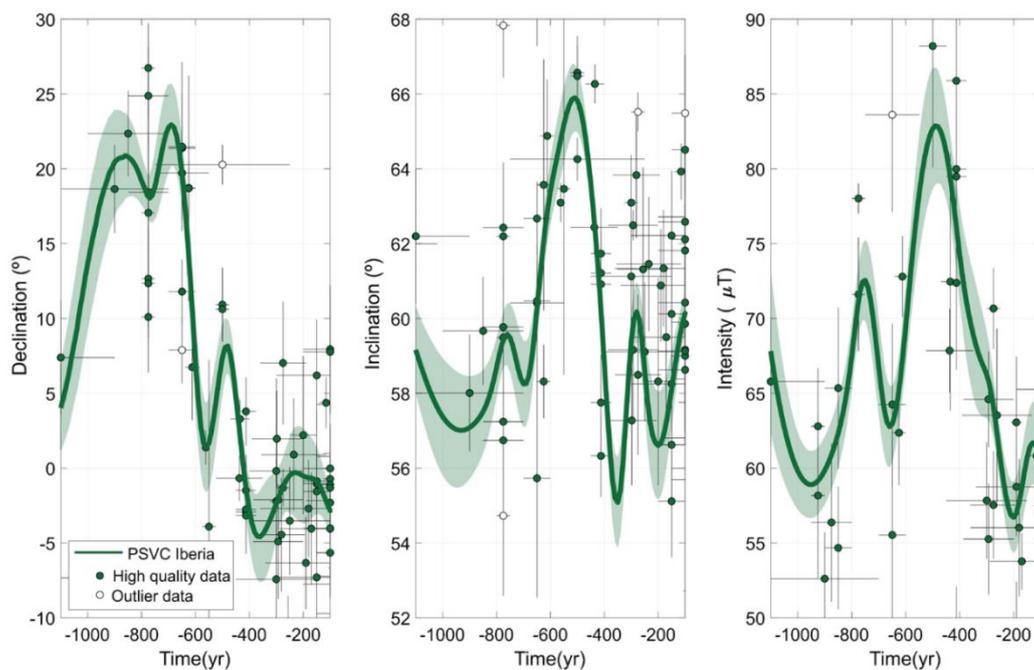


Fig. 8.15. Variación secular para Iberia en el 1er milenio a.C., donde se puede ver el gran cambio de dirección que se ha detectado entre 700 a.C. y 400 a.C. De izquierda a derecha: declinación, inclinación e intensidad. [Imagen tomada de Osete et al. (2020)]

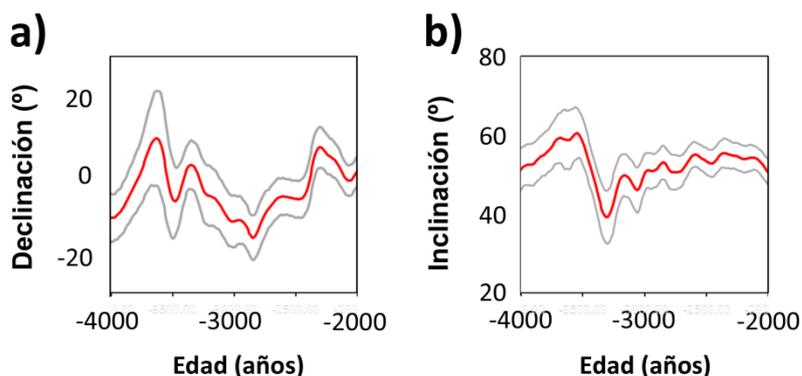


Fig. 8.16. Predicciones de la declinación y la inclinación esperadas para las coordenadas del yacimiento de San Cristóbal entre el 4000 a.C. y el 2000 a.C.

Además de lo ya mencionado, hay que decir que en el nivel IV, que es más reciente, vuelve a pasar algo similar. En este caso, según las dataciones ^{14}C disponibles, la edad del nivel estaría entre 2830 y 2470 cal. a.C. No se dispone de fechas para los niveles III y V (que son los que están inmediatamente por encima y por debajo del nivel IV respectivamente) que puedan ayudar a establecer el *terminus ante quem* y el *terminus post quem*. Por ello, se han tomado los siguientes niveles por encima y por debajo respectivamente para los que sí se tiene dataciones: nivel II y nivel V inf. Los intervalos posibles para el nivel V inferior oscilan desde 2860 hasta 2550 cal a.C. y para el nivel II, entre 2580 y 2460 cal. a.C. (Polo-Díaz et al., 2016). Considerando el *terminus post quem* del nivel V inferior (la

fecha posible más antigua: 2860 cal a.C.) y el *terminus ante quem* del nivel II (la fecha más reciente: 2460 cal a.C.), el rango se amplía hasta 400 años. El ángulo entre las direcciones medias de los episodios incluidos en el nivel IV (SC8 y SC11) es de 42.7°. Es decir, supera incluso lo observado entre los episodios SC6, SC9 y SC10.

En el caso de que el fenómeno observado se debiera al comportamiento de la variación secular, implicaría que habrían tenido lugar varios cambios bruscos a lo largo de la secuencia en un período relativamente corto (las dataciones para las unidades en las que se engloban los episodios estudiados abarcan unos 2000 años) y correspondiente a una época de estabilidad del CMT (Fig. 8.17). Por todo ello, se interpreta que el comportamiento de la variación secular no explica las diferencias entre el perfil Este y el perfil Oeste del Abrigo de San Cristóbal.

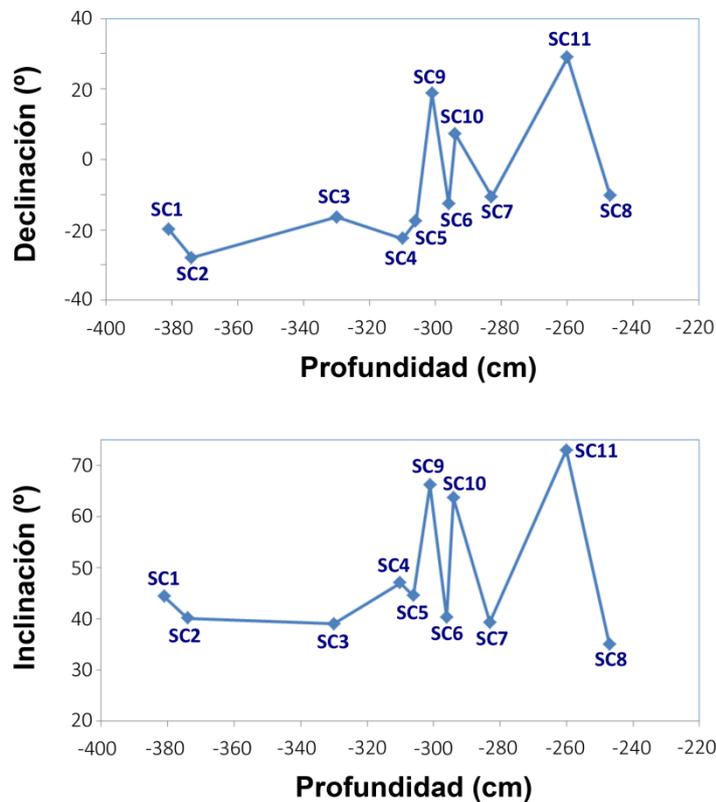


Fig. 8.17. Secuencia de los cambios en (a) declinación y (b) inclinación de los episodios de combustión del Abrigo de San Cristóbal ordenados en función de su profundidad.

Otra hipótesis que podría explicar el comportamiento observado es la existencia de algún tipo de basculamiento que haya podido afectar en bloque a la secuencia. La dirección de los buzamientos observados en cada unidad es diferente (Fig. 8.18 y Fig. 8.19). Por lo tanto, un basculamiento de toda la secuencia no explica el problema. Además, la magnitud de la diferencia entre la cota más superficial y la más profunda de cada nivel no podría explicar semejante diferencia angular (la mayor diferencia corresponde al nivel II y es de 43 cm entre su cota más superficial y la más profunda, Fig. 8.18c).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

La última hipótesis planteada para explicar el comportamiento anómalo entre perfiles es la posible preservación diferencial. Es decir, que la preservación de los eventos de combustión de un perfil sea muy diferente a los del otro. Los datos arqueológicos evidencian la existencia de una gran fosa en el perfil este que parece cortar los episodios de combustión estudiados allí, así como también aparece un negativo de un poste que corta el episodio SC11 y el hueco de una madriguera inmediatamente por encima (Fig. 8.20a-b). Esto nos lleva a desconfiar de que la preservación de los episodios del perfil este sea adecuada para fines arqueomagnéticos y utilizar con los resultados del perfil oeste, que parecen mostrar datos compatibles con los cambios generados por la variación secular (Fig. 8.13).

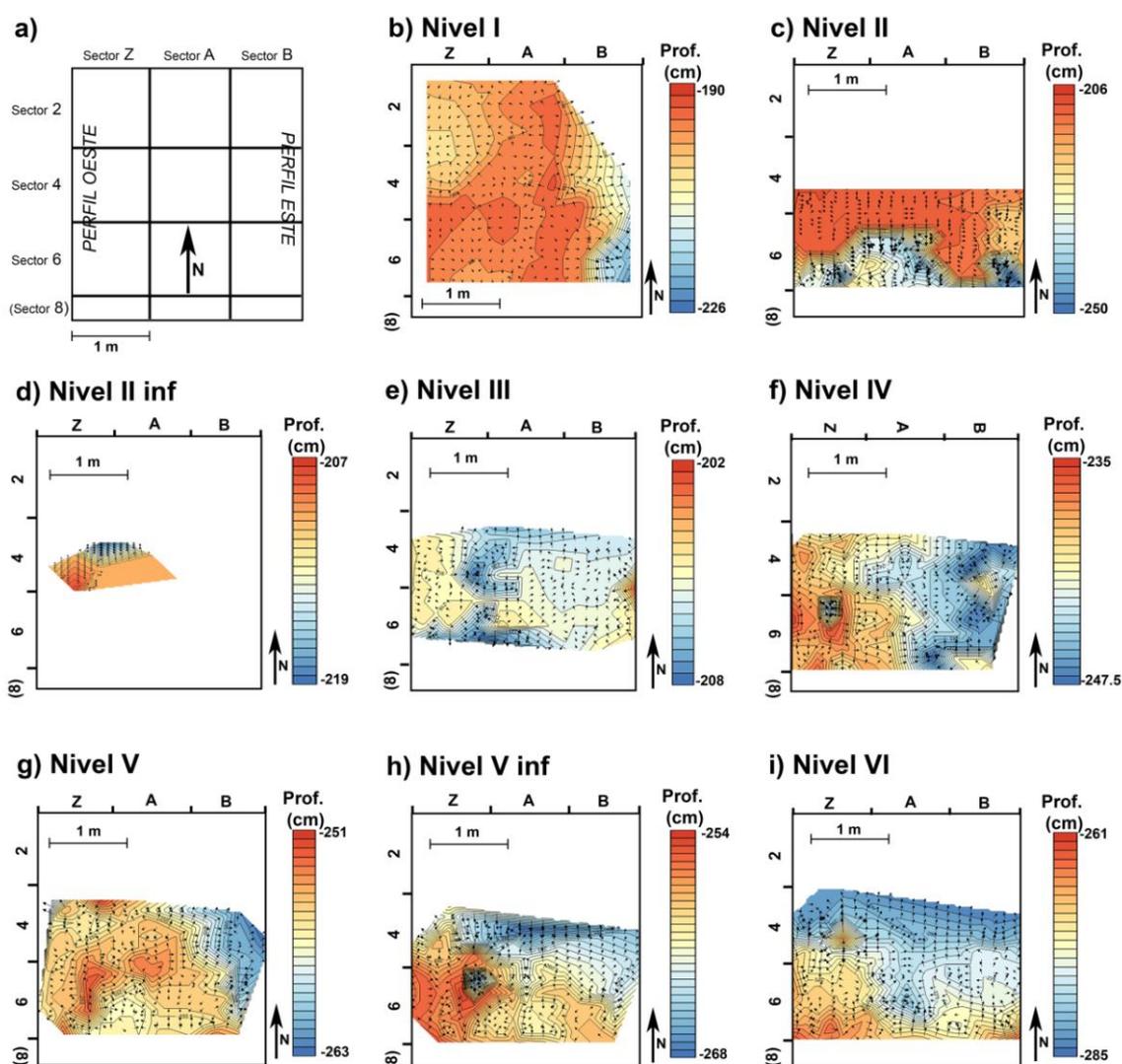


Fig. 8.18. (a-i) Mapas de relieve de las superficies de excavación de los niveles I, II, II inferior, III, IV, V, V inferior y VI del Abrigo de San Cristóbal. Apréciase la variación de cotas para cada nivel en los diferentes sectores.

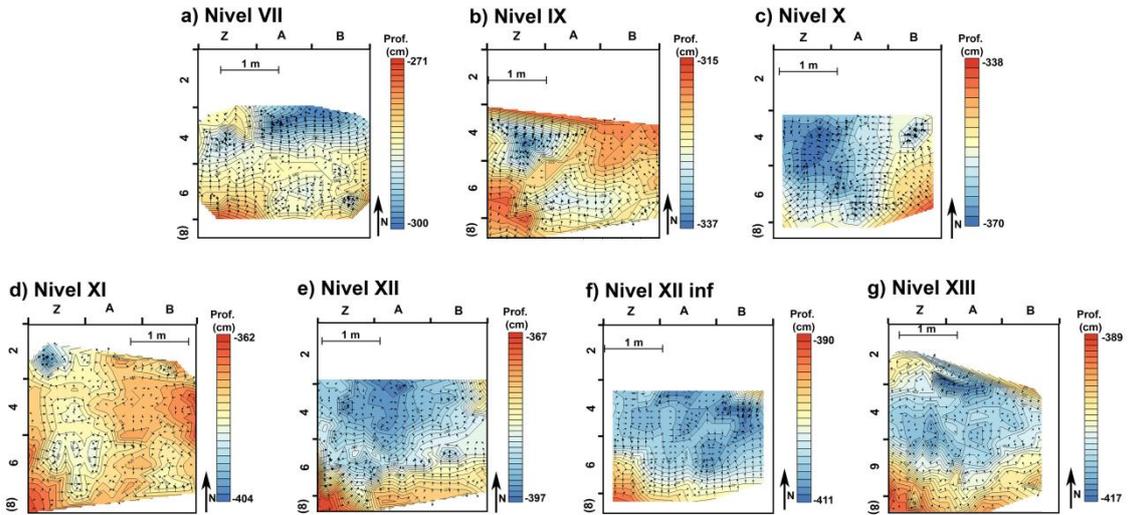


Fig. 8.19. (a-g) Mapas de relieve de las superficies de excavación de los niveles VII, IX, X, XI inferior, XII, XII inferior y XIII del Abrigo de San Cristóbal.

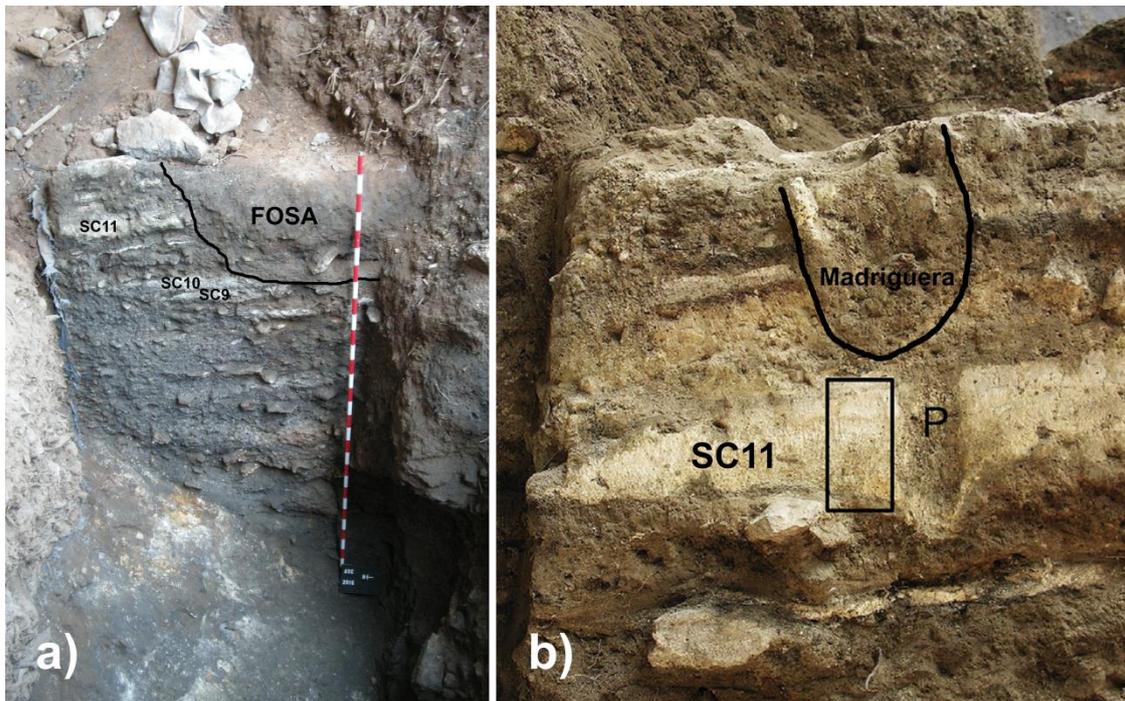


Fig. 8.20. (a) Vista general del perfil este de San Cristóbal donde se muestra la fosa y (b) vista en detalle del mismo perfil donde se indica la localización de la madriguera y el negativo de un poste (P) que corta al evento SC11. El rectángulo marca la procedencia de una muestra de micromorfología de suelos [Imagen (a) cortesía del equipo investigador de San Cristóbal; imagen (b) tomada de Polo-Díaz et al. (2016)].

Después del filtrado, se han aceptado 13 nuevas direcciones, de un total de 26 episodios estudiados (50 % de éxito). Sus valores de k oscilan entre 25.1 y 179.1 (la mediana está en 41.5). Las direcciones publicadas por Carrancho et al.

(2013) de tres cuevas peninsulares (El Mirón, El Mirador y El Portalón) presentaban valores de k que oscilaban entre 17.2 y 211.3, y su mediana estaba en 91.2. En el estudio de los episodios de combustión de la cueva de Riparo Gaban (norte de Italia) llevado a cabo por Kapper et al. (2014a), los valores de k de los episodios cuyas direcciones consideraron aceptables oscilaban entre 18.3 y 63.8 (mediana: 32.3). Por su parte, las direcciones obtenidas por Kapper et al. (2014b) en los episodios de la cueva suiza de Arconciel, los valores de k oscilaban entre 44.9 y 703.5 (mediana: 88.8). Los valores de α_{95} de las direcciones presentadas aquí oscilan 3.4° y 9.2° . Los de las cuevas ibéricas peninsulares oscilaban entre 2.6° y 12° (Carrancho et al., 2013), los de Riparo Gaban entre 5° y 13° (Kapper et al., 2014a) y los de Arconciel entre 2.8° y 9.8° (Kapper et al., 2014b). Por lo tanto, los niveles de calidad de los datos paleomagnéticos son del mismo orden de los estudios de *fumiers* publicados previamente.

8.4. La variación secular en Iberia antes del año 1000 a.C.

8.4.1. Base de datos

Se han recopilado datos direccionales provenientes de materiales arqueológicos quemados cuya fecha oscile entre aproximadamente el 6000 a.C. y el 1000 a.C., para combinarlos con los nuevos datos presentados aquí. El propósito es generar una curva de variación secular para Iberia (direccional) que permita reconstruir las variaciones en el período anterior al año 1000 a.C. Para la obtención de los datos se ha recurrido a la base de datos GEOMAGIA50.v3.3 (Brown et al., 2015, consultada por última vez en abril de 2020) y a algunas publicaciones recientes (Tabla 8.4). Tal y como se ha realizado en otros trabajos (Gómez-Paccard et al., 2006; Molina-Cardín et al., 2018; Osete et al., 2020), debido a la baja cantidad de datos disponibles para la región durante el período que estamos estudiando, además de los datos de la península ibérica, se han seleccionado aquellos que estén a un radio de ~ 900 km desde Madrid. En los trabajos más recientes y actualizados que han investigado la VS de Iberia para el primer milenio a.C. (Molina-Cardín et al., 2018; Osete et al., 2020) se han seguido criterios de selección de datos muy estrictos, que incluyen que la incertidumbre en la datación fuese $\leq \pm 250$ años (es decir, un rango temporal estimado máximo de 500 años), el número mínimo de muestras utilizadas ≥ 4 y el $\alpha_{95} \leq 5^\circ$. Sin embargo, los criterios aquí utilizados no han sido tan restrictivos, en parte condicionados por los resultados obtenidos y también por tratarse de los registros temporalmente más antiguos (fundamentalmente antes del 2000 a.C.), que es cuando mayor escasez de datos hay. Es cierto que flexibilizar los criterios introduce mayor incertidumbre en la curva pero hay que tener en cuenta dos

problemas que afectan a los registros a medida que nos alejamos en el tiempo: (1) el error de las edades asignadas suele ser mayor por las características intrínsecas de los propios métodos de datación aplicados, principalmente radiocarbono. Si bien nuestras dataciones C^{14} son muy aceptables, mayoritariamente correlativas y con desviaciones estándar muy bajas, no siempre suele ser el caso. Por otro lado, no es infrecuente que el control cronológico de materiales prehistóricos se base en métodos relativos, con la incertidumbre que ello conlleva. (2) El tipo de materiales estudiados (con anterioridad al 2000 a.C. todos los datos provienen de secuencias de *fumiers*) es el principal factor limitante. A diferencia de materiales clásicos estudiados tradicionalmente en arqueomagnetismo (ej.: hornos, termas, hogares), los eventos de combustión en *fumiers* son sedimentos quemados no litificados y susceptibles a reorganizarse ante procesos post-deposicionales severos. Esto hace que los errores esperables en las direcciones sean mayores e incluso a veces, inaceptables. A pesar de todo esto, de los 44 registros utilizados aquí, ninguno tiene menos de 4 muestras para el cálculo direccional y 20 tienen $\alpha_{95} \geq 5^\circ$ (de los cuales sólo 7 tienen $\alpha_{95} \geq 8^\circ$). Sólo en 14 registros el rango de la datación es ≥ 500 años (o, lo que es lo mismo: $\geq \pm 250$ años respecto a la media o valor más probable). Todos ellos corresponden a materiales anteriores al 2000 a.C.

Tabla 8.4. Información sobre las direcciones utilizadas para generar la curva de variación secular de Iberia entre aproximadamente 6000 a.C. y 1000 a.C. De izquierda a derecha: código identificativo dado a cada dato (SP = España; PT = Portugal; FR = Francia; MO = Marruecos), código de la referencia bibliográfica (ver nota al pie), latitud y longitud del sitio ($^\circ$), inclinación y declinación ($^\circ$), parámetro de precisión (k), número de especímenes utilizados para calcular la dirección (N), edad asignada y error asociado (en años).

ID	Ref. ²	Coordenadas del sitio		Inc. ($^\circ$)	Dec. ($^\circ$)	k	N	Edad (años)	Error edad (años)
		Latitud ($^\circ$)	Longitud ($^\circ$)						
CE11	Este trabajo	42.06	356.55	53.7	11.3	43.57	13	-4553	96
CE9	Este trabajo	42.06	356.55	44.3	359.7	71.23	14	-4090.5	558.5
Ci7	Este trabajo	42.35	356.49	50.3	9.8	34.65	10	-4456.5	85.5
Ci6	Este trabajo	42.35	356.49	48.5	14.1	37.58	10	-4456.5	85.5
Ci3	Este trabajo	42.35	356.49	58.3	28.1	78.20	24	-1610	100
Ci2	Este trabajo	42.35	356.49	65.1	23.9	31.90	26	-1610	100
SC2	Este trabajo	42.60	357.39	40.1	332.1	25.11	12	-4145	105
SC3	Este trabajo	42.60	357.39	39	343.6	37.35	8	-3185	165

² Equivalencias de los códigos de las referencias: 1 = Carrancho et al. (2013); 2= Carrancho et al. (2016a); 3 = Palencia-Ortas et al. (2017); 4 = Catanzariti et al. (2008); 5 = Hervé et al. (2013b).

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

SC4	Este trabajo	42.60	357.39	47	337.5	41.52	10	-3185	165
SC5	Este trabajo	42.60	357.39	44.5	342.4	179.05	10	-3185	165
SC6	Este trabajo	42.60	357.39	40.3	347.3	71.49	10	-2895	25
SC7	Este trabajo	42.60	357.39	39.3	349.4	26.22	11	-2720	170
SC8	Este trabajo	42.60	357.39	35	349.8	84.82	12	-2650	180
SP-01	1	42.35	356.49	58.7	10.5	95.40	19	-5510	510
SP-02	1	42.35	356.49	54.4	8.1	211.30	12	-5165	305
SP-03	1	42.35	356.49	61.0	359.9	202.00	9	-5165	305
SP-04	1	42.35	356.49	65.6	335.4	103.10	14	-5040	180
SP-05	1	42.35	356.49	51.3	17.9	136.50	9	-4795	425
SP-06	1	42.35	356.49	54.6	14.5	109.10	28	-4730	480
SP-07	1	42.35	356.49	53.3	19	157.90	11	-4730	480
SP-08	1	43.25	356.55	46.5	353.6	90.00	10	-4605	265
SP-09	1	42.35	356.49	54.4	3.2	46.70	15	-4480	230
SP-10	1	42.35	356.49	42.2	12.9	38.70	14	-4480	230
SP-11	1	43.25	356.55	52.4	345.9	123.50	9	-4420	80
SP-12	1	43.25	356.55	50.3	354.3	92.40	8	-4350	110
SP-13	1	42.35	356.49	51.7	6.3	79.50	12	-4345	105
SP-14	1	43.25	356.55	47.4	350.1	119.40	8	-4305	235
SP-15	1	43.25	356.55	49.6	357.8	17.20	10	-4305	235
SP-16	1	42.35	356.49	42.6	15.3	63.30	21	-4245	195
SP-17	1	42.35	356.49	52.8	336.8	43.80	22	-4245	195
SP-18	1	43.25	356.55	54.9	343.5	90.00	8	-4200	490
SP-19	1	42.35	356.49	56.0	357.9	50.70	10	-4060	270
SP-20	1	42.35	356.49	53.7	9.4	38.00	16	-3990	340
SP-21	1	42.35	356.49	56.0	15.2	57.40	7	-3990	340
SP-22	1	43.25	356.55	64.8	9.3	130.10	7	-2435	465
SP-23	1	43.25	356.55	54.0	346.7	51.90	10	-2435	465
SP-24	1	42.35	356.48	50.9	12.9	101.2	11	-2220	180
SP-25	1	42.35	356.48	69.7	352	67.00	19	-2105	185
SP-26	2	42.35	356.49	56.5	20.1	63.30	18	-1460	50
PT-01	3	41.26	353.14	60.1	2.4	565.00	5	-1210	92

PT-02	3	41.22	353.05	62.6	7.7	215.00	11	-1100	200
PT-03	4	37.90	352.40	56.5	21.4	305.00	17	-850	150
PT-04	3	41.22	353.05	58.0	18.6	321.00	10	-900	200
FR-01	5	45.45	0.85	65.6	351.7	287.00	15	-1160	140

8.4.2. Generación de la nueva curva de variación secular

Se han generado dos curvas de variación secular utilizando dos métodos de cálculo diferentes. En el primer caso (Fig. 8.21), se ha utilizado el programa RenCurve, con la ayuda del Dr. Philippe Lanos (Université de Rennes 1 /Institut de Recherche sur les Archéomatériaux, Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie, Université Bordeaux-Montaigne, Francia). Este programa se basa en la estadística bayesiana (Lanos, 2004) y los datos de entrada incluyen la dirección con su respectiva dispersión, la edad y su error asociado. A la hora de asignar las dataciones, considera la distribución de probabilidad de las estimaciones temporales basadas en criterios arqueológicos/históricos como uniformes y la de las dataciones de termoluminiscencia como gaussianas. Por su parte, las dataciones de radiocarbono pueden ser incluidas sin calibrar para realizar la calibración con el propio programa, que las tratará entonces como distribuciones irregulares. Además, permite incluir información estratigráfica de los datos direccionales para realizar una mejor restricción de su edad. En el caso aquí presentado, se incluyó información estratigráfica sobre los nuevos datos presentados. Además, todos los datos fueron relocalizados a las coordenadas de Madrid (40.4° N, 3.7° O). El método de cálculo de la curva se basa en funciones de *spline* cúbicas penalizadas con un parámetro de suavizado. Se tuvieron en cuenta conjuntamente declinación e inclinación, manteniendo la intensidad como una constante, y se realizaron 100.000 iteraciones (Monte Carlo Markov Chains). Para información más detallada sobre la metodología en la que se basa el programa, véanse Hervé y Lanos, 2017; Lanos, 2004; Schnepf et al., 2015, 2009). El intervalo temporal de esta curva va desde 6000 a.C. hasta 1000 a.C.

Por otro lado, con ayuda del Dr. Francisco Javier Pavón Carrasco (Univesidad Complutense de Madrid), se ha generado otra curva (Fig. 8.22) para el intervalo que va desde 5700 a.C. hasta 700 a.C., utilizando en este caso el método de *bootstrap*. Todos los datos fueron relocalizados a las coordenadas 42.4° N, 3.0° O. Al igual que para la otra curva, se consideró la posición estratigráfica relativa de los nuevos episodios presentados en este trabajo. Para calcular la curva se utilizaron funciones de *splines* cúbicos (cada 50 años y penalizados) y se tuvieron en cuenta conjuntamente declinación e inclinación. Puesto que no se disponía de

información de intensidad, se dividieron los elementos del vector magnético por el primer elemento. Para más información acerca de la metodología, véase Molina-Cardín et al. (2018). La curva final es el resultado de la combinación de 5000 curvas obtenidas a partir de la variación aleatoria de los datos magnéticos (teniendo en cuenta su α_{95}) y de sus edades asociadas (considerando el error de datación, asociando a éste un tipo de distribución según el método de datación, tal y como ocurría con la otra curva)

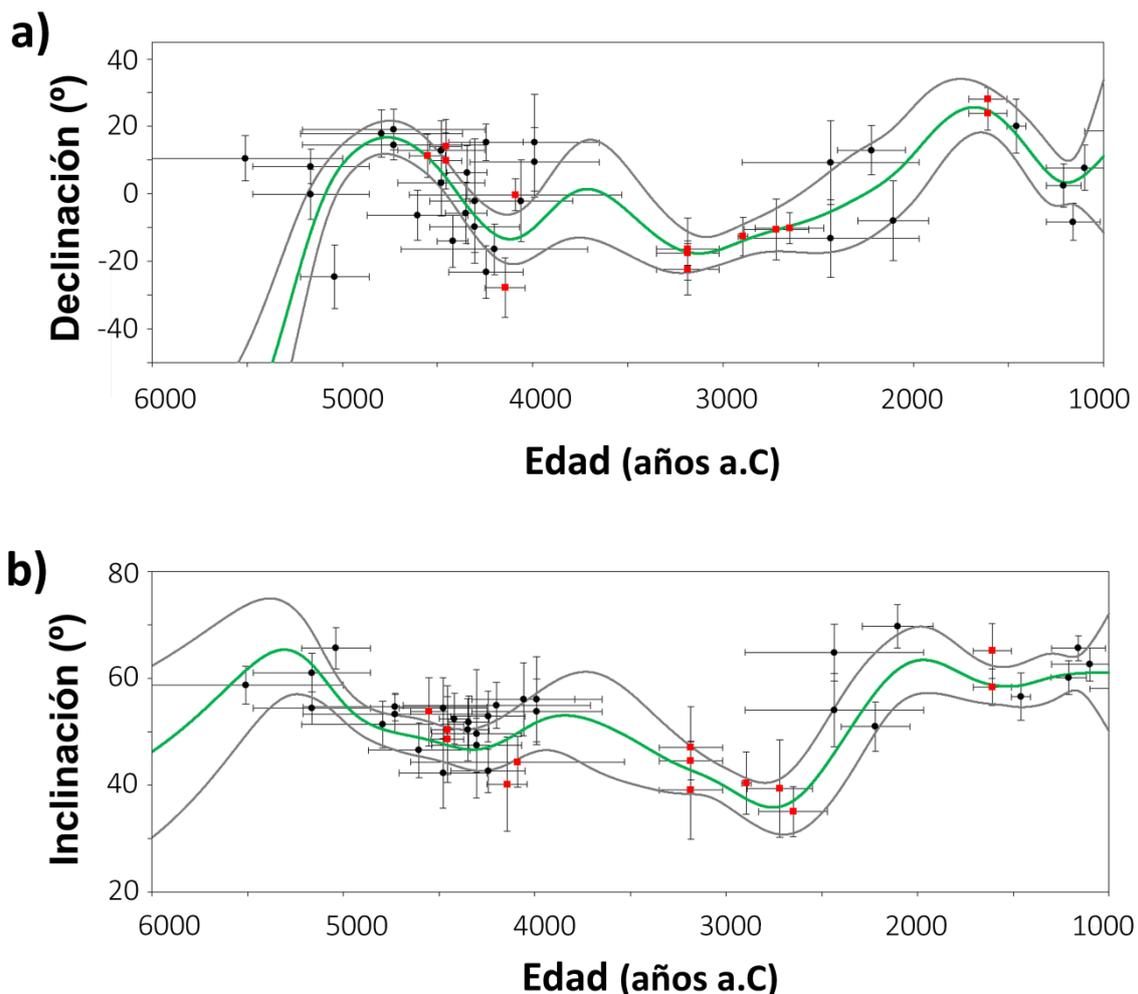


Fig. 8.21. Curva de variación secular (línea verde) con sus bandas de error a 2 sigma (delimitadas por las líneas grises) utilizando el programa RenCurve, basado en estadística bayesiana: (a) declinación y (b) inclinación. Los círculos negros representan los datos direccionales recogidos en trabajos previos y los cuadrados rojos son las nuevas direcciones aportadas por este estudio. Cada dato está representado con su error en declinación/inclinación y en la edad.

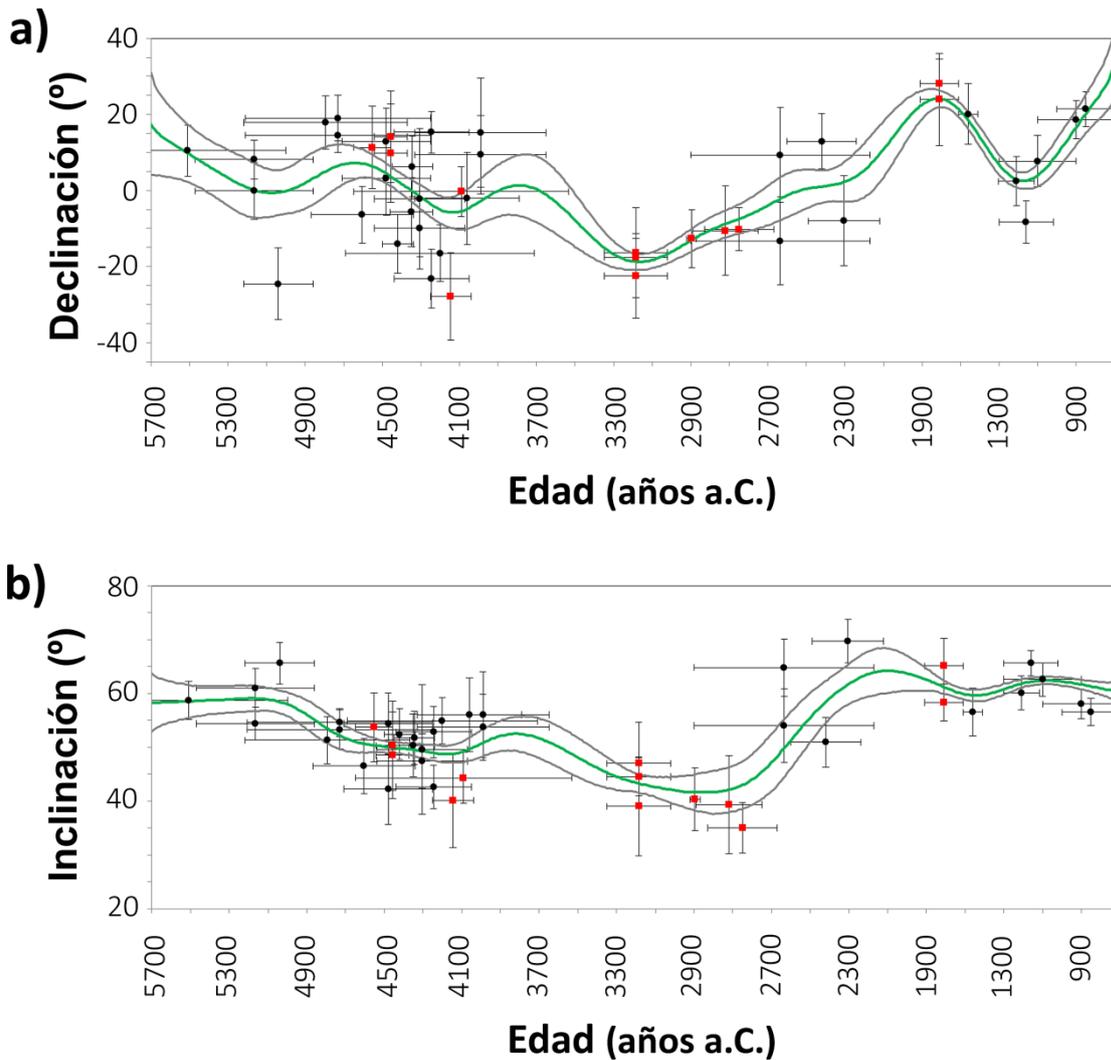


Fig. 8.22. Curva de variación secular (línea verde) con sus bandas de error a 1 sigma (delimitadas por las líneas grises) utilizando el método de *bootstrap*: (a) declinación y (b) inclinación. Los círculos negros representan los datos direccionales recogidos en trabajos previos y los cuadrados rojos son las nuevas direcciones aportadas por este estudio. Cada dato está representado con su error en declinación/inclinación y en la edad.

8.5. Discusión

8.5.1. Comparativa de propiedades magnéticas en secuencias de *fumiers*

Los resultados aquí presentados muestran algunas similitudes y algunas diferencias respecto a lo publicado en estudios previos de secuencias de *fumiers*. Al igual que observaron (Carrancho et al., 2016a; 2013) las curvas termomagnéticas

de las muestras de facies carbonosa son sistemáticamente irreversibles (Fig. 8.5g-i), mostrando un aumento de la magnetización como consecuencia del calentamiento experimental. Dicho aumento se interpreta como neoformación de magnetita. Polo-Díaz et al. (2016) identificaron en lámina delgada una microfacies negra (que correspondería a lo que aquí llamamos facies carbonosa) que incluye materiales carbonizados o parcialmente quemados y que conforma la base de los episodios de combustión. Además, interpretan que esa microfacies corresponde a la superficie del corral en el momento en que se realizó la quema de residuos. Salvando las distancias, las capas negras de los fuegos experimentales (capítulo 5) y los paleolíticos (capítulo 6) pueden ser en cierto modo equivalentes a la mencionada facies carbonosa y la interpretación del comportamiento termomagnético es extrapolable: las facies carbonosas no habrían alcanzado temperaturas tan altas como las aplicadas en el laboratorio (<600-700 °C).

En el caso de las cenizas, los datos presentados por Carrancho et al. (2013, 2012) y Kapper et al. (2014b, 2014a) muestran que el principal mineral ferromagnético es la magnetita o magnetita con escasa presencia de cationes substituyentes, y en muchos casos, las curvas termomagnéticas (temperatura *versus* magnetización) suelen ser altamente reversibles. Comportamientos similares a estos también han sido descritos entre los resultados del presente trabajo. Otro comportamiento descrito por Carrancho et al. (2013) y observado también en este trabajo ocasionalmente es la presencia de una caída hacia 250-300 °C, que en su caso relacionan con la presencia de maghemita estable o quizás una fase espinela con elevada substitución isomorfa. Que esa inflexión se pueda deber a un sulfuro ferromagnético es otra opción alternativa, pero queda pendiente de demostrar.

El comportamiento de las cenizas de CA2 (La Castañera; Fig. 8.5e) es algo muy excepcional pero resulta de interés, puesto que se puede interpretar en términos de preservación de este episodio de combustión. La importante neoformación de magnetita en el propio ciclo de calentamiento es el resultado de la transformación mineralógica al calentar materiales nada o poco quemados incorporados entre estas cenizas por algún tipo de proceso mecánico post-quema. Independientemente del proceso post-quema involucrado, estas cenizas no son puras y en condiciones normales, se esperaría que mostraran una alta reversibilidad termomagnética. Los bajos valores de NRM y Q_n ratio, además de los resultados de la desmagnetización de la NRM y los de la ASM, soportan esta hipótesis.

Hay un comportamiento termomagnético detectado en las cenizas del presente trabajo y que no ha sido comentado en estudios previos. Las muestras de ceniza presentan en ocasiones un pico de aumento de magnetización hacia 200 °C (ej.: Fig. 8.5c-d) que también se detectó en materiales de otros capítulos previos (materiales no quemados de la unidad X de El Salt y de otros niveles del mismo

yacimiento estudiado para identificar posible alteración térmica; capítulos 6 y 7 respectivamente). Teniendo en cuenta que la curva de calentamiento y enfriamiento son muy similares pero el pico de aumento hacia 200° C sólo aparece en el calentamiento, se descarta la posibilidad de que este comportamiento pueda responder a la fase HCSLT (López-Sánchez et al., 2017; McIntosh et al., 2007)(véase el discusión del apartado 6.4.2).

Otra hipótesis es la propuesta por Day (1975). Este autor identificó picos similares en titanomagnetitas sintéticas, lo cual interpreto como el efecto de la saturación de la muestra. Como el campo aplicado durante el experimento tampoco saturaba la muestra, Day interpretó que los picos eran el efecto de la reorganización de granos ferromagnéticos a favor del campo aplicado a medida que se iban desbloqueando por el aumento de la temperatura. No parece que sea el caso de las muestras aquí presentadas, pues justo antes de iniciar el calentamiento, se aplicó a la muestra un campo de 1 T en la misma dirección del campo inductor durante el experimento, por lo que cabe esperar que la muestra esté saturada (predominan minerales de baja coercitividad).

Otra posible explicación es que este pico corresponda a la transición λ de la pirrotina hexagonal (Fe_9S_{10}) (Dunlop y Özdemir, 1997 y referencias incluidas en ese texto). Pero la pirrotina suele alterarse a altas temperaturas. Se esperaría, por tanto, que la curva de enfriamiento fuera diferente a la del calentamiento. (Torres-López et al., 2014; Villalaín et al., 2014) muestran ejemplos en los que la pirrotina no se destruye. Pero de tratarse de esto, se debería de ver la inflexión debida a su temperatura de Curie al enfriar y no es el caso.

La greigita natural, aunque no presenta un pico como tal, suele mostrar cierta inflexión hacia 200-300° C. Ahora bien, este mineral se suele alterar a temperaturas un poco mayores (Roberts et al., 2011 y referencias incluidas en ese texto).

Una última opción es que el fenómeno observado corresponda a una doble transformación que no se puede identificar por ahora pero que seguiría la siguiente secuencia: (1) hacia 200° C se genera un nuevo mineral que adquiere una magnetización inducida mayor que la de los minerales pre-existente y genera el pico; (2) a medida que la temperatura sigue aumentando, esa fase se destruye (se convierte en otro mineral o fase), haciéndose invisible ya en la curva de enfriamiento. Sin embargo, por ahora no se han identificado minerales que pudieran desencadenar este comportamiento.

Por último, cabe discutir la fábrica magnética de algunos episodios de combustión, cuyo comportamiento puede estar directamente relacionado con la mineralogía ferromagnética. La fábrica anómala observada en San Cristóbal, con los ejes *k1* bien agrupados en la vertical (Fig. 8.9), podría interpretarse como una

fábrica inversa causada por granos monodominio estables (SSD, *stable single domain*). Aunque posible en algunos casos puntuales, esta hipótesis no ha podido ser confirmada como la explicación generalizada de la fábrica anómala. La AARM no registra en muchos casos un elipsoide con los ejes intercambiados de manera clara. Además, teniendo en cuenta lo bien definido que están los ejes $k1$ en la ASM, para asumir una fábrica inversa habría que suponer que la influencia de los minerales paramagnéticos sería mínima, al igual que la de los ferromagnéticos que no se restringiesen al tamaño de los SSD. Es decir, que tendríamos granos ferromagnéticos únicamente en el rango de tamaño de SSD. Esto choca con los resultados de los diagramas de Day de los materiales de San Cristóbal, que sugieren la presencia de granos PSD y/o mezcla de SD + MD (Fig. 8.6), si bien es cierto que la interpretación de este diagrama ha de ser tomada con cautela (véase, p. ej.: Roberts et al., 2018).

Otra posible hipótesis guarda relación con procesos mecánicos post-quema, (como la infiltración de agua u otros fluidos) que hubiesen reorientado más o menos verticalmente los granos. La hipótesis de reorganización vertical de los granos tampoco puede ser demostrada. De tratarse de una mera cuestión mecánica que hubiera reorganizado los granos verticalmente, cabría esperar que la AARM también mostrara esa orientación preferencial de manera más o menos clara, y no es el caso. Otra opción sería que la verticalización de los granos pudiera deberse a algún proceso sin-quema (coetáneo a la quema). Sea como sea, los datos disponibles no permiten discernir la causa exacta del comportamiento observado. Son necesarios futuros análisis más detallados para resolver esta cuestión.

8.5.2. El comportamiento de la variación secular en Iberia entre el 1000 a.C. y el 6000 a.C.

Las curvas de variación secular direccional que se presentan aquí (Fig. 8.23a-b) son las primeras específicas para la península ibérica para fechas tan antiguas. Carrancho et al. (2013) propusieron una curva de variación secular (direccional) a nivel europeo en la que incluyeron 26 datos de la península ibérica entre el 1000 y el 6000 a.C. Sin embargo, es una curva con importantes vacíos temporales y con un notable sesgo geográfico de datos, ya que la gran mayoría proceden de Europa oriental (Fig. 8.23c). En los últimos años, son varios los trabajos que han estudiado de manera bastante detallada las variaciones del campo magnético terrestre durante el primer milenio a.C. en Iberia (Gómez-Paccard et al., 2019b; Molina-Cardín et al., 2018; Osete et al., 2020, 2016). Sin embargo, antes de año 1000 a.C., como se ha comentado con anterioridad, hay muy pocos datos. A pesar de los aquí aportados, las curvas siguen presentando una baja resolución, con tramos en los que sigue habiendo una notable escasez de datos (ej.: IV milenio a.C. Fig. 8.23a-b). Aun así, supone un paso importante hacia la mejora de

los registros disponibles para el conocimiento de la variación secular en la región, así como para la progresiva mejora de modelos geomagnéticos y merece la pena mencionar al menos algunas cuestiones generales.

A pesar del limitado número de datos incorporado a las curvas, parece que reflejan algunas de las principales tendencias observadas en la curva europea de variación paleosecular de Carrancho et al. (2013) (Fig. 8.23c) y las predichas por el modelo geomagnético SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014) (Fig. 8.23d). Ambos utilizan exclusivamente datos portadores de termorremanencias excluyendo datos sedimentarios, cuyo efecto de suavizado sobre las variaciones del campo magnético terrestre es bien conocido (p. ej.: Panovska et al., 2015). Ambos igualmente comparten buena parte de los datos con la curva aquí presentada ya que no son muchos los nuevos datos disponibles para antes del 1000 a.C., por lo que al menos ciertas similitudes eran esperables. En cualquier caso, los nuevos datos parecen coherentes en términos generales.

Antes del 5000 a.C. se observa un mayor nivel de incertidumbre en las curvas realizada con la metodología bayesiana en comparación con periodos posteriores, debido fundamentalmente a la carencia de datos. Entre el 5000 y el 4500 a.C., la declinación muestra una tendencia hacia el este en ambas curvas, mostrando un máximo de unos 20° en torno el 4700 a.C (Fig. 8.23a-b). Entre el 4500 y el 4000 a.C., irá progresivamente moviéndose hacia el oeste hasta alcanzar un valor medio de cerca de 350° en el 4000 a.C. La tendencia general de la inclinación es reducirse progresivamente desde el 5000 a.C. hasta llegar a valores medios de ~47-49° en torno al 4300 a.C, para a continuación aumentar muy ligeramente hasta *ca.* 3.850 a.C. En la curva de Carrancho et al. (2013) (Fig. 8.23c) y el modelo SHA.DIF.14k (Fig. 8.23d) se detectan diversos picos en el V milenio a.C que no se ven en la nuevas curvas, lo cual está relacionado con la baja densidad de datos disponibles para Iberia (Fig. 8.23a-b). No obstante, cabe mencionar que la mayoría de datos de la curva de Carrancho et al. (2013) proceden de Europa oriental, Bulgaria principalmente. Si bien las tendencias generales entre ambas curvas deberían ser similares como es el caso, algunas de las variaciones de corto periodo observadas en la curva europea (Fig. 8.23c) no tienen por qué verse en la curva ibérica por la procedencia geográfica de esos datos. Algo similar sucede con el modelo SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014), cuyos datos de entrada presentan carencias parecidas para las zonas europeas occidentales en los periodos más antiguos. El tramo correspondiente al IV milenio a.C. (*ca.* 4000 – 3000 a.C) está muy mal representado en las curvas ibéricas, aunque se aportan 3 datos nuevos (Fig. 8.23a-b). El modelo SHA.DIF.14k muestra fluctuaciones más marcadas en este milenio (Fig. 8.23d), pero se requieren nuevos datos para confirmar su evolución en Europa occidental. Lo que sí se ve es que para 2800-2700 a.C la inclinación alcanza los valores más bajos de toda la serie (Fig. 8.23a-b). Ese mínimo en inclinación en la curva ibérica no coincide ni con lo que define la

curva europea (Fig. 8.23c) ni con el modelo SHA.DIF.14k (Fig. 8.23d). Sin embargo, está sugerida por seis datos inéditos que incorpora este trabajo a la curva ibérica, procedentes del abrigo de San Cristóbal. Conviene recordar además que, para esa edad, la curva europea no tiene ni un solo dato de Europa occidental (Fig. 8.23c) y algo similar sucede con el modelo SHA.DIF.14k (Fig. 8.23d). Este mínimo en inclinación podría ser un comportamiento específico de la variación secular en Europa occidental, pero son necesarios más datos para poder confirmarlo.

Entre aproximadamente el 3100 y el 1700 a.C., la declinación se desplaza progresivamente hacia al este (Fig. 8.23a-b), una tendencia que coincide en líneas generales con lo definido por los otros modelos. Entre el mínimo en inclinación descrito en torno al 2800 a.C. y el 2000 a.C., la inclinación aumenta progresivamente hasta alcanzar valores medios máximos cercanos a los 65° (Fig. 8.23a-b). Viéndolo en detalle, la tendencia no es del todo coincidente con lo definido por la curva europea (Fig. 8.23c) y el modelo SHA.DIF.14k (Fig. 8.23d), pero son aún muy pocos los datos para describir estas variaciones con precisión. En lo que respecta al II milenio a.C. (2000 – 1000 a.C), el patrón en declinación e inclinación es razonablemente similar en los cuatro tipos de registros en términos generales, si bien es cierto que existen diferencias en la declinación en comparación sobre todo con el modelo SHA.DIF.14k (Fig. 8.23d), que es mucho más detallado.

Como se viene advirtiendo, los resultados aquí presentados aún son escasos y sigue habiendo grandes vacíos para algunos períodos, pero las tendencias generales observadas están en consonancia con lo mostrado por la curva europea y el modelo geomagnético SHA.DIF.14k. Las nuevas direcciones son valiosas porque van aportando información en tramos cronológicos donde no había ningún dato para la península ibérica. De este modo, ayudan a corregir el sesgo geográfico existente en las bases de datos geomagnéticas donde los datos de Europa oriental para estas cronologías son mayoritarios. La compilación progresiva de nuevos datos arqueomagnéticos de estas cronologías ayudará a conocer con más detalle la variación secular y a mejorar los modelos geomagnéticos existentes, que ya se usan para las dataciones arqueomagnéticas.

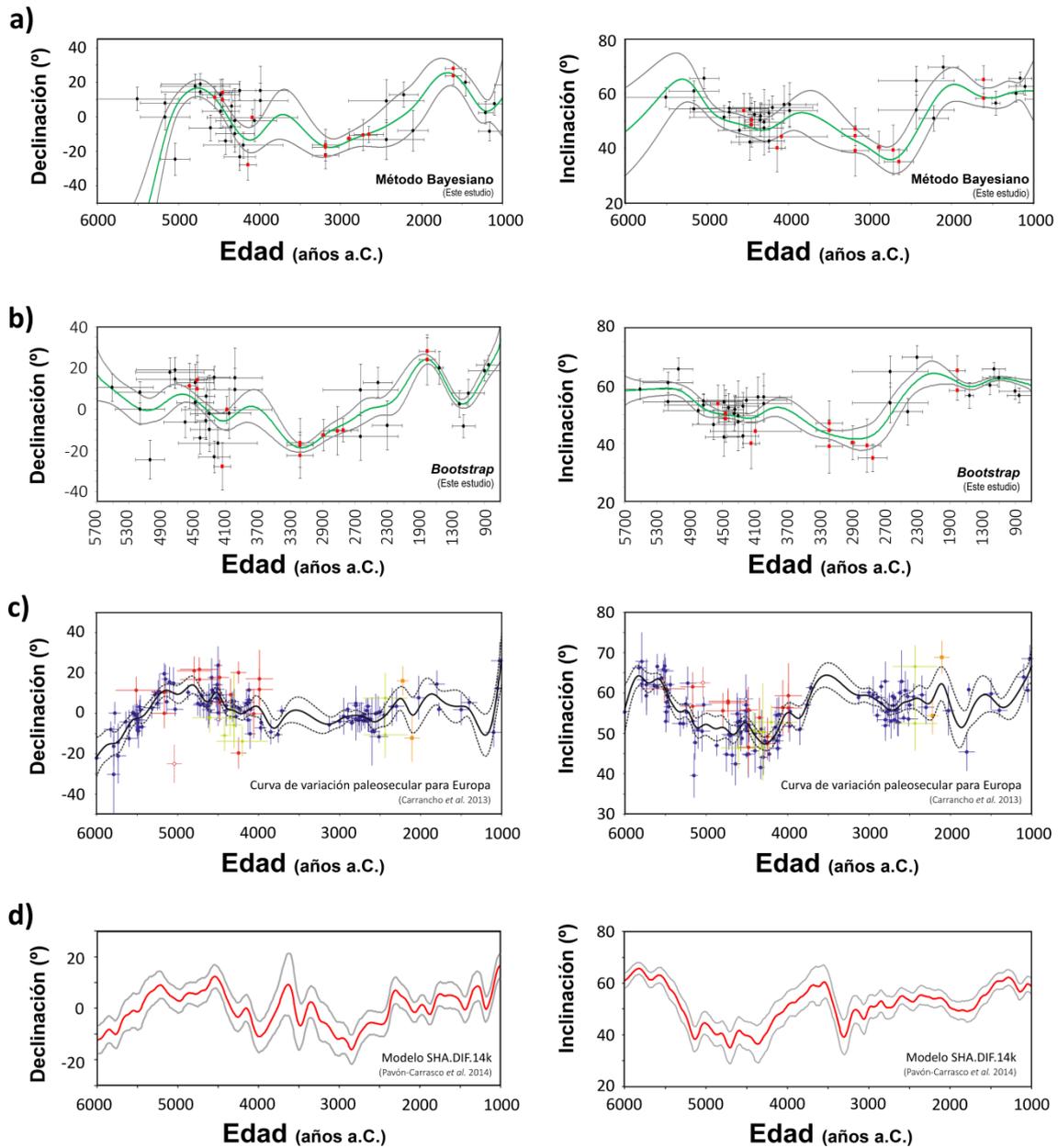


Fig. 8.23. (a-b) Nuevas curvas de variación secular para Iberia presentadas en este trabajo y generadas usando (a) la aproximación bayesiana y (b) *bootstrap* respectivamente; (c) curva de variación paleosecular para Europa (Carrancho et al., 2013); (d) predicción del modelo SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014) para las coordenadas de Madrid. Los datos de (a) y (d) están relocalizados a las coordenadas de Madrid (40.4 N, 3.7 O); los de (b) están relocalizados a las coordenadas 42.4° N, 3.0° O; y los de (c) a 43.0 N, 11.0 E. [Imagen (c) modificada a partir de Carrancho et al. (2013)]

8.5.3. El potencial arqueomagnético de las secuencias de *fumiers*: límites y posibilidades

Las secuencias de *fumiers* son un material relativamente desconocido aún en el ámbito arqueomagnético. Se trata de secuencias estratigráficas más o menos continuas, antiguas, con múltiples episodios de combustión, generalmente bien datadas por métodos radiométricos y ampliamente distribuidas en el área mediterránea. Todo ello las convierte en materiales de interés para estudios arqueomagnéticos. Sin embargo, la dificultad para obtener múltiples especímenes orientados con precisión en materiales no litificados y minimizar en lo posible el impacto del muestreo, seguramente ha condicionado su estudio. Carrancho et al. (2013) demostraron el potencial de las secuencias de *fumiers* para obtener datos direccionales y mejorar las curvas de variación secular para una época mal cubierta como es la prehistoria reciente. También Kapper et al. (2014b, 2014a) fueron capaces de obtener direcciones a partir de sedimentos holocenos quemados en cuevas en Centroeuropa e incluso se han logrado determinaciones de arqueointensidad en cerámicas de estas secuencias (Kapper et al., 2015). Sin embargo, los resultados aquí presentados evidencian que la tasa de éxito a la hora de obtener datos direccionales a partir de secuencias de *fumiers* es claramente más baja que la de cualquier otro estudio arqueomagnético en materiales tradicionales. La tasa de éxito obtenida en este trabajo es del 50% (13 direcciones medias de 26 episodios estudiados). Carrancho et al. (2013) obtuvieron una tasa del 67 % (26 datos de 39 episodios estudiados). Kapper et al. (2014a) obtuvieron buenos resultados del 60% de los niveles que estudiaron, y dentro de estos, rechazaron el 17% de los especímenes. En Kapper et al. (2014b) se calcularon direcciones de todos los episodios estudiados, pero cerca del 65% de los especímenes procesados fueron descartados. Lo que parece claro es que el mayor o menor éxito está directamente relacionado con la naturaleza de estos episodios y su estado de preservación. Las cenizas son fáciles de remover una vez que quedan depositadas. Si bien es cierto que el hecho de encontrarse dentro de abrigos y cuevas les ofrece una protección que no tienen las estructuras de combustión al aire libre, es innegable que en estos contextos suceden procesos post-deposicionales que pueden afectar el registro magnético. Procesos como *trampling* (pisoteo), apilamiento de cenizas, bioturbación animal o filtración de fluidos son algunos de los fenómenos documentados en contextos de este tipo. Muchos de esos procesos son detectables visualmente en el campo, pero otros, no. Si excluyésemos algunos de los episodios de La Castañera, que en el campo mostraban algunas evidencias que hacían sospechar de que pudieran estar afectados por algún tipo de alteración mecánica causada procesos post-deposicionales, nuestra tasa de éxito sería del 59%. Y si excluimos además los 3 eventos alterados del perfil Este de San Cristóbal, ascendería al 68%. Es decir, ser selectivos con qué se muestrea en el campo es muy

importante. El problema está en identificar qué estructuras puede estar alteradas, ya que no es siempre sencillo ni evidente.

De todo lo aquí expuesto se extraen un par de ideas generales importantes a la hora de trabajar con este tipo de materiales:

- 1) Los episodios de combustión de las secuencias de *fumiers* son candidatos para obtener direcciones del CMT en el pasado. Ahora bien, la tasa de éxito de los análisis arqueomagnéticos es baja en comparación con la de otros materiales tradicionales y, en todo caso, está sujeta a que los episodios estudiados estén mínimamente bien conservados. Sin embargo, a pesar de las bajas tasas de éxito los datos tienen un valor indudable y no existen alternativas para obtener datos geomagnéticos de calidad similar en estas áreas y edades.

- 2) Es muy importante verificar en el campo que los episodios estén bien preservados, presenten tanto cenizas como la facies carbonosa y/o de rubefacción subyacente, tengan continuidad lateral y no muestren geometrías irregulares indicativas de alteraciones (ej.: truncamientos, madrigueras, apilamiento de cenizas, etc.). Sin embargo, la aparente buena preservación macroscópica de episodios de combustión en *fumiers* no asegura que cuando se realicen análisis arqueomagnéticos (muy sensibles incluso a pequeñas alteraciones mecánicas, especialmente susceptibles de suceder en las cenizas), los resultados sean necesariamente buenos. Como se ha comentado, pueden existir diversos procesos que afecten parcialmente a la estructura de combustión a escala microscópica sin necesidad de remover los materiales por completo o al menos sin llegar a afectarlo de una manera evidente y visible en el campo. Sin embargo, una detallada observación en el campo es siempre muy necesaria. Aunque no garantiza buenos resultados arqueomagnéticos, sí aporta información de interés arqueológico ya que demostrar que algo no está *in situ* (s.s.), puede comprometer la interpretación cultural del registro arqueológico.

- Estas observaciones no implican que haya que descartar estos materiales para la aplicación del arqueomagnetismo, pues no necesariamente tienen por qué arrojar malos resultados y se trata de materiales muy valiosos para evaluar el comportamiento de la variación secular en la prehistoria reciente. Esta reflexión pretende resaltar que pueden presentar problemas de conservación, pero que requieren un estudio específico para cada caso concreto. Además de la observación exhaustiva de estos episodios en el campo, la aplicación de otras técnicas como la micromorfología de suelos (si están disponibles) quizás puedan contribuir a seleccionar de forma más adecuada qué episodios o qué zonas concretas de éstos interesan. Un denso muestreo que cubra todo el episodio de combustión contribuirá a detectar qué partes puedan estar alteradas. Es evidente que los depósitos de *fumiers* tienen sus limitaciones y los resultados que mostramos así lo reflejan. Sin embargo, son secuencias que, por su antigüedad,

8. Estudios arqueomagnéticos en secuencias de *fumiers*

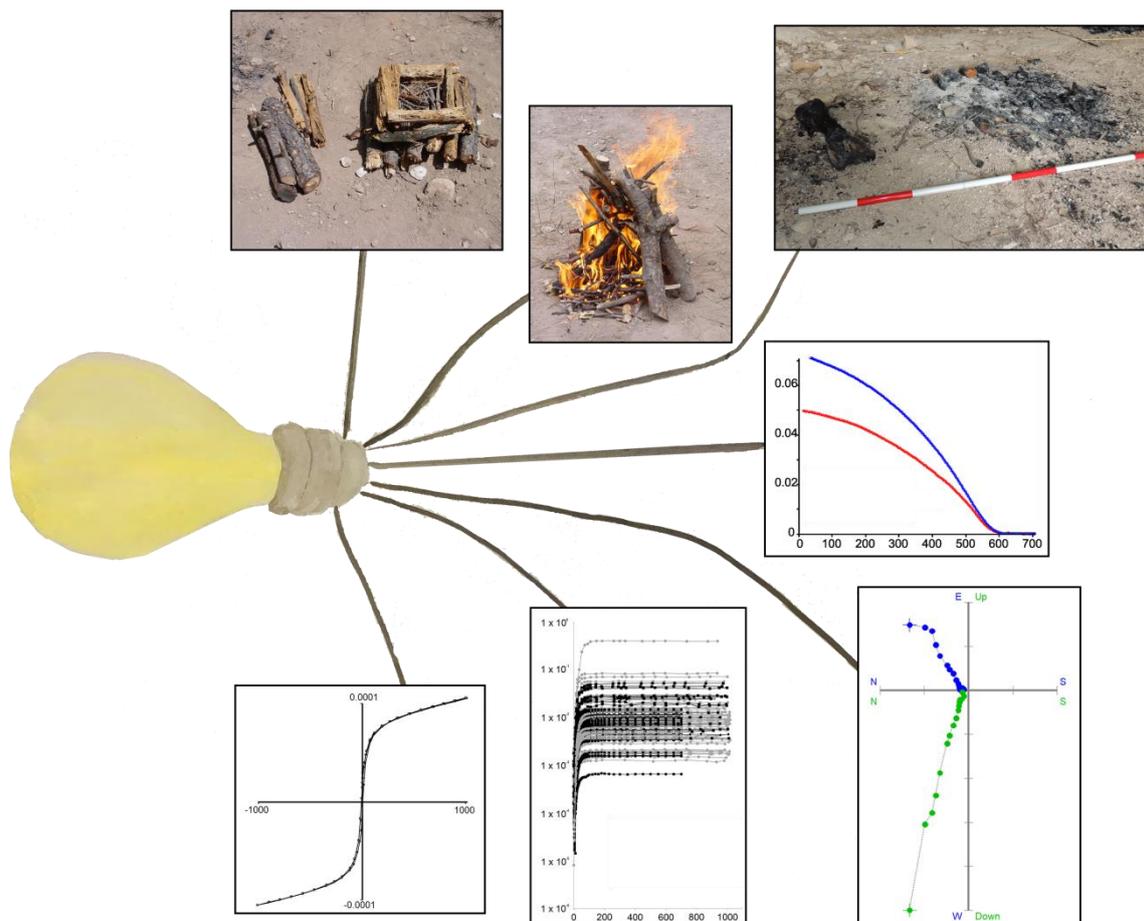
buen control cronológico y amplia distribución geográfica, merece la pena investigar. Si los episodios de combustión están razonablemente bien preservados, es posible obtener información de las variaciones direccionales del CMT en el pasado.

9. Discusión general

9.1. El registro arqueomagnético de los materiales prehistóricos quemados: cuestiones interpretativas.

9.2. Utilidad del arqueomagnetismo en contextos prehistóricos: aplicaciones geocronológicas y geoarqueológicas.

9.3. ¿Materiales *in situ*? La versión arqueológica frente a la de los análisis arqueomagnéticos.



A lo largo de los cuatro capítulos anteriores se han expuesto los resultados de los distintos contextos de estudio, con sus respectivas discusiones específicas para cada uno de ellos. Ahora bien, cuando se observan todos los resultados en conjunto, existen algunas cuestiones transversales que merece la pena comentar. Todas ellas se resumen brevemente a continuación.

9.1. El registro arqueomagnético de los materiales prehistóricos quemados: cuestiones interpretativas

Todos los materiales arqueológicos quemados sobre los que se aplican análisis arqueomagnéticos comparten una hipótesis de trabajo común: el calentamiento como origen del registro de la magnetización. Además, la mineralogía magnética predominante suele ser muy parecida, siendo la magnetita (o, en ocasiones, maghemita) y la hematites los principales portadores de la remanencia. Incluso cuando se representan los ratios de histéresis en el diagrama de Day, en muchos de los materiales quemados se detecta cierta homogeneidad que en buena parte puede estar causada por el calentamiento (véanse, p. ej., el caso de los materiales no quemados y los quemados de los fuegos experimentales de NFT; Figs. 5.5 y 5.9 del capítulo 5). Los resultados expuestos en los anteriores capítulos también apuntan en esa dirección. Pero, a pesar de estas características básicas frecuentes, existen diferencias importantes en los distintos contextos que tienen implicaciones tanto arqueomagnéticas como arqueológicas. Para entrar a discutir estas cuestiones, es importante recordar tres aspectos determinantes en la señal arqueomagnética de los materiales quemados: (1) características de los materiales originales antes de la quema, (2) condiciones de la quema y (3) procesos post-quema.

Los materiales parentales (materiales pre-quema) afectan directamente a la señal magnética resultante. Esto es de vital importancia cuando se trabaja en cronologías tan antiguas como las prehistóricas, donde los elementos estratigráficos básicos que conforman las estructuras (cenizas + sustrato termoalterado; Mallol et al., 2017) pueden presentar historias previas muy diferentes. Las cenizas son los residuos de la combustión, formadas básicamente por combustible quemado y posibles inclusiones: durante la quema, la materia orgánica se oxida hasta que los compuestos orgánicos (formados esencialmente por carbono, hidrógeno, oxígeno) son vaporizados y sólo quedan los elementos minerales no volátiles (Canti y Brochier, 2017; Mallol et al., 2017). Esto se produce a temperaturas altas, que, a su vez, hacen que se genere una importante cantidad de minerales ferromagnéticos. McClean y Kean (1993) sugirieron que, en el caso de las cenizas de madera o plantas en general, la neoformación de minerales

ferromagnéticos durante la quema tenía lugar a partir de la fitoferritina. En cualquier caso, sea cual sea el origen del hierro de los ferromagnéticos, la abundancia de estos en las cenizas es de sobra conocido (Carrancho y Villalaín, 2011; McClean y Kean, 1993; Peters et al., 2001). La mineralogía magnética resultante suele presentar propiedades magnéticas similares en todas las cenizas: predominan los minerales de baja coercitividad (habitualmente magnetita/maghemita), con comportamientos de tamaño de grano pseudomonodominio (PSD) o mezcla de monodominio (SD) y multidominio (SD) (Carrancho et al., 2013, 2012; Carrancho y Villalaín, 2011; Jordanova et al., 2019; Kapper et al., 2014a; McClean y Kean, 1993). Los resultados aquí presentados coinciden con estas observaciones. Existen algunos trabajos que han observado algunas diferencias en las propiedades magnéticas según el combustible utilizado. Peters et al. (2001) y Church et al. (2007) analizaron cenizas de fuegos arqueológicos y de hogares recreados experimentalmente donde se utilizaron como combustible madera y varios tipos de turba. Estos autores analizaron la susceptibilidad magnética inicial y la susceptibilidad en función de la frecuencia (ambas medidas a temperatura ambiente), así como la variación de la susceptibilidad con la temperatura (hasta 700°C), y también realizaron la adquisición de la magnetización remanente anhisterética (ARM) y de la magnetización remanente isoterma (IRM). El análisis discriminante de los parámetros a temperatura ambiente permitió distinguir diferencias entre los tipos de combustible estudiados, así como también observaron diferencias en las medidas dependientes de la temperatura. En cualquier caso, se trata de diferencias relativamente sutiles en parámetros muy concretos.

Por su parte, la historia previa del sustrato termoalterado es mucho más variable. Es importante entender que este elemento conformador de las estructuras de combustión está afectado por la quema pero no tiene su origen en ella: se trata del sustrato existente antes de la quema, sobre el que se coloca el combustible (Mallol et al., 2017, 2013b; Polo-Díaz et al., 2016). Algunas de las características pre-quema que pueden influir en cómo se produce la alteración térmica en el sustrato durante la quema son la mayor o menor presencia de materia orgánica, la litología, la humedad o la compactación del sustrato (Aldeias et al., 2016; Canti y Linford, 2000; Mallol et al., 2013b). Los fuegos experimentales en cueva y al aire libre estudiados en el capítulo 5 son un buen ejemplo de las grandes diferencias que pueden existir en los materiales parentales y cómo condicionan la señal magnética resultante.

Además de las características de los materiales pre-quema, son muy importantes las condiciones durante la quema. Como se ha comentado, las cenizas suelen alcanzar temperaturas muy altas (muy probablemente, >700 °C; (Canti y Linford, 2000; Carrancho et al., 2016a; Peters et al., 2001), lo cual les confiere una alta estabilidad termomagnética. Además, esto tiene su reflejo en el comportamiento direccional, donde cabe esperar que la termorremanencia (TRM)

sea el principal mecanismo de magnetización remanente. Este comportamiento es generalmente bastante reproducible por dos motivos: (1) las temperaturas alcanzadas por las cenizas son muy altas en todos los casos y (2) el origen de los minerales ferromagnéticos presentes en ellas está en la propia quema sea cual sea el tipo de cenizas.

Las condiciones de quema del sustrato termoalterado son muy variables y están determinadas en gran medida por las características de los materiales parentales. Pero también hay otras variables relacionadas con la forma en la que se produce la quema propiamente dicha, tales como el tipo y la cantidad de combustible utilizado o el tiempo durante el que se prolonga la quema (Aldeias et al., 2016; Bentsen, 2013, 2012). En relación con esto, cabe mencionar que la acumulación de cenizas por encima puede generar un efecto de aislamiento que influye en la penetración del calor y favorece una atmósfera reductora (Aldeias et al., 2016; Canti y Linford, 2000). La ubicación del foco de calor también es otro factor a tener en cuenta cuando se estudia el sustrato termoalterado, pues es frecuente que las temperaturas alcanzadas presenten una importante variabilidad lateral y en profundidad. (Carrancho y Villalaín, 2011) realizaron un estudio detallado de las propiedades magnéticas de una estructura de combustión experimental en un sustrato arcilloso y observaron una clara variabilidad lateral y en profundidad en varios parámetros magnéticos (adquisición de la IRM, curvas termomagnéticas, etc.). Existe un realce de los valores de parámetros como por ejemplo la susceptibilidad magnética (el llamado *magnetic enhancement*) en todo el sustrato quemado, pero es en las zonas más superficiales donde es más claro. Esto se relaciona con las temperaturas alcanzadas. Además, mientras que las muestras de la zona central del sustrato alcanzaron unos 600 °C y registraron una termorremanencia, las muestras periféricas alcanzaron temperaturas más bajas (~300 °C) y adquirieron una remanencia termoquímica. Es importante mencionar que en este estudio, las cenizas fueron retiradas entre quema y quema, lo cual probablemente evitó en gran medida el efecto de aislamiento y permitió que las temperaturas alcanzadas en el sustrato pudieran ser mayores. En el caso concreto de las capas negras de las estructuras de combustión paleolíticas y experimentales aquí estudiadas parece que no suelen alcanzar temperaturas tan altas. Los estudios previos de otras disciplinas y los resultados mostrados en los capítulos 5 y 6 de este trabajo sugieren temperaturas que generalmente no exceden los 500 °C; (Leierer et al., 2019; Mallol et al., 2013b). Carrancho et al. (2016a) evaluaron las temperaturas alcanzadas por las facies carbonosas de episodios de combustión de secuencias de *fumiers* (que serían el equivalente a las capas negras de las estructuras paleolíticas) mediante análisis arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas y sugirieron que había alcanzado temperaturas máximas de unos 400-450 °C. De todo esto se infiere que el mecanismo de magnetización predominante esperable es la termorremanencia parcial (pTRM), aunque no se pueden descartar magnetizaciones remanentes termoquímicas (TCRM).

Todo lo comentado hasta ahora nos lleva a extraer una serie de inferencias útiles a la hora de interpretar los datos direccionales de las estructuras de combustión prehistóricas. Por lo general, cabe esperar que las cenizas porten una única componente (aparte de la posible fracción viscosa) que corresponde al registro adquirido durante el último calentamiento/enfriamiento. Las cenizas de H50 son un ejemplo de esto (capítulo 6). Si aparecen varias componentes, esas cenizas son sospechosas de haber experimentado algún proceso post quema. Este criterio se tuvo en cuenta a la hora de seleccionar los especímenes para el cálculo de direcciones de episodios de combustión de secuencias de *fumiers*, tal y como lo hicieron también Carrancho et al. (2013).

En el caso del sustrato termoalterado, la existencia de varias componentes no pone en duda el registro direccional. Puesto que las temperaturas no tienen por qué superar la temperatura de Curie de los principales portadores de la remanencia (p. ej.: magnetita T_c , 585°C), puede que el registro previo no haya sido totalmente borrado y encontremos dos componentes: a baja temperatura (excluyendo, claro, la fracción afectada por magnetización viscosa) se habría registrado una pTRM asociada al último uso (calentamiento) de la estructura y, a alta temperatura, el registro previo a la última quema. Los resultados de los fuegos experimentales corroboran esta hipótesis (capítulo 5) y parece que también se cumple en los hogares paleolíticos de la unidad X de El Salt (capítulo 6). El hecho de que por encima (a temperaturas más altas) de la componente asociada a la quema aparezcan una o varias componentes paleomagnéticas, que incluso pueden presentar direcciones anómalas, no cuestiona el registro asociado al fuego, pues la historia del registro magnético del material pre-quema no afecta a la pTRM (Smith, 1990). Una última cuestión importante respecto al comportamiento de la NRM del sustrato termoalterado es que si las temperaturas alcanzadas son muy bajas, la pTRM asociada al último calentamiento puede llegar a ser reemplazada por una magnetización de origen viscoso adquirida por los granos más finos (con bajo tiempo de relajación) a temperatura ambiente entre la producción del fuego y el análisis arqueomagnético.

Estas hipótesis se plantean para estructuras de combustión que se preservan en condiciones óptimas. Sin embargo, los procesos posteriores a la quema pueden alterar el comportamiento magnético esperable. Los residuos de las estructuras de combustión como las prehistóricas estudiadas en esta tesis tienen una naturaleza sedimentaria (Mallol y Henry, 2017). Esta particularidad hace que las condiciones post-quema sean muy diferentes de las de otro tipo de materiales arqueológicos quemados, como, por ejemplo, los hornos de ladrillo. En este último tipo de estructuras la preservación es mejor y los procesos de alteración más comunes suelen ser los basculamientos de los muros (*tilting*). Sin embargo, las estructuras prehistóricas son mucho más propensas a ser afectadas por procesos mecánicos de reorganización a la escala del grano, mucho más sutiles. Especialmente, en el caso de las cenizas, que siempre están poco cohesionadas

justo después de la quema. Un ejemplo de esto es el supuesto aplanamiento (*shallowing*) detectado en las cenizas del hogar H50 de El Salt (capítulo 6) o la variabilidad de comportamientos en las curvas termomagnéticas de las cenizas de los fuegos experimentales (capítulo 5), que se interpreta como el efecto de la inclusión de materiales no quemados debido a la bioturbación observada. Los sustratos termoalterados de los fuegos experimentales (capítulo 5) y de los paleolíticos (capítulo 6) estudiados en esta tesis parecen presentar menos problemas de preservación. Muy probablemente esto tenga relación con el grado de compactación y/o litificación previa a la quema de los sustratos analizados, y quizás favorecido por la propia quema. Paradójicamente, aunque las cenizas presenten mayor concentración de minerales ferromagnéticos, parece que el sustrato termoalterado de estos contextos es un mejor candidato para los análisis arqueomagnéticos.

9.2. Utilidad del arqueomagnetismo en contextos prehistóricos: aplicaciones geocronológicas y geoarqueológicas

Los resultados expuestos en esta tesis ponen en evidencia la utilidad de los análisis arqueomagnéticos y de propiedades magnéticas aplicados al estudio de materiales prehistóricos. Las aplicaciones exploradas se pueden agrupar en dos bloques: geocronológicas y geoarqueológicas.

Por un lado, en el primer bloque encontramos la posibilidad de datar materiales quemados mediante arqueomagnetismo. Las nuevas direcciones arqueomagnéticas de episodios de combustión de secuencias de *fumiers* suponen una contribución a la mejora de la curva de variación secular durante la prehistoria reciente en Iberia. Hasta ahora, ya era posible realizar dataciones hasta fechas bastante antiguas utilizando modelos geomagnéticos como el SHA.DIF.14k (Pavón-Carrasco et al., 2014). Sin embargo, la compilación de nuevos datos bien datados a escala regional (ej.: península ibérica), es importante para implementar tanto curvas de variación secular como modelos geomagnéticos que permitan mejorar el conocimiento de las variaciones del campo magnético terrestre y lograr una mejor resolución de datación y extenderla en el tiempo. Aunque a día de hoy hay múltiples métodos de datación, no todos los materiales óptimos están presentes en todos los yacimientos. Por lo tanto, especialmente para momentos antiguos en los que no hay registros documentales (como es el caso de la prehistoria reciente), conseguir refinar más una técnica como es el arqueomagnetismo es importante. En este sentido, las secuencias de *fumiers* son uno de los pocos materiales quemados que están datados independientemente y disponibles para los momentos anteriores al 1000 a.C. por todo el ámbito circunmediterráneo. Por lo tanto, son los

mejores candidatos para mejorar el conocimiento de la variación secular en la región durante ese período (desde el Neolítico al cambio de era). A pesar de las tasas de éxito inherentes al tipo de materiales examinados en esta tesis, los resultados parecen ser coherentes con un comportamiento esperable de la variación secular. Con vistas a futuro, sería interesante poder estudiar más episodios de este o de otro tipo que permitan incluir más datos direccionales. En la actualidad, Natalia García Redondo, en el contexto de su proyecto de tesis doctoral (dirigido por los doctores Manuel Calvo Rathert y Ángel Carrancho Alonso, de la Universidad de Burgos), está tratando de obtener determinaciones de arqueointensidad absoluta en cerámicas procedentes de contextos y cronologías similares. La intención es aportar datos que, en el futuro, permitan obtener una curva de variación que también incluya la intensidad (vector completo).

Por otro lado, también en relación a las contribuciones geocronológicas, pero además relacionada con las geoarqueológicas, está la individualización y temporalización de ocupaciones en palimpsestos del Paleolítico medio como El Salt (capítulo 6). En este caso, lo que se obtiene no es una datación como tal, pero sí una estimación del tiempo mínimo que ha pasado entre las últimas quemaduras de estructuras de combustión a partir del comportamiento de la variación paleosecular del Campo Magnético Terrestre. En estos contextos, las técnicas de datación tienen incertidumbres muy grandes y el método presentado permite tener algunas referencias temporales internas que den idea de la magnitud del tiempo que realmente se puede estar abarcando bajo la aparente sincronía del depósito. Por lo tanto, nos informan de los procesos de formación/transformación del yacimiento, además de poner un marco temporal de referencia para los comportamientos humanos inferidos a partir de los materiales arqueológicos incluidos en los palimpsestos. Este planteamiento no se restringe sólo al uso en el contexto del Paleolítico medio, sino que también es extrapolable a materiales análogos de otras épocas.

En cuanto a las aplicaciones de interés puramente geoarqueológico (es decir, sobre los procesos de formación de los depósitos arqueológicos y el impacto de la actividad humana sobre ellos), se ha puesto el valor de las técnicas a través de varias contribuciones.

En primer lugar, está la detección de posibles estructuras de combustión. A día de hoy se han aplicado diversas técnicas con esta finalidad (p. ej.: Berna et al., 2007; Goldberg et al., 2017; Jambrina-Enríquez et al., 2019; Morinaga et al., 1999; Zhang et al., 2014) y referencias incluidas en esos textos), pero no hay una solución única, dependiendo de los contextos y los materiales de estudio. De hecho, la combinación de varias técnicas suele ser clave para poder confirmar si se trata de materiales quemados (véase, p. ej.: Walker et al., 2016). Los comportamientos magnéticos esperados para las distintas facies que conforman las estructuras de combustión y mencionados en el apartado 8.1 pueden servir de referencia para evaluar la posible existencia de termoalteración. La presencia de dichos

comportamientos no es condición suficiente para asegurar que están quemados, pero pueden servir de apoyo para los análisis de otras disciplinas (véase p. ej.: Leierer *et al.*, in prep). Igualmente, la combinación de análisis arqueomagnéticos y curvas termomagnéticas puede dar información acerca de la temperatura máxima experimentada por los materiales (véanse los resultados y la discusión acerca de las capas negras de los fuegos experimentales, capítulo 5). Esta aproximación también ha sido presentada por Carrancho et al. (2016a).

Otra contribución geoarqueológica explorada aquí es la detección de procesos tafonómicos que han alterado las estructuras de combustión después de la quema. A lo largo de este trabajo, se ha sugerido la relación entre algunos comportamientos magnéticos y determinados procesos post-quema. Fundamentalmente se trata de procesos mecánicos de distinta índole. La presencia de curvas irreversibles en las cenizas de los fuegos experimentales (capítulo 5) se interpreta como el efecto de la inclusión de materiales menos o nada quemados debida a la bioturbación.

En uno de los fuegos experimentales (NFT-9, capítulo 5) se observó que, al realizar la adquisición de la IRM, la capa negra tenía valores de magnetización tan altos o más que los de las cenizas. Este hogar fue pisoteado tras ser apagado, por lo que se interpretó que este resultado era el efecto de la inclusión de cenizas en la capa negra debido al *trampling*, un proceso de alteración relativamente común.

El aplanamiento observado en las cenizas de la estructura H50 de la unidad X de El Salt (capítulo 6) sugiere que sufrieron un proceso de compactación importante después de la quema. No parece que este mismo proceso afecte a las cenizas de los fumiers, donde las inclinaciones observadas no son anómalamente bajas y ni la ASM ni la AARM parecen apuntar en esta dirección (capítulo 8). Carrancho et al. (2013) tampoco observaron aplanamiento por compactación en las cenizas de los depósitos de *fumiers* que estudiaron. Esto sugiere una posible conservación diferencial según el contexto. Quizás puede estar relacionado con los distintos procesos naturales que tienen lugar al aire libre y en cueva y/o con las diferentes actividades antrópicas que se desarrollan en cada contexto. Las altas tasas de sedimentación en contextos tipo *fumiers* (p. ej.: 1 mm/año en la secuencia Neolítica de El Mirador, alcanzando picos de hasta 15 mm/año en algunas unidades estratigráficas; Angelucci et al., 2009) y la rápida cobertura de los episodios de combustión con nuevas acumulaciones de desechos o con forraje (p. ej.: Alonso-Eguíluz et al., 2017; Euba et al., 2016; Polo-Díaz et al., 2016) son factores que sin duda juegan un papel importante en su preservación.

La inestabilidad direccional en el registro arqueomagnético y la baja calidad de algunas direcciones de los episodios de combustión de secuencias de *fumiers* (capítulo 8) se interpretan en términos de alteración mecánica de estos materiales tras la quema. Los resultados de algunos hogares experimentales (NFT-21 y NFT-22) también han sido interpretados en esos términos (capítulo 5).

Se ha explorado también el uso de los análisis arqueomagnéticos para la detección de reencendidos. En este caso, esta técnica no ha permitido obtener evidencias para identificarlos. Esto se relaciona fundamentalmente con dos cuestiones. Por un lado, si los reencendidos tienen lugar en momentos próximos en el tiempo, las direcciones del CMT serán indistinguibles. Por otro lado, si la temperatura del último calentamiento superó la de los calentamientos anteriores, su señal habrá sido “reseteada” y remplazada. Esto supone un problema para la identificación de reencendidos. Sin embargo, viéndolo desde otra perspectiva, esto puede ser una baza en contextos en los que se pretende datar el último uso o el abandono de una estructura determinada o de un lugar.

9.3. ¿Materiales *in situ*? La versión arqueológica frente a la de los análisis arqueomagnéticos.

En relación a la detección de procesos tafonómicos que han alterado las estructuras de combustión, cabe mencionar un valor añadido del arqueomagnetismo. Carrancho et al. (2012) exploraron la utilización de los análisis direccionales como una herramienta para evaluar las alteraciones post-quema en estructuras de combustión. En ese trabajo relacionaban la presencia de una madriguera en un episodio de combustión de la secuencia de *fumiers* de la Cueva de El Mirador con una gran dispersión en la dirección arqueomagnética media. En este caso, la presencia de la madriguera era evidente a simple vista. Sin embargo, esta misma aproximación permite detectar procesos mecánicos que *de visu* no se aprecian pero que han afectado a los episodios de combustión tras la quema. Los episodios de La Castañera son un ejemplo claro, aunque no se descarta que en otros registros existan procesos más sutiles que también son detectables (véase la discusión al respecto en el apartado 8.5.2 del capítulo 8). Los episodios de La Castañera mostraban la sucesión de facies típica de sustrato termoalterado subyacente y ceniza a techo en el campo. Por ello, desde el punto de vista arqueológico, se podía considerar que los materiales estaban aparentemente *in situ*. Sin embargo, cuando se realizaron los análisis direccionales, se demostró que internamente había habido procesos mecánicos que han reorganizado los granos que conforman las distintas facies de estos episodios de combustión. De aquí se deriva una discusión interesante: ¿qué consideramos *in situ*? Desde el punto de vista arqueomagnético, cuando estudiamos los episodios de combustión, consideramos *in situ* todo aquello que se conserve exactamente en la misma posición que cuando se quemó por última vez, pero teniendo en cuenta los materiales a escala de grano. Sin embargo, desde la perspectiva de la arqueología, el concepto no es tan estricto. Dependiendo de la cuestión que estemos evaluando,

puede que no sea tan crítico un concepto tan restrictivo. Sin embargo, a la hora de evaluar los procesos de formación y transformación del depósito arqueológico, sí que tiene implicaciones. De hecho, también puede afectar a otros análisis como los espaciales, pues la alteración mecánica de las facies quemadas también afectará a las posiciones de los materiales incluidos en ellas. Identificar esas alteraciones microscópicas post-quema, aparentemente no distinguibles *de visu* en el campo, también tiene implicaciones geocronológicas y culturales. Cuando se va a recoger una muestra para datar por el método que sea (ej.: un carbón, semilla o sedimento), es muy importante tener garantías de que eso no se ha movido o ha sufrido desplazamientos significativos. De otro modo la determinación cronológica sería cuestionable y ejemplos interesantes de ello en contextos paleolíticos ya han sido discutidos previamente (p. ej.: Mercier et al., 1995; Schiegl et al., 1996). A otra escala pero que igualmente puede no ser fácilmente identificable o pasar desapercibido en el campo, estos procesos de alteración pueden promover la traslocación estratigráfica de restos arqueológicos como fragmentos óseos o pequeños restos líticos, así como elementos paleobotánicos (semillas, carbones, polen), con las implicaciones culturales que eso conlleva. Sería deseable, de cara al futuro, discutir y unificar la terminología utilizada para combinar las escalas macro y micro a la hora de estudiar los yacimientos arqueológicos. En este trabajo, en lo referente a estructuras de combustión prehistóricas, se propone la siguiente distinción:

-Materiales estructuralmente *in situ*: aquellos que aparecen en la zona donde se depositaron o generaron, pero no necesariamente en la misma posición (ej.: una facies de ceniza compactada, un hogar ligeramente bioturbado, etc). Su alteración no compromete la interpretación cronocultural del registro arqueológico, pero invalidaría la aplicación de análisis arqueomagnéticos como los aquí planteados, así como también condicionaría aquellos análisis en los que tenga importancia la orientación de los materiales.

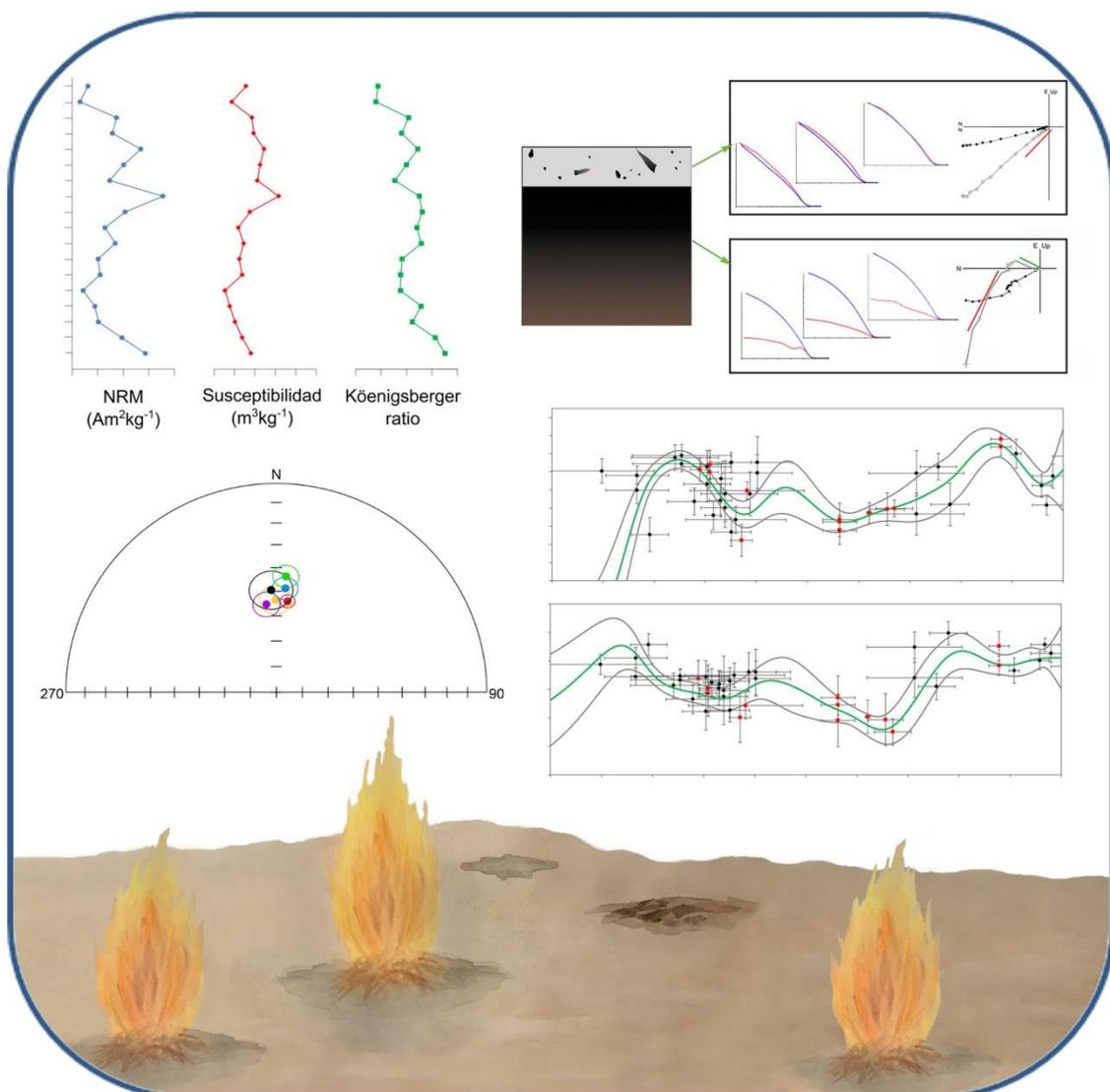
-Materiales internamente *in situ*: aquellos que además de aparecer en la zona donde se depositaron o generaron, se han mantenido en la misma posición desde entonces. Estas estructuras de combustión y sus restos asociados estarían *in situ* (s.s.). Tanto su interpretación arqueológica como la aplicación de análisis arqueomagnéticos estarían garantizadas en un contexto primario.

10. Conclusiones

10.1. Conclusiones generales

10.2. Conclusiones sobre las aplicaciones geoarqueológicas

10.3. Conclusiones sobre las aplicaciones geocronológicas



10.1. Conclusiones generales

- Las propiedades magnéticas básicas de todos los materiales quemados estudiados en esta tesis son muy similares: el principal portador de la remanencia es la magnetita (puede que en ocasiones magnetita), con comportamiento característico de tamaño de grano PSD o mezcla de SD+MD.

- A pesar de las similitudes mencionadas, existen algunas diferencias importantes entre estructuras de combustión e, incluso, dentro de cada estructura entre las facies que las componen (cenizas + sustrato termoalterado): concentración de minerales ferromagnéticos, número de componentes paleomagnéticas, temperaturas máximas de desbloqueo de la componente característica y grado de reversibilidad de las curvas termomagnéticas.

- Todo esto se debe a que la señal magnética resultante está directamente condicionada (1) por las características de los materiales pre-quema, (2) por las condiciones durante la quema y (3) por los procesos post-quema. Tanto los materiales a partir de los que se forma cada facies como las condiciones sin- y post-quema que afectan a cada facies son diferentes. Por ello, es muy importante tener en cuenta esos tres puntos a la hora de interpretar los resultados magnéticos de materiales similares a los estudiados en este trabajo.

- Existen algunos comportamientos esperables para las cenizas puras (o con pocas impurezas) y bien preservadas:

- La concentración de minerales ferromagnéticos es alta.
- La señal magnética suele presentar una alta estabilidad termomagnética.
- Es esperable que el registro direccional presente una única componente adquirida mediante el mecanismo de termorremanencia.

- El sustrato subyacente a las cenizas alterado térmicamente (capa negra y/o facies carbonosas) puede presentar una variabilidad mayor, lo cual se debe fundamentalmente a la historia magnética previa del sustrato pre-quema y a las menores temperaturas alcanzadas. Se han inferido algunos comportamientos comunes:

- Por lo general, no son termomagnéticamente estables y durante el calentamiento en el laboratorio se genera magnetita secundaria.
- El principal mecanismo de magnetización remanente es la termorremanencia parcial (pTRM). Es frecuente que las capas negras presenten al menos dos componentes paleomagnéticas: una que se aísla hasta temperaturas bajas/intermedias (~300-500 °C) correspondiente al registro de la quema y otra/s a que se aísla/n a más altas temperaturas y se

10. Conclusiones

corresponde/n al registro del sustrato antes de la quema. El hecho de que las componentes previas a la quema no se agrupan bien no pone en compromiso el registro direccional asociado al fuego, puesto que, entre la formación y la quema del sustrato, éste puede haber experimentado múltiples alteraciones. No se puede excluir por completo que, en algunos casos, aparezca una única componente, puesto que puede darse un mecanismo de adquisición termoquímico.

- La combinación de los análisis paleomagnéticos y de los experimentos de magnetismo de las rocas sugieren que no se calentaron generalmente por encima de 500 °C.

- Los análisis magnéticos han revelado propiedades similares en las capas negras de los fuegos experimentales y paleolíticos y en las facies carbonosas de los episodios de combustión de secuencias de *fumiers*. Esto es coherente con lo que proponían trabajos previos de otras disciplinas, en las que habían definido ambas facies como el sustrato previo sobre el que se realizó la quema en sus respectivos contextos.

10.2. Conclusiones geoarqueológicas

- A partir del estudio de los hogares experimentales se ha confirmado que las estructuras de combustión prehistóricas como las de El Salt son buenas candidatas para realizar análisis arqueomagnéticos. En concreto, los sustratos termoalterados (capa negra) preservan direcciones con muy buena calidad estadística. Se interpreta que la naturaleza compactada e incluso litificada de los sustratos estudiados los hace menos susceptibles de sufrir reorganizaciones mecánicas. Esto sugiere que, en contextos similares, la capa negra es la facies óptima para los análisis direccionales.

- No se han podido detectar patrones o comportamientos que permitan identificar reencendidos en una misma estructura mediante los análisis paleomagnéticos.

- Los análisis arqueomagnéticos y de magnetismo de las rocas son útiles para evaluar tanto procesos antrópicos (detección de materiales quemados, individualización y temporalización de ocupaciones) como tafonómicos (diversos procesos mecánicos de alteración de las estructuras de combustión tras la quema) que han podido afectar a los depósitos arqueológicos.

- El arqueomagnetismo y los análisis de magnetismo de las rocas permiten detectar alteraciones mecánicas en materiales que macroscópicamente parecen estar *in situ* e intactos. Algunos comportamientos magnéticos detectados en los

distintos materiales estudiados y compatibles con las alteraciones post-quema (generalmente de carácter mecánico) son:

- 1) Curvas termomagnéticas irreversibles en cenizas con evidencias de bioturbación de fuegos experimentales. Esto puede tener relación con la inclusión de materiales nada o poco quemados.
- 2) Valores de magnetización en la capa negra de un fuego experimental pisoteado más altos incluso que los de las cenizas. Esto puede relacionarse con la incorporación de cenizas en el sustrato termoalterado debido al pisoteo.
- 3) Aplanamiento de las cenizas en un hogar paleolítico, efecto de la posible compactación de estas facies.
- 4) Gran dispersión en las direcciones medias de algunos episodios de combustión de secuencias de *fumiers*. Se interpreta como el efecto de la alteración mecánica de los materiales.

- Los análisis de propiedades magnéticas han permitido identificar posibles diferencias entre horizontes arqueológicos de El Salt (conjuntos P2A y P2B) sospechosos de estar quemados. No son resultados concluyentes, porque requieren ser cruzados con los de otras disciplinas (ej.: micromorfología, FTIR), pero sugieren que el comportamiento observado en algunos horizontes es compatible con el esperado para materiales quemados:

- 1) En materiales cuya apariencia se asemeja a la de cenizas: curvas termomagnéticas altamente reversibles, valores altos de NRM, ratio Q_n y susceptibilidad magnética a temperatura ambiente.
- 2) En materiales cuya apariencia se asemeja a la de las capas negras: curvas termomagnéticas irreversibles con un importante aumento de la magnetización en la curva de enfriamiento (neoformación de magnetita), valores relativamente altos de NRM, ratio Q_n y susceptibilidad magnética. No se puede excluir que este comportamiento también pueda relacionarse con facies ricas en materia orgánica en descomposición sin quemar.
- 3) En los casos en los que parecía que podía corresponder a una estructura de combustión completa y bien estratificada (con cenizas a techo y capa negra subyacente): patrón decreciente de valores de la NRM, del ratio de Königsberger y de la susceptibilidad magnética en profundidad.

- Los análisis arqueomagnéticos en estructuras de combustión realizados sobre estructuras de combustión de la unidad X de El Salt han permitido demostrar que la formación del depósito de la subunidad Xb duró al menos varios siglos. Esto aporta un marco temporal de referencia más acotado para el estudio de las ocupaciones humanas en estas cronologías.

10.3. Conclusiones sobre las aplicaciones geocronológicas

- Las secuencias de *fumiers* son una buena fuente de registros direccionales para la generación y mejora de curvas y modelos de variación secular que permitan datar materiales arqueológicos quemados desde la prehistoria reciente. En el presente trabajo, se ha podido obtener 13 nuevas direcciones que, sumadas a las disponibles en trabajos previos, han permitido generar una nueva curva de variación secular para la península ibérica desde el 1000 a.C. hasta el 6000 a.C. Se trata de uno de los pocos materiales disponibles bien datados independientemente y en secuencias estratigráficas continuas para cronologías anteriores al 1000 a.C. en la península ibérica.

- Las tendencias generales de la variación secular en la península ibérica entre el 1000 a.C. y el 6000 a.C. parecen seguir lo mostrado en la curva europea y en el modelo geomagnético SHA.DIF.14k. Sin embargo, este trabajo aporta también datos inéditos y de cronologías sin información previa (finales del IV- primera mitad del III milenio a.C.), que parecen reflejar características específicas del campo magnético terrestre a nivel regional. Se requiere seguir estudiando este tipo de contextos que permitan confirmar estas tendencias y estudiar más en detalle la evolución de la variación secular en la región, pues siguen existiendo algunos periodos para los que existe muy baja densidad o incluso ausencia de datos.

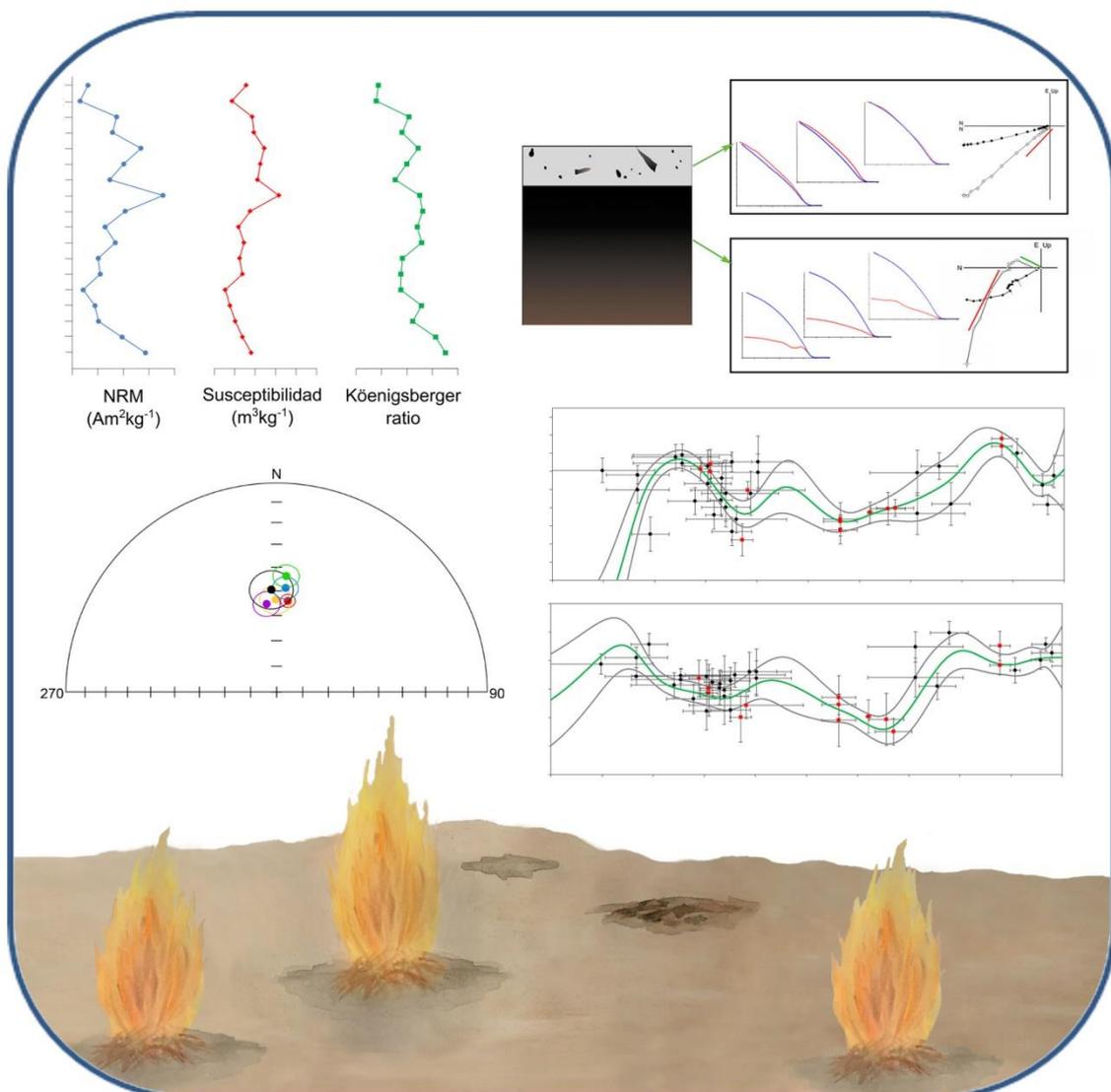
- Se ha realizado una propuesta metodológica de temporalización de ocupaciones neandertales. Aunque no se trate de una datación propiamente dicha, esta nueva metodología de temporalización aplicada al nivel X de la secuencia del Paleolítico medio de El Salt también aporta información geocronológica. Por una parte, permite aislar o individualizar ocupaciones en palimpsestos con registros de hogares, algo muy informativo a nivel arqueológico. Por otro lado, permite realizar una estimación del tiempo mínimo que podría haber transcurrido entre la quema de distintas estructuras de combustión. Aunque es necesario cruzar nuestros datos con la información arqueostratigráfica y (geo)arqueológica disponible, nuestros resultados indican diferencias temporales que van desde al menos décadas hasta siglos en ocupaciones diacrónicas. Hasta donde sabemos, es la primera metodología que permite temporalizar a esta resolución ocupaciones humanas en palimpsestos paleolíticos de manera cuantitativa y con una incertidumbre estadística asociada. La metodología es susceptible de aplicarse a otros contextos arqueológicos con estructuras de combustión independientemente de su edad. Si el método se extrapola a otros contextos en los que se disponga de dataciones independientes que permitan establecer un tiempo máximo relativamente restringido, se podría llegar a realizar una acotación temporal incluso más precisa.

11. Conclusions

11.1. General conclusions

11.2. Geoarchaeological conclusions

11.3. Geochronological conclusions



11.1 General conclusions

- Main magnetic properties of all burnt materials studied in this work are similar: magnetite is the main carrier of the remanence (maybe maghemite in some cases), with PSD or SD+MD grain size behavior.

- In spite of the similarities, some differences among combustion structures and inside the structures (between the distinct facies that compose them: ashes and thermoaltered substrate) are observed: concentration of ferromagnetic minerals, number of magnetic components in demagnetization diagrams, maximum unblocking temperature of the Characteristic Remanent Magnetization and reversibility degree in the thermomagnetic curves.

- These features are conditioned by (1) characteristics of pre-burning materials, (2) burning conditions and (3) post-burning processes. These three points are different for each facies. Therefore, it is very important to take them into account when interpreting the magnetic signal of materials similar to those studied in this work.

- Some characteristic behaviors of pure or well-preserved ashes have been inferred:

- High concentration of ferromagnetic minerals.
- High thermomagnetic stability.
- Thermoremanence as remanence acquisition mechanism and thus, univectorial demagnetization diagrams.

- Thermoaltered substrate (black layer and carbonaceous facies) presents greater variability. This is due to pre-burning magnetic history of the substrate and the lower temperatures (beside ashes) reached during the burning. Even so, some common features were observed:

- Black layers and carbonaceous facies do not exhibit high thermomagnetic stability. Secondary magnetite is usually formed during the heating in the laboratory.
- Partial thermoremanence (pTRM) is the main acquisition mechanism of remanent magnetization. Black layers usually present at least two magnetic components in the demagnetization diagrams. One is isolated up to low/medium temperatures ($\sim 300\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) and corresponds to the burning record. Other is isolated at higher temperatures and corresponds to the pre-burning record. Scattered directions of pre-burning component do not imply that directional record associated to fire should be questioned: it may have undergone multiple alterations between formation and burning of the

11. Conclusions

substrate. Univectorial diagrams may also be observed since a thermochemical remanence is possible (TCRM).

- Combination of palaeomagnetic analyses and rock magnetism experiments suggest that black layer and carbonaceous facies were not heated above 500 °C.

- Magnetic analyses have shown that black layers from the Palaeolithic hearths and carbonaceous facies from *fumiers* sequences have similar properties. It is coherent with the published results from other disciplines. In these studies, both facies were defined as the substrate above which the burning took place.

11.2. Geoarchaeological conclusions

- The study of the experimental combustion structures indicates that hearths from El Salt are good candidates to carry out archaeomagnetic analyses. Thermoaltered substrate (black layer) preserves a high-quality record. It is suggested that compaction of the substrate prevent mechanical reorganizations. For this reason, black layer is proposed as the optimal facies for directional analyses in this context.

- It has not been possible to detect patterns or behaviors that indicate reheating in the same structure by palaeomagnetic analyses.

- Archaeomagnetic and rock magnetism analyses are useful tools to assess anthropic processes (identification of burnt materials, isolation and temporalization of occupations) and taphonomic processes (mechanical alteration of combustion episodes after burning).

- Archaeomagnetism and rock magnetism analyses allow to detect mechanical alterations in macroscopically well-preserved materials. Some observed behaviors are interpreted as indicators of post-burning alteration:

- 1) Irreversible thermomagnetic curves have been observed in bioturbated ashes. It may be related to the inclusion of not burnt or lightly burnt materials.

- 2) Very high magnetization values (even higher than in ashes) in the black layer of a trampled. It is interpreted as an effect of the incorporation of ashes in the heated substrate due to trampling.

- 3) Low inclination (shallowing) in ashes of a Palaeolithic hearth. It is suggested that this is as a consequence of the possible flattening of this facies after the burning.

4) Scattered directions in combustion episodes from *fumiers* sequences. It is interpreted as the effect of mechanical post-burning disturbances.

- Magnetic properties analyses have revealed some behaviors congruent with the effect of thermal alteration in several archaeological horizons from El Salt. The results are not conclusive, but the comparison with analyses of other disciplines (p. ej.: soil micromorphology, FTIR) could help to solve the problem. The behaviors mentioned above are:

1) In materials with ash appearance: highly reversible thermomagnetic curves, high values of NRM, Q_n ratio and magnetic susceptibility at room temperature.

2) In materials with black layer appearance: irreversible thermomagnetic curves with an important increase of the magnetization in the cooling curve (magnetite neo-formation), relatively high values of NRM, Q_n ratio and magnetic susceptibility at room temperature. This is the typical behavior of black layers, but it could also be compatible with unburnt facies rich in organic matter.

3) In the cases in which a complete and well-preserved combustion structure could exist (with the typical facies sequence: ash on top and black layer beneath): decreasing pattern of NRM, Königsberger ratio and magnetic susceptibility with depth.

- Archaeomagnetic analyses on combustion structures from El Salt unit X have demonstrate that formation of subunit Xb lasted at least several centuries. This provides a more limited temporal frame for the study of human occupations in this context.

11.3. Geochronological conclusions

- Combustion episodes from *fumiers* sequences are good recorders of the direction of the Earth's Magnetic Field. It is helpful to generate and improve the Secular Variation curves and the global and regional models. The upgrading of the curves and models extends the dating of burnt archaeological materials up to the Recent Prehistory.

- 13 new directional data are released in this work. Along with previous dataset, the new data has been used to generate a Secular Variation (SV) curve for Iberia between 6000 BC and 1000 BC.

11. Conclusions

- Combustion episodes from *fumiens* deposits are one of the few materials which are dated independently and contained in continue stratigraphic sequences for chronologies prior to 1000 BC in Iberia.

- Main trends of the Secular Variation in Iberia between 6000 BC and 1000 BC are similar to those observed in the European curve and the global model SHA.DIF.14k. However, the new unpublished directions (some of them coming from chronologies without previous data: end of IV millennia BC- first half of III millennia BC) show some possible specific features of the EMF in the region. More studies are required in order to confirm these trends, since there are still some gaps or low density of data for certain periods.

- A new methodology for temporalization of Neanderthal occupations has been presented. Although it does not provide a proper dating, the method applied to El Salt unit X (Middle Palaeolithic) contributes geochronological information. On the one hand, different occupations can be isolated in palimpsests with hearth remains. It is very interesting from the archaeological point of view. On the other hand, an estimation of the minimum time lapsed among the burning of the different combustion structures is obtained. Even though it is necessary to combine the archaeomagnetic data with the archaeostratigraphical and (geo)archaeological analyses, the presented results indicate that minimum temporal differences range from several decades to centuries among diachronic occupations. To our knowledge, this is the first method that allows to reach such a precise resolution in a quantitative way and with a statistical uncertainty. The methodology can be applied to any other archaeological context with presence of combustion structures, regardless of chronology. If the method is extrapolated to other contexts in which independent dates are available to establish a relatively restricted maximum time, a more precise temporal dimension could be reached.

Referencias bibliográficas

- Aldeias, V., Dibble, H.L., Sandgathe, D., Goldberg, P., McPherron, S.J.P., 2016. How heat alters underlying deposits and implications for archaeological fire features: A controlled experiment. *J. Archaeol. Sci.* 67, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.01.016>
- Almeida, T.P., Muxworthy, A.R., Kasama, T., Williams, W., Damsgaard, C., Frandsen, C., Pennycook, T.J., Dunin-Borkowski, R.E., 2015. Effect of maghemization on the magnetic properties of nonstoichiometric pseudo-single-domain magnetite particles. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 16, 2969–2979. <https://doi.org/10.1002/2015GC005858>
- Alonso-Eguíluz, M., Fernández-Eraso, J., Albert, R.M., 2017. The first herders in the upper Ebro basin at Los Husos II (Álava, Spain): microarchaeology applied to fumier deposits. *Veg. Hist. Archaeobot.* 26, 143–157. <https://doi.org/10.1007/s00334-016-0590-y>
- Andrews, P., 1995. Experiments in taphonomy. *J. Archaeol. Sci.* 22, 147–153. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0016>
- Angelucci, D.E., Boschian, G., Fontanals, M., Pedrotti, A., Vergés, J.M., 2009. Shepherds and karst: The use of caves and rock-shelters in the Mediterranean region during the Neolithic. *World Archaeol.* 41, 191–214. <https://doi.org/10.1080/00438240902843659>
- Bailey, G., 2007. Time perspectives, palimpsests and the archaeology of time. *J. Anthropol. Archaeol.* 26, 198–223. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2006.08.002>
- Batt, C.M., Brown, M.C., Clelland, S.J., Korte, M., Linford, P., Outram, Z., 2017. Advances in archaeomagnetic dating in Britain: New data, new approaches and a new calibration curve. *J. Archaeol. Sci.* 85, 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.07.002>
- Beatrice, C., Coisson, M., Ferrara, E., Olivetti, E.S., 2008. Relevance of magnetic properties for the characterisation of burnt clays and archaeological tiles. *Phys. Chem. Earth* 33, 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.018>
- Bellomo, R. V., 1993. A methodological approach for identifying archaeological evidence of fire resulting from human activities. *J. Archaeol. Sci.* 20, 525–553. <https://doi.org/10.1006/jasc.1993.1033>
- Bentsen, S.E., 2013. Controlling the heat: an experimental approach to Middle Stone Age Pyrotechnology. *South African Archaeol. Bull.* 68, 137–145. <https://doi.org/10.1007/s10814-013-9069-x>
- Bentsen, S.E., 2012. Size matters: Preliminary results from an experimental approach to interpret Middle Stone Age hearths. *Quat. Int.* 270, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.002>
- Berna, F., Behar, A., Shahack-Gross, R., Berg, J., Boaretto, E., Gilboa, A., Sharon, I., Shalev, S., Shilstein, S., Yahalom-Mack, N., Zorn, J.R., Weiner, S., 2007. Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological

- processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel). *J. Archaeol. Sci.* 34, 358–373. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.05.011>
- Binford, L.R., 1981. Behavioral Archaeology and the “Pompeii Premise.” *J. Anthropol. Res.* 37, 195–208.
- Bogue, S.W., Glen, J.M.G., 2010. Very rapid geomagnetic field change recorded by the partial remagnetization of a lava flow. *Geophys. Res. Lett.* 37, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2010GL044286>
- Borradaile, G.J., Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Rev.* 42, 49–93. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(96\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00044-X)
- Braadbaart, F., Poole, I., 2008. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *J. Archaeol. Sci.* 35, 2434–2445. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.03.016>
- Brochier, J.-É., 2002. Les sédiments anthropiques. Méthods d’étude et perspectives. *Géologie la Préhistoire* 453–377.
- Brochier, J.E., Villa, P., Giacomarra, M., Tagliacozzo, A., 1992. Shepherds and sediments: Geo-ethnoarchaeology of pastoral sites. *J. Anthropol. Archaeol.* 11, 47–102. [https://doi.org/10.1016/0278-4165\(92\)90010-9](https://doi.org/10.1016/0278-4165(92)90010-9)
- Brochier, J.-E., 1983. Combustion et parcage des herbivores domestiques. Lé point de vue du sédimentologue. *Bull. la Société Préhistorique Française* 143–145.
- Brochier, J.E., 1983. Bergeries et feux de bois néolithiques dans le Midi de la France. Caractérisation et incidence sur le raisonnement sédimentologique. *Quartär* 33–34, 181–193.
- Brodard, A., Guibert, P., Lévêque, F., Mathé, V., Carozza, L., Burens, A., 2012. Thermal characterization of ancient hearths from the cave of Les Fraux (Dordogne, France) by thermoluminescence and magnetic susceptibility measurements. *Quat. Geochronol.* 10, 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2012.04.013>
- Brown, M.C., Donadini, F., Korte, M., Nilsson, A., Korhonen, K., Lodge, A., Lengyel, S.N., Constable, C.G., 2015. GEOMAGIA50.v3: 1. general structure and modifications to the archeological and volcanic database. *Earth, Planets Sp.* 67, 1–31. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0232-0>
- Brown, K.S., Marean, C.W., Herries, A.I.R., Jacobs, Z., Tribolo, C., Braun, D., Roberts, D.L., Meyer, M.C., Bernatchez, J., 2009. Fire as an engineering tool of Early Modern Humans. *Science* (80-.). 325, 859–862.
- Butler, R.F., 2004. *Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes*, Electronic edition.
- Calvín Ballester, P., 2018. Caracterización paleomagnética de procesos deformacionales en cuencas intraplaca (Alto Atlas Central): diapirismo, compresión e intrusiones ígneas. Universidad de Burgos.
- Calvo-Rathert, M., Carrancho, Á., Stark, F., Villalaín, J.J., Hill, M., 2011. Are burnt sediments reliable recorders of geomagnetic field strength? *Quat. Res.* 77, 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.11.001>
- Campuzano, S.A., Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., 2014. Non-Dipole and Regional

- Effects on the Geomagnetic Dipole Moment Estimation. *Pure Appl. Geophys.* 172, 91–107. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0919-3>
- Canti, M.G., Brochier, J.É., 2017. Plant Ash, in: *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*. Wiley Online Library, pp. 147–154.
- Canti, M.G., Linford, N., 2000. The Effects of Fire on Archaeological Soils and Sediments: Temperature and Colour Relationships., in: *Proceedings of the Prehistoric Society*. pp. 385–395. <https://doi.org/10.1017/S0079497X00001869>
- Carrancho, Á., 2010. Arqueomagnetismo y magnetismo de las rocas en registros de fuegos arqueológicos holocenos. Aplicación a sedimentos kársticos (yacimientos de la Sierra de Atapuerca y Cueva de El Mirón) y recreaciones experimentales. Universidad de Burgos.
- Carrancho, Á., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Espinosa-Soto, J.A., Villalaín, J.J., Arsuaga, J.L., Baquedano, E., Pérez-González, A., 2016. Full-Vector Archaeomagnetic Dating of A Medieval Limekiln at Pinilla Del Valle Site (Madrid, Spain). *Archaeometry*. <https://doi.org/10.1111/arcm.12245>
- Carrancho, Á., Herrejón Lagunilla, Á., Vergès, J.M., 2016a. Three archaeomagnetic applications of archaeological interest to the study of burnt anthropogenic cave sediments. *Quat. Int.* 414, 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.010>
- Carrancho, Á., Morales, J., Goguitchaichvili, A., Alonso, R., Terradillos, M., 2014. Thermomagnetic monitoring of lithic clasts burned under controlled temperature and field conditions. implications for archaeomagnetism. *Geofis. Int.* 53, 473–490. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)70079-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)70079-0)
- Carrancho, Á., Villalaín, J.J., 2011. Different mechanisms of magnetisation recorded in experimental fires: Archaeomagnetic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.* 312, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.006>
- Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Angelucci, D.E., Dekkers, M.J., Vallverdú, J., Vergés, J.M., 2009. Rock-magnetic analyses as a tool to investigate archaeological fired sediments: A case study of Mirador cave (Sierra de Atapuerca, Spain). *Geophys. J. Int.* 179, 79–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04276.x>
- Carrancho, A., Villalaín, J.J., Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Straus, L.G., Vergès, J.M., Carretero, J.M., Angelucci, D.E., González Morales, M.R., Arsuaga, J.L., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2013. First directional European palaeosecular variation curve for the Neolithic based on archaeomagnetic data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 380, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.031>
- Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Vallverdú, J., Carbonell, E., 2016b. Is it possible to identify temporal differences among combustion features in Middle Palaeolithic palimpsests? The archaeomagnetic evidence: A case study from level O at the Abric Roman?? rock-shelter (Capellades, Spain). *Quat. Int.* 417, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.083>
- Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Vergés, J.M., Vallverdú, J., 2012. Assessing post-depositional processes in archaeological cave fires through the analysis of

- archaeomagnetic vectors. *Quat. Int.* 275, 14–22.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.01.010>
- Casas, L., Prevosti, M., Fouzai, B., Álvarez, A., 2014. Archaeomagnetic study and dating at five sites from Catalonia (NE Spain). *J. Archaeol. Sci.* 41, 856–867.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.10.020>
- Cascalheira, J., Picin, A. (Eds.), 2020. *Short-Term Occupations in Paleolithic Archaeology: definition and interpretation.* Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-27403-0>
- Catanzariti, G., McIntosh, G., Monge Soares, A.M., Díaz-Martínez, E., Kresten, P., Osete, M.L., 2008. Archaeomagnetic dating of a vitrified wall at the Late Bronze Age settlement of Misericordia (Serpa, Portugal). *J. Archaeol. Sci.* 35, 1399–1407. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.10.004>
- Chadima, M., Hroudá, F., 2006. Remasoft 3.0 – a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Trav. Géophysiques XXVII*, 20–21.
- Chadima, M., Jelinek, V., 2008. Anisoft 4.2. - Anisotropy data browser, in: 11th Castle Meeting, Bojnice, Slovakia, 22–28 June.
- Church, M.J., Peters, C., Batt, C.M., 2007. Sourcing Fire Ash on Archaeological Sites in the Western and Northern Isles of Scotland, Using Mineral Magnetism. *Geoarchaeology* 22, 747–774. <https://doi.org/10.1002/GEA>
- Coe, R.S., Hongre, L., Glatzmaier, G.A., 2000. An examination of simulated geomagnetic reversals from a palaeomagnetic perspective. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 358, 1141–1170.
- Day, R., 1975. Some curious thermomagnetic curves and their interpretation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 27, 95–100. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90166-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90166-1)
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.* 13, 260–267.
- Dorta Pérez, R., Hernández Gómez, C., Molina Hernández, F., Galván Santos, B., 2010. La alteración térmica en los sílex de los valles alcoyanos (Alicante, España): una aproximación desde la arqueología experimental en contextos del Paleolítico Medio: El Salt. *Recer. del Mus. d'Alcoi* 19, 33–64.
- Dunlop, D.J., 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.* 107, EPM4-1-EPM4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>
- Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 1997. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers.* Cambridge University Press, New York.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Euba, I., Allué, E., Burjachs, F., 2016. Wood uses at El Mirador Cave (Atapuerca, Burgos) based on anthracology and dendrology. *Quat. Int.* 414, 285–293.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.084>
- Fabian, K., 2003. Some additional parameters to estimate domain state from isothermal magnetization measurements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 213, 337–345. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00329-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00329-7)
- Fagoaga, A., Blain, H., Marquina-blasco, R., Ruiz-s, F.J., 2019. Improving the

- accuracy of small vertebrate-based palaeoclimatic reconstructions derived from the Mutual Ecogeographic Range . A case study using geographic information systems and UDA-ODA discrimination methodology. *Quat. Sci. Rev.* 223. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105969>
- Fagoaga, A., Ruiz-Sánchez, F.J., Laplana, C., Blain, H.A., Marquina, R., Marin-Monfort, M.D., Galván, B., 2017. Palaeoecological implications of Neanderthal occupation at Unit Xb of El Salt (Alcoi, eastern Spain) during MIS 3 using small mammals proxy. *Quat. Int.* 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.10.024>
- Fernández-Eraso, J., 2012. Abrigo de San Cristóbal. Quinta campaña de excavaciones. *Arkeoikuska* 11.
- Fernández-Eraso, J., 2011. Abrigo de San Cristóbal. Cuarta campaña de excavaciones. *Arkeoikuska* 10.
- Fernández-Eraso, J., 2010. Abrigo de San Cristóbal. Tercera campaña de excavaciones. *Arkeoikuska* 09.
- Fernández-Eraso, J., 2009. Abrigo de San Cristóbal. Segunda campaña de excavaciones. *Arkeoikuska* 8.
- Fernández-Eraso, J., 2002. Excavaciones en San Cristóbal (Laguardia). *Arkeoikuska* 01.
- Fernández-Eraso, J., Pérez Díaz, S., Ruiz-Alonso, M., Alonso Eguiluz, M., García Rojas, M., Sánchez, A., Tarrío Vinagre, A., Camarero, C., García-Martínez de Lagrán, Í., Arévalo Muñoz, E., Polo Díaz, A., 2017. Rediles y pastores en la Prehistoria Reciente de Rioja Alavesa, in: *Miscelánea En Homenaje a Lydia Zapata Peña (1965-2015)*.
- Fernández-López, S., 1998. Tafonomía y Fossilización. *Tratado Paleontol.* tomo I 51–107.
- Fumanal García, M.P., 1994. El yacimiento musteriense de El Salt (Alcoy, País Valenciano), Rasgos geomorfológicos y climatoestratigrafía de sus registros. *SAGVTVM. Papeles del Lab. Arqueol. Val.* 27, 39–55.
- Gabucio, M.J., Cáceres, I., Rivals, F., Bargalló, A., Rosell, J., Saladié, P., Vallverdú, J., Vaquero, M., Carbonell, E., 2016. Unraveling a Neanderthal palimpsest from a zooarcheological and taphonomic perspective. *Archaeol. Anthropol. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0343-y>
- Gallet, Y., Genevey, A., Le Goff, M., 2002. Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artefacts. *Phys. Earth Planet. Inter.* 131, 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00030-4)
- Galván, B., Hernández, C.M., Mallol, C., Machado, J., Sistiaga, A., Molina, F.J., Pérez Luis, L.J., Afonso, R., Garralda, M.D., Mercier, N., Morales, J. V., Sanchís, A., Tarrío, A., Gómez, J.A., Rodríguez, Á., Abreu, I., Vidal-Matutano, P., 2014a. El Salt. The Last Neanderthals Of The Alicante Mountains (Alcoy, Spain), in: *Pleistocene and Holocene Hunter-Gatherers in Iberia and the Gibraltar Strait. The Current Archaeological Record.* pp. 380–388.
- Galván, B., Hernández, C.M., Mallol, C., Mercier, N., Sistiaga, A., Soler, V., 2014b. New

- evidence of early Neanderthal disappearance in the Iberian Peninsula. *J. Hum. Evol.* 75, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.06.002>
- Galván Santos, B., 1992. El Salt (Alcoi, Alicante): estado actual de las investigaciones. *Recer. Del Mus. D'Alcoi*.
- García-Redondo, N., Carrancho, Goguitchaichvili, A., Morales, J., Calvo-Rathert, M., Palomino, Á., 2020. New constraints on the medieval repopulation process in the northern Iberian plateau from the full vector archaeomagnetic dating of two hearths at La Pudia site (Caleruega, Burgos, Spain). *Archaeol. Anthropol. Sci.* 12, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01041-1>
- Garralda, M.D., Galván, B., Hernández, C.M., Mallol, C., Gómez, J.A., Maureille, B., 2014. Neanderthals from El Salt (Alcoy, Spain) in the context of the latest Middle Palaeolithic populations from the southeast of the Iberian Peninsula. *J. Hum. Evol.* 75, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.02.019>
- Girdler, R.W., 1961. The Measurement and Computation of Anisotropy of Magnetic Susceptibility of Rocks 1961. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 5, 34–44.
- Glatzmaier, G.A., Coe, R.S., 2015. Magnetic Polarity Reversals in the Core, in: *Treatise on Geophysics*. Elsevier B.V., pp. 283–297. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00135-8>
- Glatzmaier, G.A., Olson, P., 2005. Probing the Geodynam. *Sci. Am.*
- Goguitchaichvili, A., Ortega, V., Archer, J., Morales, J., Guerrero, A.T., 2017. Absolute geomagnetic intensity record from pre-Columbian pottery dates elite Tlailotlacan Woman in ancient Teotihuacan. *J. Archaeol. Sci. Reports* 14, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.030>
- Goldberg, P., Miller, C.E., Mentzer, S.M., 2017. Recognizing Fire in the Paleolithic Archaeological Record. *Curr. Anthropol.* 58, S175–S190. <https://doi.org/10.1086/692729>
- Gómez-Paccard, M., Beamud, E., 2008. Recent achievements in archaeomagnetic dating in the Iberian Peninsula: application to Roman and Mediaeval Spanish structures. *J. Archaeol. Sci.* 35, 1389–1398. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.10.005>
- Gómez-Paccard, M., Catanzariti, G., Ruiz-Martínez, V.C., McIntosh, G., Núñez, J.I., Osete, M.L., Chauvin, A., Lanos, P., Tarling, D.H., Bernal-Casasola, D., Thiriou, J., Sáez-Espligares, A., Garcia-Villanueva, I., Gisbert-Santonja, J.A., Hervás, M.A., Jiménez-Castillo, P., Mesquida-García, M., Navarro, I., Orfila-Pons, M., Ramirez-González, I., Retuerce, M., Urbina, D., Urquijo, C., 2006. A catalogue of Spanish archaeomagnetic data. *Geophys. J. Int.* 166, 1125–1143. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03020.x>
- Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Lanos, P., McIntosh, G., Osete, M.L., Catanzariti, G., Ruiz-Martínez, V.C., Núñez, J.I., 2006. First archaeomagnetic secular variation curve for the Iberian Peninsula: Comparison with other data from western Europe and with global geomagnetic field models. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 7. <https://doi.org/10.1029/2006GC001476>
- Gómez-Paccard, M., Rivero-Montero, M., Chauvin, A., García i Rubert, D., Palencia-Ortas, A., 2019a. Revisiting the chronology of the Early Iron Age in the north-eastern Iberian. *Archaeol. Anthropol. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s12520->

- Gómez-Paccard, M., Rivero-Montero, M., Chauvin, A., García i Rubert, D., Palencia-Ortas, A., 2019b. Revisiting the chronology of the Early Iron Age in the north-eastern Iberian Peninsula. *Archaeol. Anthropol. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00812-9>
- Gómez-Sánchez, D., Olalde, Í., Pierini, F., Matas-Lalueza, L., Gigli, E., Lari, M., Civit, S., Lozano, M., Vergés, J.M., Caramelli, D., Ramírez, O., Lalueza-Fox, C., 2014. Mitochondrial DNA from El Mirador cave (Atapuerca, Spain) reveals the heterogeneity of Chalcolithic populations. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105105>
- Gose, W.A., 2000. Palaeomagnetic Studies of Burned Rocks. *J. Archaeol. Sci.* 27, 409–421. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0465>
- Gowlett, J.A.J., Wrangham, R.W., 2013. Earliest fire in Africa: Towards the convergence of archaeological evidence and the cooking hypothesis. *Azania Archaeol. Res. Africa* 48, 5–30. <https://doi.org/10.1080/0067270X.2012.756754>
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., 2004. *Geologic Time Scale*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gubbins, D., 1999. The distinction between geomagnetic excursions and reversals. *Geophys. J. Int.* 137. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00810.x>
- Guillou, H., Singer, B.S., Laj, C., Kissel, C., Scaillet, S., Jicha, B.R., 2004. On the age of the Laschamp geomagnetic excursion. *Earth Planet. Sci. Lett.* 227, 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.018>
- Hathaway, J.H., 1990a. Determining the Source of Remanence in Archaeological Soils: A Microscopic Study of Heated and Unheated Soils, in: Eighmy, J.L., Sternberg, R.S. (Eds.), *Archaeomagnetic Dating*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 178–194.
- Hathaway, J.H., 1990b. Firing temperature and Time as Variables Affecting the Quality of Archaeomagnetic Results, in: Eighmy, J.L., Sternberg, R.S. (Eds.), *Archaeomagnetic Dating*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 158–167.
- Henry, D., 2012. The palimpsest problem, hearth pattern analysis, and Middle Paleolithic site structure. *Quat. Int.* 247, 246–266. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.10.013>
- Herrejón Lagunilla, Á., Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Mallol, C., Hernández, C.M., 2019. An experimental approach to the preservation potential of magnetic signatures in anthropogenic fires. *PLoS ONE* 14 (8): e0221592. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592>
- Herries, A.I.R., 2009. New approaches for integrating palaeomagnetic and mineral magnetic methods to answer archaeological and geological questions on Stone Age sites, in: *New Directions in Archaeological Science*. pp. 235–253. <https://doi.org/10.1093/jac/dkt393>
- Hervé, G., Chauvin, A., Lanos, P., 2013a. Geomagnetic field variations in Western Europe from 1500BC to 200AD. Part II: New intensity secular variation curve. *Phys. Earth Planet. Inter.* 218, 51–65.

<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.02.003>

- Hervé, G., Chauvin, A., Lanos, P., 2013b. Geomagnetic field variations in Western Europe from 1500BC to 200AD. Part I: Directional secular variation curve. *Phys. Earth Planet. Inter.* 218, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2013.02.002>
- Hervé, G., Lanos, P., 2017. Improvements in Archaeomagnetic Dating in Western Europe from the Late Bronze to the Late Iron Ages: An Alternative to the Problem of the Hallstattian Radiocarbon Plateau. *Archaeometry*. <https://doi.org/10.1111/arcm.12344>
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.* 5, 37–82. <https://doi.org/10.1007/BF01450244>
- Hrouda, F., Müller, P., Hanák, J., 2003. Repeated progressive heating in susceptibility vs. temperature investigation; a new palaeotemperature indicator? *Phys. Chem. Earth* 28, 653–657.
- Jackson, A., Finlay, C.C., 2007. *Geomagnetic Secular Variation and Its Applications to the Core*, Treatise on Geophysics. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00090-0>
- Jambrina-Enríquez, M., Herrera-Herrera, A. V., Mallol, C., 2018. Wax lipids in fresh and charred anatomical parts of the *Celtis australis* tree: Insights on paleofire interpretation. *Org. Geochem.* 122, 147–160. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.05.017>
- Jambrina-Enríquez, M., Herrera-Herrera, A. V., Rodríguez de Vera, C., Leierer, L., Connolly, R., Mallol, C., 2019. n-Alkyl nitriles and compound-specific carbon isotope analysis of lipid combustion residues from Neanderthal and experimental hearths: Identifying sources of organic compounds and combustion temperatures. *Quat. Sci. Rev.* 222, 105899. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105899>
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics* 79, 63–67. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90110-4)
- Jordanova, N., 2017. Applications of soil magnetism, *Soil Magnetism*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809239-2.00010-3>
- Jordanova, N., Jordanova, D., Mokreva, A., Ishlyanski, D., Georgieva, B., 2019. Temporal changes in magnetic signal of burnt soils – A compelling three years pilot study. *Sci. Total Environ.* 669, 729–738. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.173>
- Jordanova, N., Kovacheva, M., Kostadinova, M., 2004. Archaeomagnetic investigation and dating of Neolithic archaeological site (Kovachevo) from Bulgaria. *Phys. Earth Planet. Inter.* 147, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.02.012>
- Jordanova, N., Petrovsky, E., Kovacheva, M., Jordanova, D., 2001. Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from Archaeological sites. *J. Archaeol. Sci.* 28, 1137–1148. <https://doi.org/10.1006/jasc.2000.0645>
- Kapper, K.L., Anesin, D., Donadini, F., Angelucci, D.E., Cavulli, F., Pedrotti, A., Hirt, A.M., 2014a. Linking site formation processes to magnetic properties. Rock- and archeomagnetic analysis of the combustion levels at Riparo Gaban (Italy).

- J. Archaeol. Sci. 41, 836–855. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.10.015>
- Kapper, K.L., Donadini, F., Hirt, A.M., 2015. Holocene archeointensities from mid European ceramics, slags, burned sediments and cherts. *Phys. Earth Planet. Inter.* 241, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.12.006>
- Kapper, K.L., Donadini, F., Mauvilly, M., Panovska, S., Hirt, A.M., 2014b. New directional archaeomagnetic data of burned cave sediments from Switzerland and geomagnetic field variations in Central Europe. *Geophys. J. Int.* 198, 1208–1221. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu184>
- Kapper, L., Donadini, F., Serneels, V., Tema, E., Goguitchaichvili, A., Julio Morales, J., 2017. Reconstructing the Geomagnetic Field in West Africa: First Absolute Intensity Results from Burkina Faso. *Sci. Rep.* 7. <https://doi.org/10.1038/srep45225>
- Knicker, H., 2007. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry* 85, 91–118. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9104-4>
- Korte, M., Brown, M.C., Panovska, S., Wardinski, I., 2019. Robust characteristics of the laschamp and mono lake geomagnetic excursions: Results from global field models. *Front. Earth Sci.* 7, 1–21. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00086>
- Kostadinova-Avramova, M., Kovacheva, M., 2013. The magnetic properties of baked clays and their implications for past geomagnetic field intensity determinations. *Geophys. J. Int.* 195, 1534–1550. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt329>
- Kruiver, P.P., Dekkers, M.J., Heslop, D., 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 189, 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3)
- Laj, C., Channell, J.E.T., 2007. Geomagnetic Excursions. *Treatise Geophys.* 5, 373–416. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00095-X>
- Lanos, P., 2004. Bayesian Inference of Calibration Curves: Application to Archaeomagnetism, in: Buck, C.E., Millard, A.R. (Eds.), *Tools for Constructing Chronologies*. Springer.
- Leierer, L., Jambriña-Enríguez, M., Herrera-Herrera, A. V., Connolly, R., Hernández, C.M., Galván, B., Mallol, C., 2019. Insights into the timing, intensity and natural setting of Neanderthal occupation from the geoarchaeological study of combustion structures: A micromorphological and biomarker investigation of El Salt, unit Xb, Alcoy, Spain, *Plos One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214955>
- Leonhardt, R., 2006. Analyzing rock magnetic measurements: The RockMagAnalyzer 1.0 software. *Comput. Geosci.* 32, 1420–1431. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.01.006>
- López-Sánchez, J., McIntosh, G., Osete, M.L., del Campo, A., Villalaín, J.J., Kovacheva, M., Rodríguez de la Fuente, O., 2017. Epsilon iron oxide: Origin of the high coercivity stable low Curie temperature magnetic phase found in heated archaeological materials. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 18, 2646–2656.

<https://doi.org/10.1002/2017GC006821>

- Lowrie, W., 2007. Geomagnetic Polarity Timescales, in: *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism* 2. pp. 328–333.
- Machado Gutiérrez, J., 2016. Palimpsestos, dinámicas de asentamiento y gestión de los recursos líticos durante el Paleolítico medio en la montaña alicantina (España). Universidad de La Laguna.
- Machado, J., Mallol, C., Hernández, C.M., 2015. Insights into Eurasian Middle Paleolithic Settlement Dynamics: The Palimpsest Problem. *Settl. Dyn. Middle Paleolit. Middle Stone Age IV*, 361–382.
- Machado, J., Molina, F.J., Hernández, C.M., Tarrío, A., Galván, B., 2016. Using lithic assemblage formation to approach Middle Palaeolithic settlement dynamics: El Salt Stratigraphic Unit X (Alicante, Spain). *Archaeol. Anthropol. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0318-z>
- Machado, J., Pérez, L.J., 2016. Temporal frameworks to approach human behavior concealed in Middle Palaeolithic palimpsests: A high-resolution example from El Salt Stratigraphic Unit X (Alicante, Spain). *Quat. Int.* 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.050>
- Maki, D., Homburg, J.A., Brosowske, S.D., 2006. Thermally activated mineralogical transformations in archaeological hearths: Inversion from maghemite $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_4$ phase to haematite $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_4$ form. *Archaeol. Prospect.* 13, 207–227. <https://doi.org/10.1002/arp.277>
- Mallol, C., Henry, A., 2017. Ethnoarchaeology of Paleolithic Fire: Methodological Considerations. *Curr. Anthropol.* 58, S217–S229. <https://doi.org/10.1086/691422>
- Mallol, C., Hernández, C., 2016. Advances in palimpsest dissection. *Quat. Int.* 417, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.021>
- Mallol, C., Hernández, C., Mercier, N., Falguères, C., Carrancho, Á., Cabanes, D., Vidal-Matutano, P., Connolly, R., Pérez, L., Mayor, A., Ben Arous, E., Galván, B., 2019. Fire and brief human occupations in Iberia during MIS 4: Evidence from Abric del Pastor (Alcoy, Spain). *Sci. Rep.* 9, 18281. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54305-9>
- Mallol, C., Hernández, C.M., Cabanes, D., Machado, J., Sistiaga, A., Pérez, L., Galván, B., 2013a. Human actions performed on simple combustion structures: An experimental approach to the study of Middle Palaeolithic fire. *Quat. Int.* 315, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.04.009>
- Mallol, C., Hernández, C.M., Cabanes, D., Sistiaga, A., Machado, J., Rodríguez, Á., Pérez, L., Galván, B., 2013b. The black layer of Middle Palaeolithic combustion structures. Interpretation and archaeostratigraphic implications. *J. Archaeol. Sci.* 40, 2515–2537. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.017>
- Mallol, C., Mentzer, S.M., Miller, C.E., 2017. Combustion Features, in: *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*. Wiley Online Library, pp. 299–330.
- Marquina, R., Fagoaga, A., Crespo, V.D., Ruiz-Sánchez, F.J., Bailon, S., Hernández, C.M., Galván, B., 2017. Amphibians and squamate reptiles from the stratigraphic unit Xb of El Salt (Middle Palaeolithic; Alcoy , Spain): palaeoenvironmental and palaeoclimatic 2.

- Mayor, A., Hernández, C.M., Machado, J., Mallol, C., Galván, B., Mayor, A., 2020. On identifying Palaeolithic single occupation episodes : archaeostratigraphic and technological approaches to the Neanderthal lithic record of stratigraphic unit X a of El Salt (Alcoi , eastern Iberia) 4.
- McCabe, C., Jackson, M., 1985. Magnetic anisotropy in the Trenton Limestone: results of a new technique, anisotropy of anhysteretic susceptibility. *Geophys. Res. Lett.* 12, 333–336.
- McClellan, R.G., Kean, W.F., 1993. Contributions of wood ash magnetism to archaeomagnetic properties of fire pits and hearths. *Earth Planet. Sci. Lett.* 119, 387–394.
- McElhinny, M., 2004. Geocentric axial dipole hypothesis: a least squares perspective. *Time-scales Paleomagn. F.* 145, 1–12.
- McFadden, P.L., McElhinny, M.W., 1990. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophys. J. Int.* 103, 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- McIntosh, G., Kovacheva, M., Catanzariti, G., Osete, M.L., Casas, L., 2007. Widespread occurrence of a novel high coercivity, thermally stable, low unblocking temperature magnetic phase in heated archeological material. *Geophys. Res. Lett.* 34, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL031168>
- Mercier, N., Valladas, H., Joron, J.L., Schiegl, S., Bar-Yosef, O., Weiner, S., 1995. Thermoluminescence (TL) Dating and the problem of geochemical evolution of sediments. A case study: the Mousterien levels at Hayonim. *Isr. J. Chem.* 35, 137–142.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., 1983. *The Earth's Magnetic Field. Its History, Origin and Planetary Perspective*, ぎょうせい. Academic Press.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L., Banerjee, S.K., 1997. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*, Physics Today. <https://doi.org/10.1063/1.881919>
- Middleton, M.F., Schmidt, P.W., 1982. Paleothermometry of Sydney Basin. *J. Geophys. Res.* 87, 5351–5359.
- Molina-Cardín, A., Campuzano, S.A., Osete, M.L., Rivero-Montero, M., Pavón-Carrasco, F.J., Palencia-Ortas, A., Martín-Hernández, F., Gómez-Paccard, M., Chauvin, A., Guerrero-Suárez, S., Pérez-Fuentes, J.C., McIntosh, G., Catanzariti, G., Sastre Blanco, J.C., Larrazabal, J., Fernández Martínez, V.M., Álvarez Sanchís, J.R., Rodríguez-Hernández, J., Martín Viso, I., Garcia i Rubert, D., 2018. Updated Iberian Archeomagnetic Catalogue: New Full Vector Paleosecular Variation Curve for the Last Three Millennia. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 19, 3637–3656. <https://doi.org/10.1029/2018GC007781>
- Mora Torcal, R., Roy Sunyer, M., Martínez-Moreno, J., Benito-Calvo, A., Samper Carro, S., 2020. Inside the Palimpsest: Identifying Short Occupations in the 497D Level of Cova Gran (Iberia), in: *Short-Term Occupations in Paleolithic Archaeology: Definition and Interpretation*. pp. 39–69. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27403-0>
- Morinaga, H., Inokuchi, H., Yamashita, H., Ono, A., Inada, T., 1999. Magnetic detection of heated soils at Paleolithic sites in Japan. *Geoarchaeology* 14, 377–

399. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6548\(199906\)14:5<377::AID-GEA2>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6548(199906)14:5<377::AID-GEA2>3.0.CO;2-S)
- Mullender, T.A.T., Frederichs, T., Hilgenfeldt, C., de Groot, L. V., Fabian, K., Dekkers, M.J., 2016. Automated paleomagnetic and rock magnetic data acquisition with an in-line horizontal “2G” system. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 17, 3546–3559. <https://doi.org/10.1002/2016GC006436>
- Néel, L., 1955. Some theoretical aspects of rock magnetism. *Adv. Phys.* 4, 191–243.
- Néel, L., 1949. Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites. *Ann. Géophysique* 5, 99–136.
- Nowaczyk, N.R., Arz, H.W., Frank, U., Kind, J., Plessen, B., 2012. Dynamics of the Laschamp geomagnetic excursion from Black Sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 351–352, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.050>
- Osete, M.L., Catanzariti, G., Chauvin, A., Pavón-Carrasco, F.J., Roperch, P., Fernández, V.M., 2015. First archaeomagnetic field intensity data from Ethiopia, Africa (1615±12AD). *Phys. Earth Planet. Inter.* 242, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.03.003>
- Osete, M.L., Chauvin, A., Catanzariti, G., Jimeno, A., Campuzano, S.A., Benito-Batanero, J.P., Taberner-Galán, C., Roperch, P., 2016. New archaeomagnetic data recovered from the study of celtiberic remains from central Spain (Numantia and Ciadueña, 3rd-1st centuries BC). Implications on the fidelity of the Iberian paleointensity database. *Phys. Earth Planet. Inter.* 260, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.09.006>
- Osete, M.L., Molina-Cardín, A., Campuzano, S.A., Aguilera-Arzo, G., Barrachina-Ibañez, A., Falomir-Granel, F., Oliver Foix, A., Gómez-Paccard, M., Martín-Hernández, F., Palencia-Ortas, A., Pavón-Carrasco, F.J., Rivero-Montero, M., 2020. Two archaeomagnetic intensity maxima and rapid directional variation rates during the Early Iron Age observed at Iberian coordinates. Implications on the evolution of the Levantine Iron Age Anomaly. *Earth Planet. Sci. Lett.* 533, 116047. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116047>
- Palencia-Ortas, A., Osete, M.L., Campuzano, S.A., McIntosh, G., Larrazabal, J., Sastre, J., Rodríguez-Aranda, J., 2017. New archaeomagnetic directions from Portugal and evolution of the geomagnetic field in Iberia from Late Bronze Age to Roman Times. *Phys. Earth Planet. Inter.* 270, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.07.004>
- Panovska, S., Constable, C.G., Korte, M., 2018. Extending Global Continuous Geomagnetic Field Reconstructions on Timescales Beyond Human Civilization. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 19, 4757–4772. <https://doi.org/10.1029/2018GC007966>
- Panovska, S., Korte, M., Finlay, C.C., Constable, C.G., 2015. Limitations in paleomagnetic data and modelling techniques and their impact on Holocene geomagnetic field models. *Geophys. J. Int.* 202, 402–418. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv137>
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., De Santis, A., 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth Planet. Sci. Lett.* 388, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>

- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., Gaya-Piqué, L.R., 2009. A regional archeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: Applications to archeomagnetic dating. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 10, 1–22. <https://doi.org/10.1029/2008GC002244>
- Pérez-Luis, L.J., Sanchis, A., Hernández, C.M., Galván, B., 2017. Paleoeología de macromamíferos de El Salt y el Abric Pastor (Alcoy, Alicante). *Interaccions entre felins i humans. III Jornades d'arqueozoologia* 327–353.
- Pérez, L., Sanchis, A., Hernández, C.M., Galván, B., Sala, R., Mallol, C., 2017. Hearths and bones: An experimental study to explore temporality in archaeological contexts based on taphonomical changes in burnt bones. *J. Archaeol. Sci. Reports* 11, 287–309. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.036>
- Pérez, L.J., 2015. Aproximación experimental a los indicadores de desocupación humana en yacimientos del Pleistoceno superior a partir de los restos termoalterados de conejo. *Preses petites i Grup. humans en el passat. II Jornades d'arqueozoologia* 27–46.
- Pérez, L.J., Machado, J., Hernández, C.M., Morales, J., Brugal, J.P., Galván Santos, B., 2015. Arqueozoología y Arqueoestratigrafía del Yacimiento de El Salt (Alcoi, Alicante): Contribución metodológica para el análisis del registro faunístico contenido en palimpsestos arqueológicos del Paleolítico medio. *Preses petites i Grup. humans en el passat. II Jornades d'arqueozoologi* 223–244.
- Pérez, L.J., Machado, J., Sanchis, A., Hernández, C.M., Mallol, C., Galván, B., 2020. A High Temporal Resolution Zooarchaeological Approach to Neanderthal Subsistence Strategies on the Southeastern Iberian Peninsula: El Salt Stratigraphic Unit Xa (Alicante, Spain), in: Cascalheira, J., Picin, A. (Eds.), *Short-Term Occupations in Paleolithic Archaeology: Definition and Interpretation*. Springer, pp. 237–289.
- Pérez Luis, L.J., 2019. Estrategias de subsistencia y dinámicas de asentamiento en los Valles de Alcoy durante el Paleolítico Medio. *Análisis zooarqueológico, tafonómico y paleoecológico de la secuencia arqueológica de El Salt (Alcoy, Alicante)*. Universitat Rovira i Virgili.
- Péter, M., Ferencz, E., 2006. Hierarchical versus stratification statistical analysis of archaeomagnetic directions: The secular variation curve for Hungary. *Geophys. J. Int.* 164, 484–489. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02873.x>
- Peters, C., Church, M.J., Mitchell, C., 2001. Investigation of fire ash residues using mineral magnetism. *Archaeol. Prospect.* 8, 227–237. <https://doi.org/10.1002/arp.171>
- Plénier, G., Valet, J.P., Guérin, G., Lefèvre, J.C., LeGoff, M., Carter-Stiglitz, B., 2007. Origin and age of the directions recorded during the Laschamp event in the Chaîne des Puys (France). *Earth Planet. Sci. Lett.* 259, 414–431. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.039>
- Polo-Díaz, A., Alonso Eguíluz, M., Ruiz, M., Pérez, S., Mújika, J., Albert, R.M., Fernández Eraso, J., 2016. Management of residues and natural resources at San Cristóbal rock-shelter: Contribution to the characterisation of chalcolithic agropastoral groups in the Iberian Peninsula. *Quat. Int.* 414, 202–225.

<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.02.013>

- Pullaiah, G., Irving, E., Buchan, K.L., Dunlop, D.J., 1975. Magnetization changes caused by burial and uplift. *Earth Planet. Sci. Lett.* 28, 133–143. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90221-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90221-6)
- Reimer, P.J., Edouard Bard, B., Alex Bayliss, B., Warren Beck, B.J., Paul Blackwell, B.G., Christopher Bronk Ramsey, B., 2013. Intcal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years Cal Bp. *Radiocarbon* 55, 1869–1887. <https://doi.org/10.1017/S0033822200048864>
- Roberts, A.P., 2008. Geomagnetic excursions: Knowns and unknowns. *Geophys. Res. Lett.* 35, 1–7. <https://doi.org/10.1029/2008GL034719>
- Roberts, A.P., Almeida, T.P., Church, N.S., Harrison, R.J., Heslop, D., Li, Y., Muxworthy, A.R., Williams, W., Zhao, X., 2017. Resolving the origin of pseudo-single domain magnetic behavior. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 9534–9558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JB014860>
- Roberts, A.P., Chang, L., Rowan, Ch.J., Horng, C.-S., Florindo, F., 2011. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe₃S₄): an update. *Rev. Geophys.* 49, 1–46. <https://doi.org/10.1029/2010RG000336.1.INTRODUCTION>
- Roberts, A.P., Tauxe, L., Heslop, D., Zhao, X., Jiang, Z., 2018. A Critical Appraisal of the “Day” Diagram. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 123, 2618–2644. <https://doi.org/10.1002/2017JB015247>
- Roberts, A.P., Turner, G.M., 2013. Geomagnetic Excursions and Secular Variations, 2nd ed, *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00053-4>
- Rodríguez-Cintas, Á., Cabanes, D., 2017. Phytolith and FTIR studies applied to combustion structures: The case of the Middle Paleolithic site of El Salt (Alcoy, Alicante). *Quat. Int.* 431, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.043>
- Sagnotti, L., Scardia, G., Giaccio, B., Liddicoat, J.C., Nomade, S., Renne, P.R., Sprain, C.J., 2015. Extremely rapid directional change during Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity reversal. *Geophys. J. Int.* 199, 1110–1124. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu287>
- Schiegl, S., Goldberg, P., Bar-Yosef, O., Weiner, S., 1996. Ash Deposits in Hayonim and Kebara Caves, Israel: Macroscopic, Microscopic and Mineralogical Observations, and their Archaeological Implications. *J. Archaeol. Sci.* 23, 763–781. <https://doi.org/10.1006/jasc.1996.0071>
- Schnepf, E., Lanos, P., 2006. A preliminary secular variation reference curve for archaeomagnetic dating in Austria. *Geophys. J. Int.* 166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03012.x>
- Schnepf, E., Lanos, P., 2005. Archaeomagnetic secular variation in Germany during the past 2500 years. *Geophys. J. Int.* 163, 479–490. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02734.x>
- Schnepf, E., Lanos, P., Chauvin, A., 2009. Geomagnetic paleointensity between 1300 and 1750 A.D. derived from a bread oven floor sequence in Lübeck, Germany. *Geochemistry, Geophysics. Geosystems* 10. <https://doi.org/10.1029/2009GC002470>

- Schnepp, E., Obenaus, M., Lanos, P., 2015. Posterior archaeomagnetic dating: An example from the Early Medieval site Thunau am Kamp, Austria. *J. Archaeol. Sci. Reports* 2, 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2014.12.002>
- Shahack-Gross, R., Shaar, R., Hassul, E., Ebert, Y., Forget, M., Nowaczyk, N., Marco, S., Finkelstein, I., Agnon, A., 2018. Fire and collapse: Untangling the formation of destruction layers using archaeomagnetism. *Geoarchaeology* 1–16. <https://doi.org/10.1002/gea.21668>
- Smith, G.P., 1990. Cube Size and Refiring as Factors that Influence Archaeomagnetic Results, in: Eighmy, J.L., Sternberg, R.S. (Eds.), *Archaeomagnetic Dating*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 148–157.
- Stacey, F.D., 1967. The Koenigsberger ratio and the nature of thermoremanence in igneous rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2, 67–68. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(67\)90174-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(67)90174-4)
- Stern, N., 1993. The Structure of the Lower Pleistocene Archaeological Record: A Case Study From the Koobi Fora Formation. *Curr. Anthropol.* 34, 201–225. <https://doi.org/10.1086/204164>
- Sternberg, R.S., 1989. Secular variation of archaeomagnetic direction in the American southwest, A.D. 700–1450. *J. Geophys. Res.* 94, 527–546.
- Sternberg, R.S., Lass, E.H.E., 2007. An Archaeomagnetic Study of Two Hearths from Keabara Cave, Israel, in: Bar-Yosef, O., Meignen, L. (Eds.), *Kebara Cave, Mt. Carmel, Israel. The Middle and Upper Paleolithic Archaeology. Part I*. Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University, Cambridge.
- Tarling, D.H., Hrouda, F., 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall, London.
- Tauxe, L., 2008. *Essentials of Rock and Paleomagnetism*.
- Tauxe, L., 2005. Inclination flattening and the geocentric axial dipole hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.* 233, 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.027>
- Tauxe, L., Shaar, R., Jonestrask, L., Swanson-Hysell, N.L., Minnett, R., Koppers, A.A.P., Constable, C.G., Jarboe, N., Gaastra, K., Fairchild, L., 2016. PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetics Information Consortium (MagIC) Database. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 17, 2450–2463. <https://doi.org/10.1002/2015GC006307>
- Tema, E., Ferrara, E., 2019. Magnetic measurements as indicator of the equivalent firing temperature of ancient baked clays: New results, limits and cautions. *J. Cult. Herit.* 35, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.05.008>
- Tema, E., Hedley, I., Lanos, P., 2006. Archaeomagnetism in Italy: A compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve. *Geophys. J. Int.* 167, 1160–1171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03150.x>
- Tema, E., Kondopoulou, D., 2011. Secular variation of the Earth's magnetic field in the Balkan region during the last eight millennia based on archaeomagnetic data. *Geophys. J. Int.* 186, 603–614. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05088.x>

- Thébault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., Léger, J.M., Lesur, V., Lowes, F.J., Macmillan, S., Mande, M., Manoj, C., Maus, S., Olsen, N., Petrov, V., Ridley, V., Rother, M., Sabaka, T.J., Saturnino, D., Schachtschneider, R., Sirol, O., Tangborn, A., Thomson, A., Tøffner-Clausen, L., Vigneron, P., Wardinski, I., Zvereva, T., 2015. International geomagnetic reference field: The 12th generation. *Earth, Planets Sp.* 67, 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
- Torres-López, S., Villalaín, J.J., Casas-Sainz, A.M., El Ouardi, H., Moussaid, B., Ruiz-Martínez, V.C., 2014. Widespread Cretaceous secondary magnetization in the High Atlas (Morocco). A common origin for the Cretaceous remagnetizations in the western Tethys? *J. Geol. Soc. London.* <https://doi.org/10.1144/jgs2013-107>
- Urban, T.M., Rasic, J.T., Alix, C., Anderson, D.D., Chisholm, L., Jacob, R.W., Manning, S.W., Mason, O.K., Tremayne, A.H., Vinson, D., 2019. Magnetic detection of archaeological hearths in Alaska: A tool for investigating the full span of human presence at the gateway to North America. *Quat. Sci. Rev.* 211, 73–92. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.018>
- Valet, J.P., Fournier, A., Courtillot, V., Herrero-Bervera, E., 2012. Dynamical similarity of geomagnetic field reversals. *Nature* 490, 89–93. <https://doi.org/10.1038/nature11491>
- Vaquero, M., 2014. Análisis micro-espacial: áreas domésticas, variabilidad funcional y patrones temporales, in: García-Diez, M., Zapata, L. (Eds.), *Métodos y Técnicas de Análisis y Estudio En Arqueología Prehistórica*. Universidad del País Vasco, pp. 245–271.
- Vaquero, M., Chacón, M.G., García-Antón, M.D., Gómez de Soler, B., Martínez, K., Cuartero, F., 2012. Time and space in the formation of lithic assemblages: The example of Abric Romaní Level J. *Quat. Int.* 247, 162–181. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.12.015>
- Vega-Maeso, C., Carmona-Ballester, E., Sierra Sainz-Aja, A., Marín-Arroyo, A.B., 2015. El Abrigo de la Castañera (Cantabria, Spain): A Chalcolithic cattle stable? *Quat. Int.* 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.047>
- Vega Maeso, C., 2015. La cerámica inciso-impresa en el tránsito del III al II milenio cal. B.C. en la región Cantábrica. Universidad de Cantabria.
- Vergès, J.M., Allué, E., Angelucci, D.E., Burjachs, F., Carrancho, Á., Cebrià, A., Expósito, I., Fontanals, M., Moral, S., Rodríguez, A., Vaquero, M., 2008. Los niveles neolíticos de la cueva de El Mirador (Sierra de Atapuerca, Burgos): nuevos datos sobre la implantación y el desarrollo de la economía agropecuaria en la submeseta norte, in: (Coords.), Hernández-Pérez, M.S., Soler Díaz, J.A., López Padilla, J.A. (Eds.), *IV Congreso Del Neolítico Peninsular: 27-30 de Noviembre de 2006*. pp. 1–10.
- Vergès, J.M., Allué, E., Angelucci, D.E., Cebrià Escuer, A., Díez Fernández-Lomana, J.C., Fontanals Torroja, M., Antoni, M., Montero Ponseti, S., del Hoyo, S., Vaquero Rodríguez, M., Zaragoza Solé, J., 2002. La sierra de Atapuerca durante

- el Holoceno: datos preliminares sobre las ocupaciones de la Edad del Bronce en la Cueva de El Mirador (Ibeas de Juarros, Burgos). *Trab. Prehist.* 59, 107–126.
- Vergès, J.M., Allué, E., Fontanals, M., 2016a. Shepherds and Caves. *Quat. Int.* 10–12. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.04.039>
- Vergès, J.M., Allué, E., Fontanals, M., Morales, J.I., Martín, P., Carrancho, Á., Expósito, I., Guardiola, M., Lozano, M., Marsal, R., Oms, X., Euba, I., Rodríguez, A., 2016b. El Mirador cave (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain): A whole perspective. *Quat. Int.* 414, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.01.044>
- Vidal-Matutano, P., 2016. Firewood and hearths: Middle Palaeolithic woody taxa distribution from El Salt, stratigraphic unit Xb (Eastern Iberia). *Quat. Int.* 457, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.040>
- Vidal-Matutano, P., Henry, A., Théry-Parisot, I., 2017. Dead wood gathering among Neanderthal groups: Charcoal evidence from Abric del Pastor and El Salt (Eastern Iberia). *J. Archaeol. Sci.* 80, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.03.001>
- Villalain, J.J., Ruiz-Martínez, V.C., Torres-López, S., Casas-Sainz, A.M., Moussaid, B., Calvín, P., 2014. Estudio paleomagnético preliminar de diques mesozoicos del Alto Atlas . Control térmico en la generación de pirrotina en calizas remagnetizadas con magnetita . Preliminary paleomagnetic study of mesozoic dikes from the High Atlas. *Geo-Temas* 4–7.
- Villalain Santamaría, J.J., 2016a. La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. *Fundamentos del Paleomagnetismo. Enseñanza las Ciencias la Tierra* 24, 261–274.
- Villalain Santamaría, J.J., 2016b. Técnicas en Paleomagnetismo. *Enseñanza las Ciencias la Tierra* 24, 275–281.
- Walker, M.J., Anesin, D., Angelucci, D.E., Avilés-Fernández, A., Berna, F., Buitrago-López, A.T., Fernández-Jalvo, Y., Haber-Uriarte, M., López-Jiménez, A., López-Martínez, M., Martín-Lerma, I., Ortega-Rodríguez, J., Polo-Camacho, J.-L., Rhodes, S.E., Richter, D., Rodríguez-Estrella, T., Schwenninger, J.-L., Skinner, A.R., 2016. Combustion at the late Early Pleistocene site of Cueva Negra del Estrecho del Río Quípar (Murcia, Spain). *Antiquity* 90, 571–589. <https://doi.org/10.15184/aqy.2016.91>
- Walton, D., 1980. Time-temperature relations in the magnetization of assemblies of single domain grains. *Nature* 286, 245–247.
- Watson, G.S., 1956. Analysis of dispersion on a sphere. *Mon. Not. R. Astron. Soc. - Geophys. Suppl.* 7, 256–261. <https://doi.org/10.1080/14786444508645116>
- Zananiri, I., Batt, C.M., Lanos, P., Tarling, D.H., Linford, P., 2007. Archaeomagnetic secular variation in the UK during the past 4000 years and its application to archaeomagnetic dating. *Phys. Earth Planet. Inter.* 160, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2006.08.006>
- Zeigen, C., Shaar, R., Ebert, Y., Hovers, E., 2019. Archaeomagnetism of burnt cherts and hearths from Middle Palaeolithic Amud Cave, Israel: Tools for reconstructing site formations processes and occupation history. *J. Archaeol. Sci.* 107, 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.05.001>

- Zhang, Y., Guo, Z., Deng, C., Zhang, S., Wu, H., Zhang, C., Ge, J., Zhao, D., Li, Q., Song, Y., Zhu, R., 2014. The use of fire at Zhoukoudian: evidence from magnetic susceptibility and color measurements. *Chinese Sci. Bull.* 59, 1013–1020. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-0111-7>
- Zhong, M., Shi, C., Gao, X., Wu, X., Chen, F., Zhang, S., Zhang, X., Olsen, J.W., 2014. On the possible use of fire by *Homo erectus* at Zhoukoudian, China. *Chinese Sci. Bull.* 59, 335–343. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-0061-0>

Anexos

Anexo 1. Información detallada sobre los especímenes estudiados del conjunto de fuegos experimentales.

NOMBRE DEL ESPECÍMEN	ESTRUCTURA DE COMBUSTIÓN	BLOQUE DE MANO	PROFUNDIDAD*	VOLUMEN (cm³)**	TIPO DE DESMAGNE- TIZACIÓN
EX9PA3X	NFT-9	NFT9-B1	1	5.95	AF
EX9PB3X	NFT-9	NFT9-B1	1	5.52	TH
EX9PB3Y	NFT-9	NFT9-B1	2	8.50	TH
EX9PB4X	NFT-9	NFT9-B1	1	5.95	AF
EX9PC4X	NFT-9	NFT9-B1	1	5.95	TH
EX9PC4Y	NFT-9	NFT9-B1	2	7.23	TH
EX9QB2Y	NFT-9	NFT9-B2	2	6.80	TH
EX9QC3Y	NFT-9	NFT9-B2	2	4.25	TH
EX9QD3X	NFT-9	NFT9-B2	1	5.95	TH
EX9QD3Y	NFT-9	NFT9-B2	2	6.38	TH
NFTco3	NFT-9	NFT9-B1	3	3.36	TH
NFTco4	NFT-9	NFT9-B2	3	3.75	TH
NFTco10	NFT-9	NFT9-B1	3	1.10	TH
NFTco11	NFT-9	NFT9-B1	3	3.03	TH
EX18PAX1	NFT-18	NFT18-B1	1	2.73	AF
EX18QAY2	NFT-18	NFT18-B2	2	3.04	AF
NFT1	NFT-18	NFT18-B1	2	6.83	TH
NFT2	NFT-18	NFT18-B1	1	9.20	TH
NFT3	NFT-18	NFT18-B1	2	9.00	TH
NFT4	NFT-18	NFT18-B1	1	7.50	TH
NFT5	NFT-18	NFT18-B1	2	9.00	TH
NFT6	NFT-18	NFT18-B1	1	9.60	TH
NFT7	NFT-18	NFT18-B1	2	8.80	TH
NFT8	NFT-18	NFT18-B1	1	8.00	TH
NFT9	NFT-18	NFT18-B1	2	7.20	TH
NFT10	NFT-18	NFT18-B2	1	6.50	TH
NFT11	NFT-18	NFT18-B2	2	5.20	TH
NFT12	NFT-18	NFT18-B2	1	7.48	TH
NFT13	NFT-18	NFT18-B2	2	5.25	TH
EX33PBZ1	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	4.56	AF
EX33QBX1	NFT-20-33	NFT-20-33-B2	1	4.88	AF
NFT-19	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	7.48	TH
NFT-20	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	9.35	TH
NFT-21	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	8.50	TH
NFT-22	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	7.13	TH
NFT-23	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	10.8	TH

Anexos

NFT-24	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	9.20	TH
NFT-25	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	2	9.35	TH
NFT-26	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	1	9.60	TH
NFT-27	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	2	9.00	TH
NFT-28	NFT-20-33	NFT-20-33-B2	1	8.25	TH
NFT-29	NFT-20-33	NFT-20-33-B2	2	6.00	TH
NFT-30	NFT-20-33	NFT-20-33-B2	1	8.25	TH
NFT-31	NFT-20-33	NFT-20-33-B2	1	9.60	TH
NFT-32	NFT-20-33	NFT-20-33-B2	1	6.80	TH
NFTco5	NFT-20-33	NFT-20-33-B1	2	3.29	TH
EX21PB2X	NFT-21	NFT-21-B1	1	5.53	TH
EX21PB3X	NFT-21	NFT-21-B1	1	5.95	TH
EX21PC2X	NFT-21	NFT-21-B1	1	3.40	TH
EX21PC3X	NFT-21	NFT-21-B1	1	6.38	TH
EX21QB3X	NFT-21	NFT-21-B2	1	3.83	TH
EX21QC2Y	NFT-21	NFT-21-B2	2	7.23	TH
EX21QC3X	NFT-21	NFT-21-B2	1	6.38	TH
EX21QC4X	NFT-21	NFT-21-B2	1	3.96	AF
EX21QD2X	NFT-21	NFT-21-B2	1	5.40	AF
EX21QD4X	NFT-21	NFT-21-B2	1	5.95	TH
NFTco6	NFT-21	NFT-21-B2	2	3.00	TH
EX22PA4X	NFT-22	NFT-22-B1	1	3.40	TH
EX22PC3X	NFT-22	NFT-22-B1	1	6.80	TH
EX22PC5Y	NFT-22	NFT-22-B1	2	8.50	TH
EX22PD3X	NFT-22	NFT-22-B1	1	5.95	TH
EX22PD4X	NFT-22	NFT-22-B1	1	4.10	AF
EX22PD5Y	NFT-22	NFT-22-B1	2	7.65	TH
EX22QB4X	NFT-22	NFT-22-B2	1	6.40	AF
EX22QC3X	NFT-22	NFT-22-B2	1	6.80	TH
EX22QC3Y	NFT-22	NFT-22-B2	2	7.23	TH
EX22QC4X	NFT-22	NFT-22-B2	1	7.23	TH
EX22QC4Y	NFT-22	NFT-22-B2	2	7.23	TH
NFTco7	NFT-22	NFT-22-B1	2	6.80	TH
NFTco8	NFT-22	NFT-22-B2	2	7.92	TH
NFTco9	NFT-22	NFT-22-B2	2	3.38	TH
NFTco12	NFT-22	NFT-22-B1	3	3.58	TH
NFT-NQ1	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ1-OA	1	9.00	TH
NFT-NQ2	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ1-OA	1	9.00	TH
NFT-NQ3	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ1-OA	1	8.0	TH
NFT-NQ4	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ1-OA	1	8.13	AF
NFT-NQ5	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ2-OA	1	4.63	AF
NFT-NQ6	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ2-OA	2	6.30	TH
NFT-NQ7	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ2-OA	2	5.95	TH
NFT-NQ8	No quemado - AIRE LIBRE	NFT-NQ2-OA	1	4.00	TH
NFT-NQ9	No quemado - CUEVA	NFT-NQ1-CA	1	5.16	AF

NFT-NQ10	No quemado - CUEVA	NFT-NQ1-CA	1	4.50	TH
NFT-NQ11	No quemado - CUEVA	NFT-NQ1-CA	2	4.00	TH
NFT-NQ12	No quemado - CUEVA	NFT-NQ1-CA	1	5.00	TH
NFT-NQ13	No quemado - CUEVA	NFT-NQ2-CA	1	3.97	AF
NFT-NQ14	No quemado - CUEVA	NFT-NQ2-CA	1	3.79	AF
NFT-NQ15	No quemado - CUEVA	NFT-NQ2-CA	1	8.50	TH
NFT-NQ16	No quemado - CUEVA	NFT-NQ2-CA	2	5.50	TH

***CATEGORIAS DE PROFUNDIDAD**

1= 0-2 cm de profundidad (más superficial)

2= 2-4 cm de profundidad (intermedio)

3= 4-6 cm de profundidad (más profundas)

La profundidad fue medida respecto al plano superior del bloque de mano

****VOLUMEN:** el volumen de escayola se ha excluido de este dato

Anexo 2. Información detallada sobre los especímenes estudiados en la unidad X de El Salt.

ESTRUCTURA DE COMBUSTIÓN	BLOQUE DE MANO	PROFUNDIDAD*	MASA (gr)**	VOLUMEN (cm ³)**	TIPO DE DESMAGNETIZACIÓN
H50	C1	1	12.0	12.0	TH
H50	C1	1	12.2	12.4	TH
H50	C1	2	12.5	11.5	TH
H50	C1	1	14.4	10.0	TH
H50	C1	2	14.8	15.5	TH
H50	C1	1	14.1	15.3	TH
H50	C1	2	13.5	13.5	TH
H50	C1	2	14.6	15.9	TH
H50	C1	2	14.0	15.7	TH
H50	C2	2	14.3	11.2	TH
H50	C2	1	13.3	13.1	TH
H50	C2	1	14.3	10.7	TH
H50	C2	2	14.9	10.0	TH
H50	C2	1	17.2	10.0	TH
H50	C2	2	14.6	10.0	TH
H50	C2	1	15.8	10.0	TH
H50	C2	2	14.0	14.7	TH
H50	C2	2	13.1	14.8	TH
H50	C2	1	11.4	9.85	TH
H50	C2	2	13.3	10.4	TH
H50	C3	1	9.9	9.26	TH
H50	C3	1	11.4	9.26	TH
H50	C3	1	9.46	9.26	TH
H50	C3	2	12.6	9.26	TH
H50	C3	2	11.7	9.26	TH
H50	C4	2	10.3	9.26	TH
H50	C4	3	11.7	9.26	TH
H50	C4	2	10.9	9.26	TH
H50	C4	2	10.2	9.26	TH
H34	D1	1	12.7	12.1	TH
H34	D1	1	15.2	14.4	TH
H34	D1	2	10.9	12.2	TH
H34	D1	1	14.2	13.4	TH
H34	D1	2	10.9	12.6	TH
H34	D1	2	12.3	13.7	TH

Anexos

H34	D1	1	13.1	11.29	TH
H34	D1	2	10.9	12.9	TH
H34	D1	2	12.3	12.7	TH
H34	D2	2	17.2	17.9	TH
H34	D2	1	10.9	10.1	TH
H34	D2	2	19.2	10.0	TH
H34	D2	2	15.1	15.3	TH
H34	D2	1	10.2	10.0	TH
H34	D2	2	12.8	13.6	TH
H34	D2	2	13.3	15.7	TH
H34	D2	1	14.4	13.6	TH
H34	D2	2	12.3	12.6	TH
H55	E1	1	12.5	13.4	TH
H55	E1	1	12.4	11.8	TH
H55	E1	1	10.1	11.3	TH
H55	E1	1	11.7	10.0	TH
H55	E1	2	10.4	9.86	TH
H55	E1	1	13.6	11.3	TH
H55	E1	1	12.4	11.9	TH
H55	E1	1	11.6	12.2	TH
H55	E1	2	8.38	8.60	TH
H55	E1	1	12.7	14.1	TH
H55	E1	2	8.84	9.73	TH
H55	E1	1	12.0	12.0	TH
H55	E2	2	15.0	11.7	TH
H55	E2	1	16.3	13.9	TH
H55	E2	2	15.9	13.8	TH
H55	E2	2	15.8	13.5	TH
H55	E2	3	10.1	10.7	TH
H55	E2	2	14.6	10.8	TH
H55	E2	3	8.9	7.90	TH
H55	E2	2	13.7	8.82	TH
H55	E2	3	9.07	8.50	TH
H55	E2	3	8.21	8.14	TH
H55	E3	1	11.6	9.26	TH
H55	E3	1	13.6	9.26	TH
H55	E3	2	8.84	9.26	TH
H55	E3	1	13.2	9.26	TH
H55	E4	1	11.1	9.26	TH
H55	E4	1	11.0	9.26	TH
H55	E4	1	11.3	9.26	TH
H55	E4	2	9.96	9.26	TH
H57	F6A	1	14.5	13.8	TH
H57	F6A	1	14.1	14.3	TH
H57	F6A	2	14.5	16.4	TH

H57	F6A	1	14.8	14.1	TH
H57	F6A	1	14.2	13.5	TH
H57	F6A	2	10.7	10.0	TH
H57	F6A	1	14.6	10.0	TH
H57	F6A	1	9.40	10.0	TH
H48	G1	1	12.2	10.2	TH
H48	G1	2	9.92	8.93	TH
H48	G1	2	12.4	14.3	TH
H48	G1	1	10.8	8.90	TH
H48	G1	2	11.9	10.0	TH
H48	G1	1	10.9	11.0	TH
H48	G1	2	10.9	12.0	TH
H48	G1	2	12.1	13.7	TH
H48	G1	1	13.3	12.7	TH
H48	G1	2	10.8	12.9	TH
H59	H1	2	7.55	8.88	TH
H59	H1	2	13.3	14.3	TH
H59	H1	2	12.0	14.1	TH
H59	H1	3	9.15	10.2	TH
H59	H1	1	12.8	12.9	TH
H59	H1	2	11.9	14.7	TH
H59	H1	1	13.2	10.6	TH
H59	H1	2	6.95	10.9	TH
H59	H1	2	12.8	10.0	TH
H59	H1	3	7.90	9.64	TH
H59	H1	2	13.0	13.9	TH
H59	H1	3	7.94	10.0	TH
H63	H63-1	1	14.4	10.0	TH
H63	H63-1	1	14.5	10.0	TH
H63	H63-1	1	14.2	10.0	TH
H63	H63-1	1	14.1	10.0	TH
H63	H63-1	2	12.2	10.0	TH
H63	H63-2	1	12.1	10.0	TH
H63	H63-2	1	12.3	10.0	TH
H63	H63-2	1	12.4	10.0	TH
H63	H63-2	1	13.8	10.0	TH
H63	H63-2	1	11.1	10.0	TH
H66	H66-1	1	11.7	10.4	TH
H66	H66-1	1	11.7	9.70	TH
H66	H66-1	1	12.7	9.87	TH
H66	H66-1	1	3.22	8.90	TH
H66	H66-2	1	11.2	11.6	TH
H66	H66-2	1	10.4	9.75	TH
H66	H66-2	1	12.3	9.32	TH
H66	H66-2	1	11.8	10.1	TH

Anexos

H66	H66-2	1	10.3	9.10	TH
H75	H75-1	1	13.4	9.61	TH
H75	H75-1	1	14.3	10.2	TH
H75	H75-1	1	13.2	9.48	TH
H75	H75-1	1	14.4	9.46	TH
H75	H75-2	1	11.0	9.43	TH
H75	H75-2	1	10.2	8.56	TH
H75	H75-2	1	10.3	8.88	TH
H75	H75-2	1	10.2	9.68	TH
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ1	1	13.2	8.77	TH
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ1	1	11.8	8.50	TH
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ1	1	13.2	9.89	No desmagnetizado
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ1	1	13.0	9.59	No desmagnetizado
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ2	1	12.5	9.87	No desmagnetizado
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ2	1	10.1	9.89	No desmagnetizado
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ2	1	14.3	9.71	TH
Sustrato no quemado de la unidad X	NQ2	1	15.1	9.79	TH

***CATEGORIAS DE PROFUNDIDAD**

- 1= 0-2 cm de profundidad (más superficial)
 2= 2-4 cm de profundidad (intermedio)
 3= 4-6 cm de profundidad (más profundas)

La profundidad fue medida respecto al plano superior del bloque de mano

****MASA & VOLUMEN**

Tanto la masa como el volumen incluyen la escayola

Anexo 3. Información detallada sobre los especímenes de los conjuntos P2A y P2B de El Salt.

Conjunto P2A			
NOMBRE DEL ESPÉCIMEN	FACIES	PROFUNDIDAD APROXIMADA*	MASA (g)
P2A-1	Facies parda	0	6.61
P2A-2	Facies parda	-2.5	6.09
P2A-3	Facies parda oscura-negra	-4.5	7.53
P2A-4	Facies parda	-6.5	7.39
P2A-5	Facies oscura-negra (posible capa negra) + facies parda	-9.5	6.64
P2A-6	Facies oscura-negra (posible capa negra) + facies parda	-10	6.55
P2A-7	Facies parda con posibles inclusiones de facies oscura-negra (posible capa negra)	-12.5	6.21
P2A-8	Facies oscura	-14	6.45
P2A-9	Facies oscura	-15.5	6.43
P2A-10	Facies oscura-negra	-17	7.29
P2A-11	Facies parda	-19	7.22
P2A-12	Facies parda	-21.5	7.19
P2A-13	Facies parda con posibles inclusiones de facies oscura-negra	-23.75	6.86
P2A-14	Facies oscura	-26	3.88
P2A-15	Facies oscura + posible clasto pulverizado	-27	6.65
P2A-16	Facies parda	-29.5	6.32
P2A-17	Facies parda + facies blanquecina	-32	6.59
P2A-18	Facies parda + facies blanquecina	-35	5.99

*La profundidad 0 corresponde a la cota de la muestra más superficial de cada conjunto respectivamente.

Conjunto P2B			
NOMBRE DEL ESPECÍMEN	FACIES	PROFUNDIDAD APROXIMADA *	MASA (g)
P2B-1	Facies parda	0	8.41
P2B-2	Facies parda más oscura	-3	8.09
P2B-3	Facies parda más oscura	-6	6.38
P2B-4	Posible ceniza + sedimento que parece no quemado	-9	6.46
P2B-5	Posible capa negra	-10	5.51
P2B-6	Facies parda	-12	7.08
P2B-7	Facies parda	-15	7.22
P2B-8	Facies parda posiblemente no quemada + posible ceniza	-17	6.76
P2B-9	Posible ceniza + posible capa negra	-19	6.58
P2B-10	Posible capa negra	-20	7.27
P2B-11	Posible capa negra	-22	6.66
P2B-12	Facies parda + posible capa negra	-24	7.43
P2B-13	Facies parda (muestra suelta)	-	Muestra suelta
P2B-14	Facies parda (muestra suelta)	-	Muestra suelta
P2B-15	Facies parda	-34	8.47

*La profundidad 0 corresponde a la cota de la muestra más superficial de cada conjunto respectivamente.

Anexo 4. Información detallada sobre los especímenes de las secuencias de *fumiers*.

NOMBRE DE ESPÉCIMEN	YACIMIENTO	EPISODIO DE COMBUSTIÓN	FACIES	MASA (g)
CA1-1	La Castañera	CA1	Cenizas	3.68
CA1-2	La Castañera	CA1	Cenizas	4.28
CA1-3	La Castañera	CA1	Cenizas	2.87
CA1-4	La Castañera	CA1	Cenizas	18.5
CA1-5	La Castañera	CA1	Cenizas	3.11
CA1-6	La Castañera	CA1	Cenizas	4.37
CA1-7	La Castañera	CA1	Cenizas	3.16
CA1-8	La Castañera	CA1	Cenizas	14.8
CA1-9	La Castañera	CA1	Cenizas	2.97
CA1-10	La Castañera	CA1	Cenizas	2.98
CA1-11	La Castañera	CA1	Cenizas	13.3
CA1-12	La Castañera	CA1	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.29
CA1-13	La Castañera	CA1	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.47
CA1-14	La Castañera	CA1	Facies carbonosa (puede incorporar otros materiales)	15.8
CA1-15	La Castañera	CA1	Facies carbonosa	14.0
CA1-16	La Castañera	CA1	Facies carbonosa	15.4
CA1-17	La Castañera	CA1	Facies carbonosa	2.75
CA1-18	La Castañera	CA1	Facies carbonosa	2.31
CA1-19	La Castañera	CA1	Facies carbonosa (puede incorporar otros materiales)	14.9
CA2-1	La Castañera	CA2	Cenizas	2.58
CA2-2	La Castañera	CA2	Cenizas	3.17
CA2-3	La Castañera	CA2	Cenizas	3.71
CA2-4	La Castañera	CA2	Cenizas	3.15
CA2-5	La Castañera	CA2	Cenizas	3.17
CA2-6	La Castañera	CA2	Cenizas	3.08
CA2-7	La Castañera	CA2	Cenizas	15.0
CA2-8	La Castañera	CA2	Cenizas	4.19
CA2-9	La Castañera	CA2	Cenizas	3.30
CA2-10	La Castañera	CA2	Cenizas	1.79
CA2-11	La Castañera	CA2	Cenizas	16.4
CA2-12	La Castañera	CA2	Cenizas	3.56
CA2-13	La Castañera	CA2	Cenizas	16.3
CA3-1	La Castañera	CA3	Cenizas	2.28
CA3-2	La Castañera	CA3	Cenizas	3.10
CA3-3	La Castañera	CA3	Cenizas	3.09
CA3-4	La Castañera	CA3	Cenizas	3.04

Anexos

CA3-5	La Castañera	CA3	Cenizas	14.8
CA3-6	La Castañera	CA3	Cenizas	2.39
CA3-7	La Castañera	CA3	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.32
CA3-8	La Castañera	CA3	Cenizas	2.80
CA3-9	La Castañera	CA3	Facies carbonosa	13.7
CA3-10	La Castañera	CA3	Facies carbonosa	13.5
CA3-11	La Castañera	CA3	Facies carbonosa	16.6
CA3-12	La Castañera	CA3	Facies carbonosa	16.8
CA4-1	La Castañera	CA4	Cenizas	2.94
CA4-2	La Castañera	CA4	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.18
CA4-3	La Castañera	CA4	Cenizas	2.89
CA4-4	La Castañera	CA4	Cenizas	3.48
CA4-5	La Castañera	CA4	Cenizas	14.3
CA4-6	La Castañera	CA4	Cenizas	15.0
CA4-7	La Castañera	CA4	Cenizas	3.15
CA4-8	La Castañera	CA4	Cenizas	2.85
CA4-9	La Castañera	CA4	Cenizas	14.0
CA4-10	La Castañera	CA4	Cenizas	2.91
CA4-11	La Castañera	CA4	Cenizas	3.16
CA4-12	La Castañera	CA4	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	14.2
CA4-13	La Castañera	CA4	Cenizas	15.3
CA4-14	La Castañera	CA4	Cenizas	15.7
Ci2-1	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.26
Ci2-2	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	1.99
Ci2-3	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.08
Ci2-4	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	1.80
Ci2-5	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.96
Ci2-6	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.42
Ci2-7	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.12
Ci2-8	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.48
Ci2-9	Mirador	Ci2	Cenizas	2.35
Ci2-10	Mirador	Ci2	Cenizas	2.39
Ci2-11	Mirador	Ci2	Cenizas	2.00
Ci2-12	Mirador	Ci2	Cenizas	2.13
Ci2-13	Mirador	Ci2	Cenizas	1.87
Ci2-14	Mirador	Ci2	Cenizas	1.93
Ci2-15	Mirador	Ci2	Cenizas	2.64
Ci2-16	Mirador	Ci2	Cenizas	2.32
Ci2-17	Mirador	Ci2	Cenizas	2.54
Ci2-18	Mirador	Ci2	Cenizas	2.26
Ci2-19	Mirador	Ci2	Cenizas	2.49
Ci2-20	Mirador	Ci2	Cenizas	2.28
Ci2-21	Mirador	Ci2	Cenizas	2.60
Ci2-22	Mirador	Ci2	Cenizas	2.44
Ci2-23	Mirador	Ci2	Cenizas	2.20

Ci2-24	Mirador	Ci2	Cenizas	2.01
Ci2-25	Mirador	Ci2	Cenizas	1.99
Ci2-26	Mirador	Ci2	Cenizas	2.16
Ci2-27	Mirador	Ci2	Cenizas	2.14
Ci2-28	Mirador	Ci2	Cenizas	2.24
Ci2-29	Mirador	Ci2	Cenizas	2.22
Ci2-50	Mirador	Ci2	Cenizas	1.87
Ci2-51	Mirador	Ci2	Cenizas	1.91
Ci2-52	Mirador	Ci2	Cenizas	1.55
Ci2-53	Mirador	Ci2	Cenizas	1.82
Ci2-54	Mirador	Ci2	Facies blanca	2.14
Ci2-55	Mirador	Ci2	Cenizas	2.21
Ci2-56	Mirador	Ci2	Facies blanca	2.51
Ci2-57	Mirador	Ci2	Facies blanca	3.03
Ci2-58	Mirador	Ci2	Cenizas	2.28
Ci2-59	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.89
Ci2-60	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.43
Ci2-61	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.87
Ci2-62	Mirador	Ci2	Facies carbonosa	2.73
Ci3-1	Mirador	Ci3	Cenizas	2.60
Ci3-2	Mirador	Ci3	Cenizas	2.38
Ci3-3	Mirador	Ci3	Cenizas	2.45
Ci3-4	Mirador	Ci3	Cenizas	2.56
Ci3-5	Mirador	Ci3	Cenizas	2.28
Ci3-6	Mirador	Ci3	Cenizas	2.58
Ci3-7	Mirador	Ci3	Cenizas	2.28
Ci3-8	Mirador	Ci3	Cenizas	2.19
Ci3-9	Mirador	Ci3	Cenizas	2.66
Ci3-10	Mirador	Ci3	Cenizas	2.50
Ci3-11	Mirador	Ci3	Cenizas	2.70
Ci3-12	Mirador	Ci3	Cenizas	2.35
Ci3-13	Mirador	Ci3	Cenizas	2.52
Ci3-14	Mirador	Ci3	Cenizas	1.96
Ci3-15	Mirador	Ci3	Cenizas	2.03
Ci3-16	Mirador	Ci3	Cenizas	2.56
Ci3-17	Mirador	Ci3	Cenizas	2.50
Ci3-18	Mirador	Ci3	Cenizas	2.44
Ci3-19	Mirador	Ci3	Cenizas	2.09
Ci3-20	Mirador	Ci3	Cenizas	2.71
Ci3-21	Mirador	Ci3	Cenizas	2.66
Ci3-22	Mirador	Ci3	Cenizas	2.79
Ci3-23	Mirador	Ci3	Cenizas	2.81
Ci3-40	Mirador	Ci3	Cenizas	2.47
Ci3-41	Mirador	Ci3	Cenizas	2.50
Ci3-42	Mirador	Ci3	Cenizas	2.71

Anexos

Ci3-43	Mirador	Ci3	Cenizas	2.65
Ci3-44	Mirador	Ci3	Cenizas	2.86
Ci3-45	Mirador	Ci3	Cenizas	2.88
Ci3-46	Mirador	Ci3	Cenizas	2.80
Ci3-47	Mirador	Ci3	Cenizas	3.50
Ci3-48	Mirador	Ci3	Cenizas	2.96
Ci3-49	Mirador	Ci3	Cenizas	2.85
Ci3-50	Mirador	Ci3	Cenizas	2.87
Ci3-51	Mirador	Ci3	Cenizas	2.44
Ci3-52	Mirador	Ci3	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.09
Ci3-53	Mirador	Ci3	Cenizas	2.75
Ci3-54	Mirador	Ci3	Cenizas	2.94
Ci3-55	Mirador	Ci3	Facies carbonosa	2.67
Ci3-56	Mirador	Ci3	Facies carbonosa	3.28
Ci3-57	Mirador	Ci3	Facies carbonosa	2.77
Ci5-1	Mirador	Ci5	Cenizas	3.02
Ci5-2	Mirador	Ci5	Cenizas	2.08
Ci5-3	Mirador	Ci5	Cenizas	2.86
Ci5-4	Mirador	Ci5	Cenizas	2.36
Ci5-5	Mirador	Ci5	Cenizas	2.77
Ci5-6	Mirador	Ci5	Cenizas	2.29
Ci5-7	Mirador	Ci5	Cenizas	4.39
Ci5-8	Mirador	Ci5	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.06
Ci5-9	Mirador	Ci5	Facies carbonosa	4.56
Ci5-10	Mirador	Ci5	Facies carbonosa	3.88
Ci5-11	Mirador	Ci5	Facies carbonosa	3.88
Ci5-12	Mirador	Ci5	Cenizas	1.98
Ci5-13	Mirador	Ci5	Cenizas	2.69
Ci5-14	Mirador	Ci5	Cenizas	2.72
Ci5-15	Mirador	Ci5	Cenizas	1.74
Ci5-16	Mirador	Ci5	Facies carbonosa	5.23
Ci6-1	Mirador	Ci6	Cenizas	2.02
Ci6-2	Mirador	Ci6	Cenizas	1.95
Ci6-3	Mirador	Ci6	Cenizas	1.84
Ci6-4	Mirador	Ci6	Cenizas	2.29
Ci6-5	Mirador	Ci6	Cenizas	2.64
Ci6-6	Mirador	Ci6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.35
Ci6-7	Mirador	Ci6	Cenizas	1.76
Ci6-8	Mirador	Ci6	Cenizas	3.10
Ci6-9	Mirador	Ci6	Cenizas	2.46
Ci6-10	Mirador	Ci6	Cenizas	3.03
Ci6-11	Mirador	Ci6	Cenizas	2.48
Ci6-12	Mirador	Ci6	Cenizas	2.95
Ci6-13	Mirador	Ci6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.32
Ci6-14	Mirador	Ci6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.46

Ci6-15	Mirador	Ci6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.79
Ci6-16	Mirador	Ci6	Cenizas	3.25
Ci7-1	Mirador	Ci7	Cenizas	2.81
Ci7-2	Mirador	Ci7	Cenizas	2.82
Ci7-3	Mirador	Ci7	Cenizas	2.87
Ci7-4	Mirador	Ci7	Cenizas	3.15
Ci7-5	Mirador	Ci7	Cenizas	3.08
Ci7-6	Mirador	Ci7	Cenizas	2.67
Ci7-7	Mirador	Ci7	Cenizas	3.30
Ci7-8	Mirador	Ci7	Cenizas	2.92
Ci7-9	Mirador	Ci7	Cenizas	2.79
Ci7-10	Mirador	Ci7	Cenizas	4.34
Ci7-11	Mirador	Ci7	Cenizas	4.33
Ci7-12	Mirador	Ci7	Cenizas	3.62
SC1-1	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.40
SC1-2	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.24
SC1-3	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.68
SC1-4	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.33
SC1-5	San Cristóbal	SC1	Cenizas	3.00
SC1-6	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.24
SC1-7	San Cristóbal	SC1	Cenizas	5.24
SC1-8	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.28
SC1-9	San Cristóbal	SC1	Cenizas	1.61
SC1-10	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.94
SC1-11	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.08
SC1-12	San Cristóbal	SC1	Cenizas	4.73
SC2-1	San Cristóbal	SC2	Cenizas	5.61
SC2-2	San Cristóbal	SC2	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.42
SC2-3	San Cristóbal	SC2	Cenizas	5.47
SC2-4	San Cristóbal	SC2	Cenizas	4.83
SC2-5	San Cristóbal	SC2	Cenizas	3.75
SC2-6	San Cristóbal	SC2	Cenizas	4.11
SC2-7	San Cristóbal	SC2	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.50
SC2-8	San Cristóbal	SC2	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.00
SC2-9	San Cristóbal	SC2	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.53
SC2-10	San Cristóbal	SC2	Cenizas	4.30
SC2-11	San Cristóbal	SC2	Cenizas	5.45
SC2-12	San Cristóbal	SC2	Cenizas	3.89
SC2-13	San Cristóbal	SC2	Cenizas	5.40
SC2-14	San Cristóbal	SC2	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.74
SC2-15	San Cristóbal	SC2	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.65
SC2-16	San Cristóbal	SC2	Cenizas	4.47
SC3-1	San Cristóbal	SC3	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.20
SC3-2	San Cristóbal	SC3	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.98
SC3-3	San Cristóbal	SC3	Cenizas	4.82

Anexos

SC3-4	San Cristóbal	SC3	Cenizas	3.62
SC3-5	San Cristóbal	SC3	Cenizas	5.08
SC3-6	San Cristóbal	SC3	Cenizas	5.11
SC3-7	San Cristóbal	SC3	Cenizas	4.65
SC3-8	San Cristóbal	SC3	Cenizas	3.05
SC3-9	San Cristóbal	SC3	Cenizas	5.49
SC3-10	San Cristóbal	SC3	Cenizas	2.79
SC3-11	San Cristóbal	SC3	Cenizas	4.66
SC3-12	San Cristóbal	SC3	Cenizas	5.02
SC3-13	San Cristóbal	SC3	Cenizas	3.65
SC3-14	San Cristóbal	SC3	Cenizas	5.17
SC4-1	San Cristóbal	SC4	Cenizas	3.46
SC4-2	San Cristóbal	SC4	Cenizas	4.75
SC4-3	San Cristóbal	SC4	Cenizas	4.66
SC4-4	San Cristóbal	SC4	Cenizas	4.62
SC4-5	San Cristóbal	SC4	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.78
SC4-6	San Cristóbal	SC4	Cenizas	5.15
SC4-7	San Cristóbal	SC4	Cenizas	4.37
SC4-8	San Cristóbal	SC4	Cenizas	3.30
SC4-9	San Cristóbal	SC4	Cenizas	4.02
SC4-10	San Cristóbal	SC4	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.70
SC4-11	San Cristóbal	SC4	Cenizas	5.13
SC4-12	San Cristóbal	SC4	Cenizas	4.00
SC5-1	San Cristóbal	SC5	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.00
SC5-2	San Cristóbal	SC5	Cenizas	4.55
SC5-3	San Cristóbal	SC5	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.76
SC5-4	San Cristóbal	SC5	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.63
SC5-5	San Cristóbal	SC5	Cenizas	5.42
SC5-6	San Cristóbal	SC5	Cenizas	4.83
SC5-7	San Cristóbal	SC5	Cenizas	4.49
SC5-8	San Cristóbal	SC5	Cenizas	4.81
SC5-9	San Cristóbal	SC5	Cenizas	4.75
SC5-10	San Cristóbal	SC5	Cenizas	3.70
SC5-11	San Cristóbal	SC5	Cenizas	2.89
SC5-12	San Cristóbal	SC5	Cenizas	4.24
SC5-13	San Cristóbal	SC5	Facies carbonosa (puede incorporar otros materiales)	4.15
SC5-14	San Cristóbal	SC5	Facies carbonosa (puede incorporar otros materiales)	4.62
SC6-1	San Cristóbal	SC6	Cenizas	3.78
SC6-2	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.80
SC6-3	San Cristóbal	SC6	Cenizas	3.83
SC6-4	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.75
SC6-5	San Cristóbal	SC6	Cenizas	5.07
SC6-6	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.83
SC6-7	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.37
SC6-8	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.60

SC6-9	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.20
SC6-10	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.34
SC6-11	San Cristóbal	SC6	Cenizas	4.99
SC6-12	San Cristóbal	SC6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.19
SC6-13	San Cristóbal	SC6	Cenizas	3.85
SC6-14	San Cristóbal	SC6	Cenizas	5.21
SC7-1	San Cristóbal	SC7	Cenizas	2.59
SC7-2	San Cristóbal	SC7	Facies carbonosa	4.37
SC7-3	San Cristóbal	SC7	Cenizas	3.97
SC7-4	San Cristóbal	SC7	Cenizas	5.40
SC7-5	San Cristóbal	SC7	Cenizas	3.38
SC7-6	San Cristóbal	SC7	Cenizas	5.12
SC7-7	San Cristóbal	SC7	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.52
SC7-8	San Cristóbal	SC7	Cenizas	4.69
SC7-9	San Cristóbal	SC7	Cenizas	3.16
SC7-10	San Cristóbal	SC7	Cenizas	2.50
SC7-11	San Cristóbal	SC7	Cenizas	3.85
SC7-12	San Cristóbal	SC7	Cenizas	4.72
SC7-13	San Cristóbal	SC7	Cenizas	4.66
SC7-14	San Cristóbal	SC7	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.68
SC8-1	San Cristóbal	SC8	Cenizas	3.61
SC8-2	San Cristóbal	SC8	Cenizas	3.51
SC8-3	San Cristóbal	SC8	Facies carbonosa (puede incorporar otros materiales)	4.71
SC8-4	San Cristóbal	SC8	Cenizas	3.09
SC8-5	San Cristóbal	SC8	Cenizas	4.42
SC8-6	San Cristóbal	SC8	Cenizas	3.93
SC8-7	San Cristóbal	SC8	Facies carbonosa	4.01
SC8-8	San Cristóbal	SC8	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.66
SC8-9	San Cristóbal	SC8	Cenizas	4.18
SC8-10	San Cristóbal	SC8	Facies carbonosa	3.85
SC8-11	San Cristóbal	SC8	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.45
SC8-12	San Cristóbal	SC8	Cenizas	3.87
SC8-13	San Cristóbal	SC8	Cenizas	3.93
SC8-14	San Cristóbal	SC8	Cenizas	4.34
SC9-1	San Cristóbal	SC9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	5.34
SC9-2	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.70
SC9-3	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.84
SC9-4	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.79
SC9-5	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.93
SC9-6	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.08
SC9-7	San Cristóbal	SC9	Cenizas	5.24
SC9-8	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.47
SC9-9	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.48
SC9-10	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.85
SC9-11	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.09

Anexos

SC9-12	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.67
SC9-13	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.86
SC9-14	San Cristóbal	SC9	Cenizas	4.19
SC10-1	San Cristóbal	SC10	Cenizas	4.06
SC10-2	San Cristóbal	SC10	Cenizas	4.33
SC10-3	San Cristóbal	SC10	Cenizas	4.34
SC10-4	San Cristóbal	SC10	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.00
SC10-5	San Cristóbal	SC10	Cenizas	4.22
SC10-6	San Cristóbal	SC10	Cenizas	5.31
SC10-7	San Cristóbal	SC10	Cenizas	4.14
SC10-8	San Cristóbal	SC10	Cenizas	5.75
SC10-9	San Cristóbal	SC10	Facies carbonosa	4.72
SC10-10	San Cristóbal	SC10	Facies carbonosa	3.39
SC10-11	San Cristóbal	SC10	Cenizas	5.02
SC10-12	San Cristóbal	SC10	Cenizas	4.43
SC10-13	San Cristóbal	SC10	Cenizas	5.20
SC10-14	San Cristóbal	SC10	Cenizas	5.03
SC11-1	San Cristóbal	SC11	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.98
SC11-2	San Cristóbal	SC11	Cenizas	3.58
SC11-3	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.40
SC11-4	San Cristóbal	SC11	Cenizas	3.40
SC11-5	San Cristóbal	SC11	Cenizas	3.55
SC11-6	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.52
SC11-7	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.10
SC11-8	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.31
SC11-9	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.44
SC11-10	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.83
SC11-11	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.48
SC11-12	San Cristóbal	SC11	Cenizas	4.91
CE6-1	Estillín	CE6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.95
CE6-2	Estillín	CE6	Cenizas	3.21
CE6-3	Estillín	CE6	Cenizas	2.87
CE6-4	Estillín	CE6	Cenizas	3.38
CE6-5	Estillín	CE6	Cenizas	3.62
CE6-6	Estillín	CE6	Cenizas	3.28
CE6-7	Estillín	CE6	Cenizas	3.54
CE6-8	Estillín	CE6	Cenizas	3.75
CE6-9	Estillín	CE6	Cenizas	3.68
CE6-10	Estillín	CE6	Cenizas	3.61
CE6-11	Estillín	CE6	Cenizas	4.29
CE6-12	Estillín	CE6	Cenizas	3.99
CE6-13	Estillín	CE6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.55
CE6-14	Estillín	CE6	Cenizas	3.50
CE6-15	Estillín	CE6	Cenizas	3.23
CE6-16	Estillín	CE6	Cenizas	3.03

CE6-17	Estillín	CE6	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.71
CE7-1	Estillín	CE7	Cenizas	3.35
CE7-2	Estillín	CE7	Cenizas	3.32
CE7-3	Estillín	CE7	Cenizas	2.77
CE7-4	Estillín	CE7	Cenizas	2.89
CE7-5	Estillín	CE7	Cenizas	3.39
CE7-6	Estillín	CE7	Cenizas	2.96
CE7-7	Estillín	CE7	Cenizas	3.98
CE7-8	Estillín	CE7	Cenizas	2.95
CE7-9	Estillín	CE7	Cenizas	3.21
CE7-10	Estillín	CE7	Cenizas	3.17
CE7-11	Estillín	CE7	Cenizas	3.42
CE7-12	Estillín	CE7	Cenizas	3.53
CE7-13	Estillín	CE7	Cenizas	2.94
CE7-14	Estillín	CE7	Cenizas	3.80
CE7-15	Estillín	CE7	Cenizas	3.75
CE7-16	Estillín	CE7	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.74
CE7-17	Estillín	CE7	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.61
CE7-18	Estillín	CE7	Cenizas	3.77
CE7-19	Estillín	CE7	Cenizas	3.30
CE7-20	Estillín	CE7	Cenizas	3.70
CE8-1	Estillín	CE8	Cenizas	3.09
CE8-2	Estillín	CE8	Cenizas	3.34
CE8-3	Estillín	CE8	Cenizas	3.36
CE8-4	Estillín	CE8	Cenizas	2.94
CE8-5	Estillín	CE8	Cenizas	3.26
CE8-6	Estillín	CE8	Cenizas	2.97
CE8-7	Estillín	CE8	Cenizas	3.16
CE8-8	Estillín	CE8	Cenizas	2.81
CE8-9	Estillín	CE8	Cenizas	3.42
CE8-10	Estillín	CE8	Cenizas	3.43
CE8-11	Estillín	CE8	Cenizas	3.52
CE8-12	Estillín	CE8	Cenizas	4.39
CE8-13	Estillín	CE8	Cenizas	3.73
CE8-14	Estillín	CE8	Cenizas	3.11
CE8-15	Estillín	CE8	Cenizas	2.36
CE8-16	Estillín	CE8	Cenizas	4.45
CE8-17	Estillín	CE8	Cenizas	4.31
CE9-1	Estillín	CE9	Cenizas	2.46
CE9-2	Estillín	CE9	Cenizas	2.88
CE9-3	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.91
CE9-4	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.74
CE9-5	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.23
CE9-6	Estillín	CE9	Rubefacción	4.10
CE9-7	Estillín	CE9	Rubefacción (puede incluir otras facies)	3.48

Anexos

CE9-8	Estillín	CE9	Rubefacción (pueden incluir otras facies)	4.28
CE9-9	Estillín	CE9	Rubefacción	3.94
CE9-10	Estillín	CE9	Rubefacción	4.03
CE9-11	Estillín	CE9	Rubefacción	4.07
CE9-12	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.73
CE9-13	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.81
CE9-14	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.18
CE9-15	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.23
CE9-16	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.16
CE9-17	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.17
CE9-18	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.06
CE9-19	Estillín	CE9	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.25
CE10-1	Estillín	CE10	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.07
CE10-2	Estillín	CE10	Cenizas	4.33
CE10-3	Estillín	CE10	Cenizas	2.85
CE10-4	Estillín	CE10	Cenizas	2.94
CE10-5	Estillín	CE10	Cenizas	3.98
CE10-6	Estillín	CE10	Cenizas	3.71
CE10-7	Estillín	CE10	Cenizas	3.96
CE10-8	Estillín	CE10	Cenizas	3.58
CE10-9	Estillín	CE10	Cenizas	2.49
CE10-10	Estillín	CE10	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.55
CE10-11	Estillín	CE10	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	2.63
CE10-12	Estillín	CE10	Facies carbonosa	3.74
CE10-13	Estillín	CE10	Cenizas	2.74
CE10-14	Estillín	CE10	Cenizas	3.12
CE10-15	Estillín	CE10	Cenizas	3.82
CE10-16	Estillín	CE10	Cenizas	3.36
CE10-17	Estillín	CE10	Cenizas	3.56
CE10-18	Estillín	CE10	Cenizas	3.77
CE10-19	Estillín	CE10	Cenizas	3.47
CE10-20	Estillín	CE10	Facies carbonosa	4.17
CE10-21	Estillín	CE10	Facies carbonosa	3.61
CE10-22	Estillín	CE10	Cenizas	3.73
CE10-23	Estillín	CE10	Cenizas	4.12
CE10-24	Estillín	CE10	Cenizas	3.67
CE10-25	Estillín	CE10	Cenizas	4.15
CE10-26	Estillín	CE10	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.28
CE10-27	Estillín	CE10	Cenizas	3.54
CE10-28	Estillín	CE10	Cenizas	3.70
CE11-1	Estillín	CE11	Cenizas	3.88
CE11-2	Estillín	CE11	Cenizas	3.54
CE11-3	Estillín	CE11	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.87
CE11-4	Estillín	CE11	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.69
CE11-5	Estillín	CE11	Cenizas	3.83

CE11-6	Estillín	CE11	Cenizas	3.63
CE11-7	Estillín	CE11	Cenizas	4.08
CE11-8	Estillín	CE11	Cenizas	3.97
CE11-9	Estillín	CE11	Cenizas	4.05
CE11-10	Estillín	CE11	Cenizas	3.91
CE11-11	Estillín	CE11	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.22
CE11-12	Estillín	CE11	Cenizas	3.29
CE11-13	Estillín	CE11	Cenizas	2.97
CE11-14	Estillín	CE11	Cenizas	3.81
CE11-15	Estillín	CE11	Cenizas	3.36
CE11-16	Estillín	CE11	Cenizas	3.29
CE11-17	Estillín	CE11	Cenizas	3.39
CE11-18	Estillín	CE11	Cenizas	2.68
CE11-19	Estillín	CE11	Cenizas	3.17
CE11-20	Estillín	CE11	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	4.22
CE11-21	Estillín	CE11	Cenizas (pueden incorporar otros materiales)	3.51
CE11-22	Estillín	CE11	Cenizas	4.01

Anexo 5. Publicación de resultados de los fuegos experimentales presentados en el capítulo 5.

Herrejón Lagunilla, Á., Carrancho, Á., Villalaín, J.J., Mallol, C., Hernández, C.M., 2019. An experimental approach to the preservation potential of magnetic signatures in anthropogenic fires. *PLoS ONE* 14 (8): e0221592. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592>



RESEARCH ARTICLE

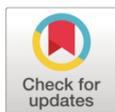
An experimental approach to the preservation potential of magnetic signatures in anthropogenic fires

Ángela Herrejón Lagunilla^{1*}, Ángel Carrancho², Juan José Villalaín¹, Carolina Mallol^{3,4*}, Cristo Manuel Hernández³

1 Departamento de Física, Universidad de Burgos, Burgos, Spain, **2** Área de Prehistoria, Departamento de Historia, Geografía y Comunicación, Universidad de Burgos, Burgos, Spain, **3** Departamento de Geografía e Historia, Área de Prehistoria (Facultad de Humanidades), Universidad de La Laguna, Campus de Guajara, La Laguna, Tenerife, Spain, **4** Archaeological Micromorphology and Biomarkers (AMBI Lab), Instituto Universitario de Bio-Orgánica Antonio González, La Laguna, Tenerife, Spain

* Current address: Archaeological Micromorphology and Biomarkers (AMBI Lab), Instituto Universitario de Bio-Orgánica Antonio González, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, La Laguna, Tenerife, Spain

* aherrejon@ubu.es, angelaherrejonlagunilla@gmail.com



OPEN ACCESS

Citation: Herrejón Lagunilla Á, Carrancho Á, Villalaín JJ, Mallol C, Hernández CM (2019) An experimental approach to the preservation potential of magnetic signatures in anthropogenic fires. *PLoS ONE* 14(8): e0221592. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592>

Editor: Andrea Zerboni, Università degli Studi di Milano, ITALY

Received: May 2, 2019

Accepted: August 9, 2019

Published: August 29, 2019

Copyright: © 2019 Herrejón Lagunilla et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are available in the public repository of Burgos University at <http://hdl.handle.net/10259/5135>.

Funding: This work was supported by: -Á.H.L.: predoctoral contract of Junta de Castilla y León with also European Social Funds (ESF; Operational Programme for Castilla y León); -A.C., J.J.V.: Junta de Castilla y León (Project BU235P18) with also European Fund for Economic and Regional Development (EFRD) funding; -Á.H.L., J.J.V.: Spanish Ministry of Economy and Competitiveness

Abstract

Archaeomagnetic and rock-magnetic methods are of great value in the identification of archaeological fire, especially in Palaeolithic sites where evidence is usually scarce, ambiguous or poorly preserved. Although taphonomic processes can significantly modify Palaeolithic combustion structures, the extent to which such processes affect the magnetic record remains unknown. Here we report the results of an archaeomagnetic study involving five, two-to-five-year-old experimental combustion structures in open-air and cave settings. Some of these combustion structures involved post-combustion human actions such as trampling and relighting. Our results show pseudo-single domain (PSD) magnetite as the main magnetic carrier. Wood ash layers of combustion structures are the most magnetic facies followed by thermally altered sediments constituting the combustion substrates. A decreasing magnetic concentration pattern in depth was observed as a function of temperature. Positive correlation was found between good-quality directional data and macroscopically well-preserved combustion structures. Partial thermoremanent magnetization (pTRM) was the main magnetization mechanism identified in the combustion substrate facies. These data coupled with partial thermomagnetic curve experiments show the potential of these methods to estimate maximum temperatures of the last combustion event. Relightings show very good directional results, but they cannot be identified because the time between them is not enough to statistically distinguish directional variations of the local Earth's magnetic field. The substrate sediment of an intensively trampled combustion structure yielded reliable archaeomagnetic directions. The results are discussed in terms of magnetization preservation potential and the effects of taphonomic processes on the archaeomagnetic record.

(MINECO) with also EFRD funding (Project CGL2016-77560); -C.M., C.M.H., Á.H.L., A.C.: The Leakey Foundation (Neandertal Fire Technology Project) -C.M.: ERC Consolidator Grant project PALEOCHAR – 648871 <https://erc.europa.eu/funding/consolidator-grants>; -C.M., C.M.H., Á.H.L.: MINECO and EFRD funding (HAR2015-68321-P Project). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

1. Introduction

Palaeolithic combustion features may generally comprise charcoal concentrations, calcitic wood ash or thermally altered sediment. Sometimes these constituents are found in stratigraphic association in what is referred to as a combustion structure [1]. In the last years, the characterization of Palaeolithic fire has been at the core of many multidisciplinary geoarchaeological studies (e.g.: [1–25]). Fire played a key role in human evolution (e.g.: [4,23,26–29]) and in order to approach the first stages of its use and control it is important to understand Palaeolithic combustion feature formation processes. In addition, archaeological fire and its products, including thermally altered sediment, can provide important clues about Palaeolithic behaviour and information about the integrity of the archaeological record (e.g.: [25,30–33]). This information is of great interest for the dissection of Palaeolithic palimpsests associated with combustion structures. Palimpsests are usually sedimentary deposits, variably rich in archaeological remains, representing an unknown number of human occupations episodes. Although these are normally excavated as single assemblages, they may correspond to successive anthropogenic accumulations [34]. It is possible to infer time and isolate human occupation episodes through a multidisciplinary approach to archaeological combustion structures (e.g.: [32,35,36]). Nevertheless, ethnoarchaeological, experimental and archaeological data that can be used as reference is still scarce [1].

Experimental approaches to the study of prehistoric fire have been fruitful (e.g.: [2,11,24,32,37–53]). They have provided valuable information on combustion structure formation aspects with particular emphasis on observable features such as temperature ranges, size and morphology, heat penetration and internal stratigraphy in relation to variables such as fuel type, combustion duration or different post-combustion actions (trampling, relighting... etc.). Despite these advances, certain issues remain unresolved. These include: determination of temperatures attained in simple hearths (e.g.: [51,53,54]), identification of relighting events [44] and the effect of taphonomic processes on the archaeological fire record [30,42,43,55].

Burning temperatures have been approached experimentally through different proxies including: chromatic variations and breakage of lithic artifacts (e.g.: [56]), colour and structural changes in bone (e.g.: [57–61]), carbon stable isotope composition [62] and magnetic parameters (e.g.: [54,63–65]), as well as sedimentary signatures detected through Fourier transformed infrared spectroscopy (e.g.: [66]) or thermoluminescence (e.g.: [54,67,68]). However, these proxies are only applicable over a limited temperature range and their level of precision is variable. Also, thermal impact on different zones of a combustion structure (center vs. periphery or surface vs. subsurface) and on different constituents (ash, substrate, bones, etc.) varies considerably.

Regarding identification of relighting events in Palaeolithic combustion structures, repeated use of combustion structures has been suggested for some archaeological sites (e.g. [10,69]) and experimental studies have replicated reheated structures [44,50,70]. However, identification of different burning events in a single combustion structure has not been accomplished. One exception is a case in which relighting of an experimental combustion structure was identified through soil micromorphology. However, this was only possible thanks to the presence of a visible deposit (a bed of leaves) between the relightings [44].

Finally, another issue that remains unresolved is the effect of taphonomic processes on the archaeological fire record. The majority of experimental combustion structures are usually sampled and analyzed shortly after the burning event, not allowing enough time for taphonomic processes to take action on intact or anthropogenically modified (e.g., trampled [42,43],) fires. Certainly, it is not possible to replicate an archaeological time scale, but perhaps

experiments lasting several years could address this problem, given that atmospheric and biogenic agents act on fresh deposits within months.

Archaeomagnetism and rock magnetism may help address the unresolved issues mentioned above. Experimental studies based on archaeomagnetism and rock magnetism have been carried out to test the applicability of these methods to identify burnt materials (e.g.: [71]), to characterize the magnetic properties of different facies of within combustion structures (e.g.: [72–74]), to infer the magnetization mechanisms (e.g.: [75–77]) and to assess the reliability of the Earth's magnetic field record in burnt materials (e.g.: [75,78]). These works support magnetism-based methods as reliably applicable tools to solve questions of archaeological interest. Previous applications of the methods include paleotemperature determinations (e.g.: [54,55,63–65,79]), as well as identification of burning episodes (e.g. [16,71,80]), detection mechanical post-depositional processes affecting combustion structures (e.g.: [30,55,79]) and distinction of occupation events in Palaeolithic hearth-related assemblages [35]. However, the issues of relighting event identification and the effect of taphonomic processes on the fire record have not been explored so far.

Assuming that the direction of the Earth's magnetic field changes with time, experimental relighting events carried out a few years apart can be evaluated through archaeomagnetic analysis. This has never been attempted. Nor has there been any study to understand how the magnetic signal (directional record and magnetic properties) is preserved through time in combustion structures affected by different taphonomic processes.

To the best of our knowledge, there are no actualistic experimental studies focusing on the effects of taphonomic processes on the magnetic directional record of combustion structures and their variation in magnetic properties. Assessing the effects of the taphonomic processes in different facies and substrates would allow us to evaluate which are the most suitable materials for the application of archaeomagnetic analyses on similar contexts (i.e. Palaeolithic sites). This is relevant because archaeomagnetic studies on combustion structures can shed light on problems involved in Palaeolithic palimpsest dissection [35]. Moreover, the detection of possible specific patterns in the magnetic behaviour related to different taphonomic processes might help us identify such processes in the archaeological record.

Here we report a systematic archaeomagnetic study of five experimental combustion structures that were left untouched for two to five years before their sampling and analysis. These combustion structures were made as part of the Neanderthal Fire Technology Project (Leakey Foundation) for the investigation of different aspects of Paleolithic fire and its material manifestations. Our main goal here is to assess the reliability of the Earth's magnetic field (EMF) direction as recorded by natural remanent magnetization (NRM) under different taphonomic conditions and further implications in terms of archaeological fire identification, with emphasis on thermal characterization of combustion structures and relighting event assessment.

2. Materials and methods

Five experimental combustion structures were selected from a larger set of the Neanderthal Fire Technology Project. This project consisted of experimental replication of archaeological combustion structures documented at El Salt Middle Palaeolithic site and the experiments were carried out in the immediate surroundings of this archaeological site (Alcoy, SE Spain; Lat.: 34° 41' 13" N, Long.: 0° 30' 32" W; Fig 1). The main variables subject to control were: substrate type, fuel type and quantity, temperatures reached, combustion duration, extinction actions, pre- and post-combustion conditions and time between combustion and sampling (Table 1). Some combustion structures were excavated just after the burning event, while others were abandoned in situ during variable periods of time and underwent diverse taphonomic

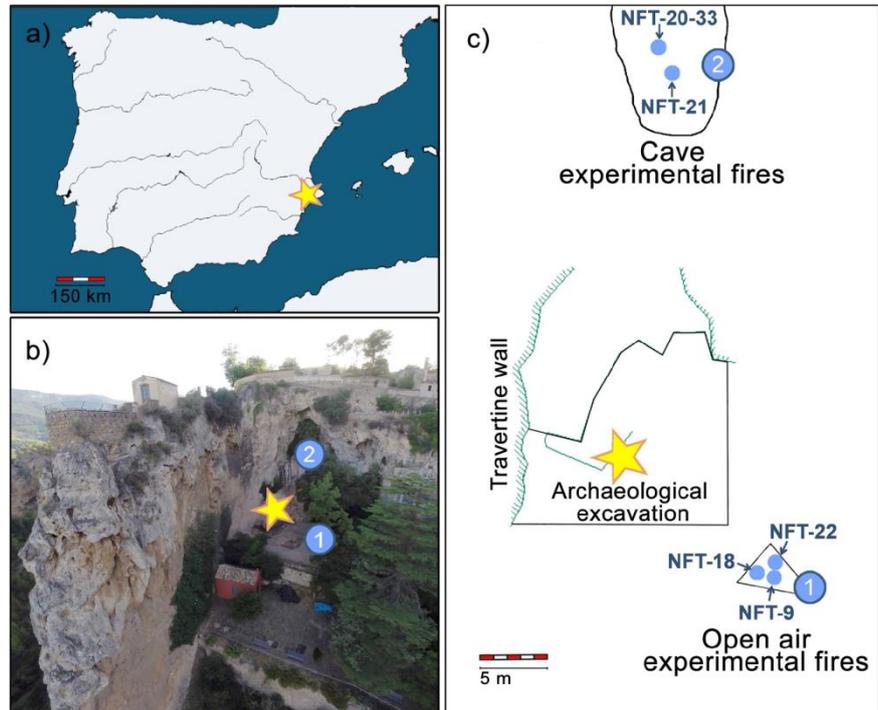


Fig 1. Context and location of the combustion structures. (A) Map of Iberia with the location of El Salt site. (B) Aerial photograph from El Salt. (C) Plan view showing the location of the experimental hearths studied and the archaeological excavation. The yellow star represents the archaeological excavation area. (1) Location of open-air combustion structures NFT-9, NFT-18 and NFT-22. (2) Cave entrance setting in which NFT-20-33 and NFT-21 were made.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g001>

processes (Table 1). The selected combustion structures are: NFT-9, NFT-18, NFT-20/33, NFT-21 and NFT-22 (S1 Fig). Three of them are open-air combustion structures whereas the two others were carried out inside a cave.

No specific permissions were required for the experimental work presented here except for the making of fires, which was authorized by the Cultural Heritage Department of the Valencia Government. Experimental actions were specifically approved as part of obtaining the field permit. The flint used is not archaeological and was legally collected from local outcrops. The chicken, pig and rabbit bone were not archaeological and were purchased in local supermarkets. No endangered or protected species were involved in this study.

2.1 Combustion and post-combustion variables

Combustion and post-combustion variables are compiled in Table 1. Specific details are included in S1 Text.

2.2 Taphonomic processes

Different taphonomic processes were observed throughout the time (between two and five years) that the fires were left on the surface. Around 2 months after the firing, open-air combustion structures were covered by leaves from the surrounding trees (*Celtis sp.*). In the

Table 1. Combustion structure information.

Combustion structure	Location	Substrate	Fuel	Total amount of fuel (kg) [†]	Duration of the fire (hours)	Maximum temperatures reached ^{**}	Pre-combustion actions ^{***}	Actions during combustion ^{****}	Extinction	Post-combustion conditions ^{*****}	Year of burning	Year of sampling
NFT-9	Open air	Dry unvegetated sediment, with loose silt on the surface. Angular limestone fragments (1-3cm) are common. Isolated grass stalks.	<i>Pinus nigra</i> and ivy	16.3	3-4	No available	Addition of 3 owl pellets (<i>Bubo bubo</i>)	Refuel and addition of 0.5 kg of cooked chicken bones, 2 eggs and 2 chopped rabbits (later for consumption)	Natural	Addition of a carbonized horse epiphysis from combustion event 4 of NFT-10-6 and trampling during 16 days.	2010	2015
NFT-18	Open air	Dry sediment, with loose silt on the surface. Angular limestone fragments (1-3cm) are common. Isolated grass stalks.	<i>Pinus nigra</i>	23.5	2-3	622°C 663°C	Addition of bone fragments (unrecorded type and amount), travertine and limestone fragments, flint flakes (Mariola-Benimartxó flint)	Refuel and addition of cow bone	Natural	-	2010	2015
NFT-20	Cave	Cemented carbonate-rich silt at cave entrance (carbonate crust). Underlying, there is a detrital layer (with differential thickness along the substrate) (S2 Fig).	<i>Pinus nigra</i>	12	3-4	733°C 770°C	Addition of 11 flint flakes (Serreta-Frere Biar flint)	Addition of dry horse excrements	Natural	-	2010	2015
NFT-33 (relighting over NFT-20)	Cave	Cemented carbonate-rich silt at cave entrance (carbonate crust). Underlying, there is a detrital layer (with differential thickness along the substrate) (S2 Fig).	<i>Pinus sylvestris</i>	-	-	101.6°C 592.4°C 864.4°C	-	-	Natural	-	2013	2015
NFT-21	Cave	Cemented carbonate-rich silt at cave entrance, including some oncolites (S3 Fig)	<i>Pinus nigra</i>	7.2	2-3	53°C 93°C 260°C 508°C 706°C 763°C	Addition of limestone and conglomerate cobbles.	Refuel and addition of 2 kg of leftover charred large branches, 1 fragmented horse tibia (distal and proximal ends) and 9 horse ribs	With sediment	-	2010	2015

(Continued)

Table 1. (Continued)

Combustion structure	Location	Substrate	Fuel	Total amount of fuel (kg)*	Duration of the fire (hours)	Maximum temperatures reached**	Pre-combustion actions***	Actions during combustion****	Extinction	Post-combustion conditions*****	Year of burning	Year of sampling
NFT-22	Open air	Dry sediment, with loose silt on the surface. Angular limestone fragments (1-3cm) are common. Isolated grass stalks.	<i>Pinus nigra</i>	19.5	5–6	218°C 420°C 617°C 791°C 868°C	-	Refuel	Natural	-	2010	2015

(*) It includes the total fuel mass: initial amount + refueling during combustion.

(**) Each value corresponds to a different thermocouple; more information in S1 Text.

(***) Although not considered as “pre-combustion action”, an initial amount of fuel was present in all the combustion structures.

(****) Any action performed while the fire was lit.

(*****) All intentional actions performed on the fire after smouldering.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.t001>

following Spring, grass and dry leaves covered the entire area and burrowing insects were present. The first step of the excavation process in 2015 involved careful removal of this grass cover (S4 Fig). Underneath, we found a very loose sedimentary layer composed of grayish-brown aggregates, decayed *Celtis* leaves, decayed *Celtis* seeds and their calcitic seedcoats and charcoal fragments. The cave entrance combustion structures did not undergo any of the mentioned processes. Macroscopically, they seemed intact, with a few small carnivore excrements and footprints on the ash surface and spider webs around the residual logs.

No further disturbance was observed. No new sedimentary surface deposits were noted and the larger combustion residues (calcined bone and limestone cobbles) were found in their primary depositional position.

2.3. Combustion structure sedimentary facies

The experimental combustion structures were stratigraphically described in the field upon excavation, which took place two (NFT-33) to five (NFT-9, -18, -21 and -22) years after they were made.

From top to bottom, the following facies were documented in the combustion structures:

- A white and/or grey ash layer (WL). Identification and isolation of ashes during excavation was not always straightforward. Ash from the cave entrance combustion structures was very well preserved, while ash in the open-air combustion structures appeared physically reworked as compact aggregates or mixed with sediment from the underlying layer, possibly as a result of bioturbation.
- A 2–4 cm thick black layer (BL) in the open-air structures. This constitutes the soil substrate on which the fire was performed. Open air combustion structures were developed over organic-rich sediment and BL black colour is possibly due to charring of the organic matter in the soil [32]. The BL of one open-air structure with strong bioturbation by plants was diffuse and difficult to delimit macroscopically: NFT-22. Occasionally, reddened patches appeared (rubification) within the BLs. Just below the BLs, progressive colour grading from dark to pale brown was reported.

The two cave structures were carried out over a mainly inorganic substrate (cemented carbonate-rich silt, forming a carbonate crust of *ca.* 2 mm at the top). In the cave NFT-21 combustion structure, oncolites were detected just below the carbonate crust (S3 Fig). In the NFT-20-33 cave structure, a centimeter-thick detrital layer was observed underlying the carbonate crust (S2 Fig). As expected for inorganic substrates [32], the cave entrance structures yielded very thin (1–2 mm) BLs or none. Instead, the surface of the substrate showed darkened or reddened patches.

2.4. Working hypotheses and expected results

Heating may have triggered two main magnetic changes in the sedimentary substrate of our combustion structures. Firstly, it is well known that even mild heating induces chemical changes in the magnetic mineralogy (phase transformations or grain volume changes). Depending on the burning conditions, generation of new ferrimagnetic (*s.s.*) minerals such as magnetite and/or maghemite, is common in a wide range of burnt materials, including soils and sediments. This is usually identified through a distinguishable magnetic enhancement in the magnetic concentration-dependent parameters as, for instance, magnetic susceptibility or isothermal remanent magnetization (IRM), in comparison with the unburnt surrounding context (e.g.: [76]). This contrast in the magnetic signal produced by mineralogical transformations, gives magnetic methods a high capacity to identify and characterize burning features.

Chemical changes might be interpreted in terms of maximum temperatures reached by the burnt materials. The hypothesis is that if chemical changes (e.g.: neof ormation of magnetite) are observed when heating a sample in the lab in thermal experiments the temperature reached by the sample in the field was likely lower than the maximum temperature applied in the lab [55, 63]. It is because the sample is not thermochemically stabilized; otherwise, it should not exhibit mineralogical transformations. This obviously does not always work [81] but we wanted to test this application of the method on these experimental fires and see its viability.

Secondly, physical changes are also expected due to heating. These manifest as new paleomagnetic components. Depending on the heating temperature and the mineralogical changes involved, the direction of the Earth's magnetic field (EMF) can be recorded through different types of magnetization mechanisms. In burnt archaeological materials like these, the most common is known as thermal remanent magnetization or TRM. When a material is heated over the *Curie temperature* (henceforth T_C) of its main magnetic carrier (T_C is specific of every ferromagnetic mineral; e.g.: magnetite $T_C = 585^\circ\text{C}$ or haematite $T_C = 675^\circ\text{C}$), it loses its ferromagnetic properties and becomes paramagnetic. That is, it does not retain magnetic memory in the absence of magnetic field and basically deletes any previous magnetization. However, it is during the cooling process in the presence of the EMF that when crossing the *blocking temperature* or T_B (mineral and grain volume dependent and always lower than T_C), the material records a remanent magnetization parallel and generally proportional to the EMF. If the material is not reheated later and physically remains *in situ*, the archaeomagnetic direction obtained in the laboratory represents a snapshot and stable record of the EMF at the time of its last heating and subsequent cooling.

This behaviour results in univectorial orthogonal NRM demagnetization diagrams of high intensity and whose specimens exhibit directions quite reproducible among them. If the material is not preserved *in situ*, the orthogonal NRM demagnetization diagrams will be characterized by being multicomponent (various vectors), with anomalous directions and weaker intensities of magnetization. Depending on the mineralogical changes involved and when they occur, burnt archaeological materials can record other magnetization mechanisms such as, for example, the thermo-chemical remanent magnetization (e.g.: 76). Likewise, these physical and

chemical transformations can be identified through the magnetic properties (composition, concentration and granulometry of ferromagnetic minerals). That is why so important to combine the directional results with the magnetic properties analyzed case by case.

Taphonomic processes may affect the preservation of the magnetic record of archaeological combustion structures as we want to evaluate. In our studied structures, bioturbation is the most common taphonomic process observed. Agents like plants (with their roots going into the ground) and/or animals may cause mechanical processes affecting the burnt facies. Plant growth and soil aggregation as documented in our experimental fires (S1 Text and S4 Fig) may have entailed mechanical reworking, especially within the ashes. A significant scatter in the directions is expected in these cases [30, 55]. Trampling may also affect the directional record. Specifically, flattening is expected as an effect of the pressure exerted on the materials. It can be easily detected in the archaeomagnetic directional record as an inclination shallowing (lower inclinations than the expected).

2.5. Sampling

In the field, fourteen oriented hand-blocks (samples) were collected from all combustion structures. Ashes were not sampled given their high volatility and propensity to be remobilized. Archaeomagnetic directional analyses require collection of magnetically oriented samples from *in situ* (s.s.) burnt materials. As we could not guarantee that these ashes fulfilled this requirement they were excluded. Nonetheless, bulk (unoriented) ash samples from each combustion structure were collected to study their magnetic properties.

After carefully removing the ash facies from each combustion structure, samples were taken by means of oriented hand blocks focusing on the top 2 cm of the thermally altered substrate (BL of open-air structures and darkened carbonate crust of cave entrance structures). Bulk (unoriented) sediment samples of each facies were also collected.

The hand-blocks were sampled by dripping a creamy-textured mix of plaster of Paris and water on them, gently pressing a piece of methacrylate on the plaster while wet, levelling it using a bubble level and allowing it to set. Upon drying, orientation was recorded using a magnetic compass. No more than two hand-blocks per combustion structure were collected, allowing for other geoarchaeological sampling.

When possible, oriented samples were preferably collected from the central area of the combustion structures (S5 Fig). Part of the uppermost area of one block from cave combustion structure NFT-21 (the most strongly burnt area) broke and was lost during sampling.

Apart from the burnt sediment samples, four unburnt control samples (oriented hand blocks) were collected. These comprised two carbonate crust samples with underlying detrital cave sediment and two samples of soil-sediment from the open-air area.

Blocks from NFT-9 and NFT-22 combustion structures and unburnt control samples from the open-air area were consolidated with sodium silicate (75%) mixed with distilled water (25%). Afterwards, samples were cut into cubic or cylindrical specimens of around 10 cm³. The final sample set comprised a selection of 88 specimens. From them, 41 are from the uppermost part of the combustion structure hand blocks (0–2 cm of depth), 26 from the intermediate part (2–4 cm), 5 from the lowest part (4–6 cm) and 16 from the unburnt blocks.

2.6. Laboratory methods

All the analyses reported here were carried out in the Laboratory of Palaeomagnetism of Burgos University, Spain. The natural remanent magnetization (NRM) directional stability was analysed in 73 burnt and unburnt (oriented) specimens to assess the directions recorded in the burnt sediments. Stepwise progressive thermal (TH) demagnetization of the NRM was

performed in 14–21 steps up to 585–600°C using a TD48-ASC oven and the remanence was measured with a 2G-755 cryogenic magnetometer (noise level: $\sim 5 \times 10^{-12} \text{ Am}^2$). Two additional burnt specimens per combustion structure along with other five unburnt specimens were analysed by stepwise alternating field (AF) demagnetization with the automatic demagnetization unit coupled to the 2G magnetometer in 20 steps up to a peak field of 100 mT. Deletion of the natural remanent magnetization by progressive demagnetization steps allowed us to reconstruct the direction of the magnetization vector. The analysis of demagnetization data and the calculation of the characteristic remanent magnetization (ChRM) direction was performed using the software Remasoft 3.0 [82].

The expected Earth's magnetic field (EMF) directions for the dates and place of the experimental burnings were calculated using the model IGRF v. 12 [83]. The calculated direction for El Salt site between August 6th and 20th of 2010 is: Dec. = 359.3°, Inc. = 53.2° whereas for March 27th of 2013 is: Dec. = 359.6°, Inc. = 53.3°. The angular distance between both directions is negligible for our purposes.

Low-field magnetic susceptibility of all specimens was measured initially at room temperature with a KLY-4 Kappabridge (AGICO, noise level: $3 \times 10^{-8} \text{ S.I.}$).

The Koenigsberger ratio ($Q_n = \text{NRM}/(\chi H)$, where χ is the magnetic susceptibility and H is the local magnetic field strength [84]) was calculated for the entire collection of oriented samples. This parameter provides a quick estimate of the efficiency of the NRM acquisition mechanism based on the relationship between the induced and the remanent magnetization and shows high values in the case of thermal remanent magnetization (TRM).

With the aid of a Magnetic Measurements Variable Field Translation Balance (MM_VFTB) several rock-magnetic analyses were carried out in order to further constrain the magnetic mineralogy, domain state and thermal stability. These comprised progressive isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves, hysteresis loops ($\pm 1\text{T}$), backfield coercivity curves and thermomagnetic curves until 700–800°C in air on bulk (non oriented) sample of each representative burnt facies and unburnt samples. IRM progressive acquisition consisted in applying incremental field steps and measuring the remanence (after removing the field) at each step. This measurement exclusively showed the ferromagnetic contribution and shed light on the coercivity of ferromagnetic minerals present in the studied materials. Backfield involved the same experiment, but applying the field in the opposite sense. This experiment provided a parameter called remanent coercive force (B_{CR}). Hysteresis cycles measured the magnetization of the sample submitted to cyclic applied magnetic fields up to $\pm 1 \text{ T}$. Hysteresis showed the contribution of both ferromagnetic and non-ferromagnetic fractions (dia- and paramagnetic minerals). After correcting the dia/paramagnetic fraction, hysteresis parameter ratios (remanent saturation to saturation magnetization (M_{RS}/M_S) and remanent coercive force to coercive force (B_{CR}/B_C)) were calculated for the sample set and displayed in the so-called "Day plot" [85,86]. Day plot shows the dominant domain state of ferromagnetic minerals in samples in which magnetite is the main magnetic carrier. It is basically related to the ferromagnetic grain size and how stable the magnetic signal is. The magnetization dependence with temperature (thermomagnetic curves) was measured in a constant field (around 36 mT) to identify the main magnetic carriers through the estimation of their Curie temperatures as well as to evaluate their magnetic stability. Thermomagnetic curves were systematically measured up to 700°C. Additionally, in order to determine maximum temperatures reached by BL using this experiment as paleotemperature indicator, representative samples from some combustion structures were selected to carry out partial thermomagnetic curves at specific temperature steps. This consists of heating until a maximum temperature of 200°C and subsequently cooling to room temperature, repeating this cycle of heating and cooling in incremental steps of 100°C until 700°C. The software *RockMag Analyzer* [87] was used to interpret all these data.

3. Results

3.1. Magnetic properties

3.1.1. Unburnt materials. NRM intensity values of oriented specimens range from 2×10^{-3} to 2×10^{-1} A/m for the cave combustion structures and from 2×10^{-2} to 6×10^{-2} A/m for the open-air area (Fig 2A). Cave specimens exhibit susceptibility values between 1×10^{-5} and 4×10^{-3} (S.I.), whereas open air unburnt specimens range from 8×10^{-4} to 1×10^{-3} (S.I.) (Fig 2B). Koenigsberger ratio values for the open air materials tend to be slightly lower than those from the cave (Fig 2C and 2D), but in both cases around the half of the specimens presents values higher than 1.

Magnetite seems to be the main ferromagnetic mineral in the unburnt sediment of the open air area and the thermomagnetic curve exhibits a clear irreversible behaviour (Fig 3A.1). In the case of the unburnt carbonate crust main ferromagnetic mineral could not be determined with certainty since thermomagnetic curves are very noisy (Fig 3A.2). Probably magnetite is present. In the case of the detrital layer, magnetite is suggested as the main ferromagnetic mineral, although pure iron (Curie temperature around 770°C) is also detected (Fig 3A.3). After the heating, iron is transformed into haematite and/or magnetite.

The carbonate crust presents lower values of magnetization in the hysteresis plots as well as in thermomagnetic curves, compared with the detrital layer and the open air (soil) sediment (Fig 3A and 3B).

The hysteresis ratios are $0.11 < Mrs/Ms < 0.18$ and $1.9 < Bcr/Bc < 4.1$, suggesting pseudo-single domain (PSD) behaviour in the Day Plot [85,86] (Fig 3C).

3.1.2. Burnt materials. Initial NRM values of the oriented burnt specimens oscillate between 6×10^{-4} and 3×10^{-1} A/m (Fig 2A) showing a decreasing intensity pattern with depth. The uppermost specimens (0–2 cm of depth) exhibit higher NRM values than those from the intermediate (2–4 cm) and deepest (4–6 cm) depths both for open-air and cave combustion structures.

The magnetic susceptibility values of the oriented burnt specimens oscillate between 1×10^{-5} and 2.5×10^{-3} (S.I.) (Fig 2B). Similarly to the NRM, the same decreasing pattern in depth is also observed in this parameter both for cave and open-air combustion structures.

Koenigsberger (Q_n) ratio values of burnt materials (both open-air and cave combustion structures) are mostly comprised between 1 and 19, suggesting that the magnetization mechanism is consistent with thermal origin (Fig 2C and 2D). As expected, a decrease as a function of depth is observed and unburnt specimens tends to exhibit lower Q_n ratio values. Within their variability, Q_n ratio values of cave combustion structures are higher than those from open-air combustion structures (Fig 2C), mainly because the low susceptibility of the first.

Progressive IRM acquisition curves show that the main ferromagnetic minerals are low coercivity minerals (e.g.: magnetite and/or maghaemite), because saturation is almost reached between 100–300 mT (Fig 4). The intensity of IRM curves is higher in ashes, followed by black layers and the burnt carbonate crust samples. The only exceptions are the black layer samples of NFT-9. Their values are higher than those of ashes from other combustion structures.

Thermomagnetic curves indicate that the main magnetic carrier is magnetite with curie temperatures (T_C) of around 550–580°C (Fig 5A–5C, 5E and 5F). Occasionally, higher T_C up to 600–620°C is observed, suggesting that partially maghemitized magnetite is also present (Fig 5D). The thermomagnetic behaviour of ashes is heterogeneous in spite of being the most magnetic facies. Some samples are highly reversible–heating and cooling cycles coincide- (Fig 5A) while others not, showing also the neoformation of secondary magnetite (Fig 5B). BL curves are always irreversible and less magnetic than ashes (with the exception of the BL of NFT-9), showing a significant increase of magnetization on the cooling cycles (Fig 5E and 5F).

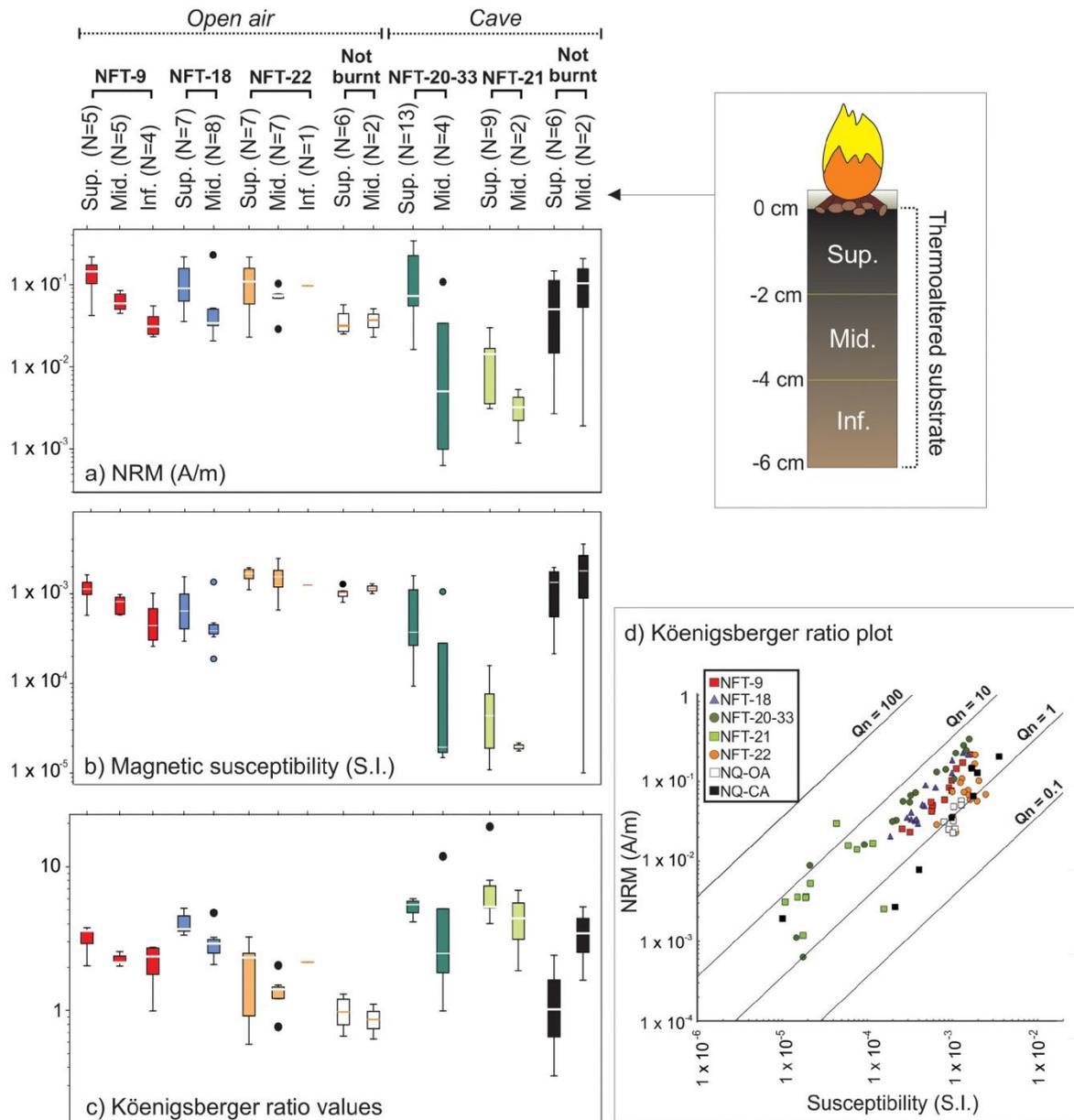


Fig 2. Values of natural remanent magnetization (NRM), initial magnetic susceptibility and Königsberger ratio. Box & whiskers plots of (A) natural remanent magnetization intensity (NRM), (B) initial magnetic susceptibility and (C) Königsberger ratio values per combustion structures/contexts and depth. The line dividing the box corresponds to the median. Black points represent outliers. (D) Königsberger ratio diagram showing magnetic susceptibility values in axis X, NRM values in axis Y and Königsberger ratio values delimited by isolines. All graphics are shown on logarithmic scale.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g002>

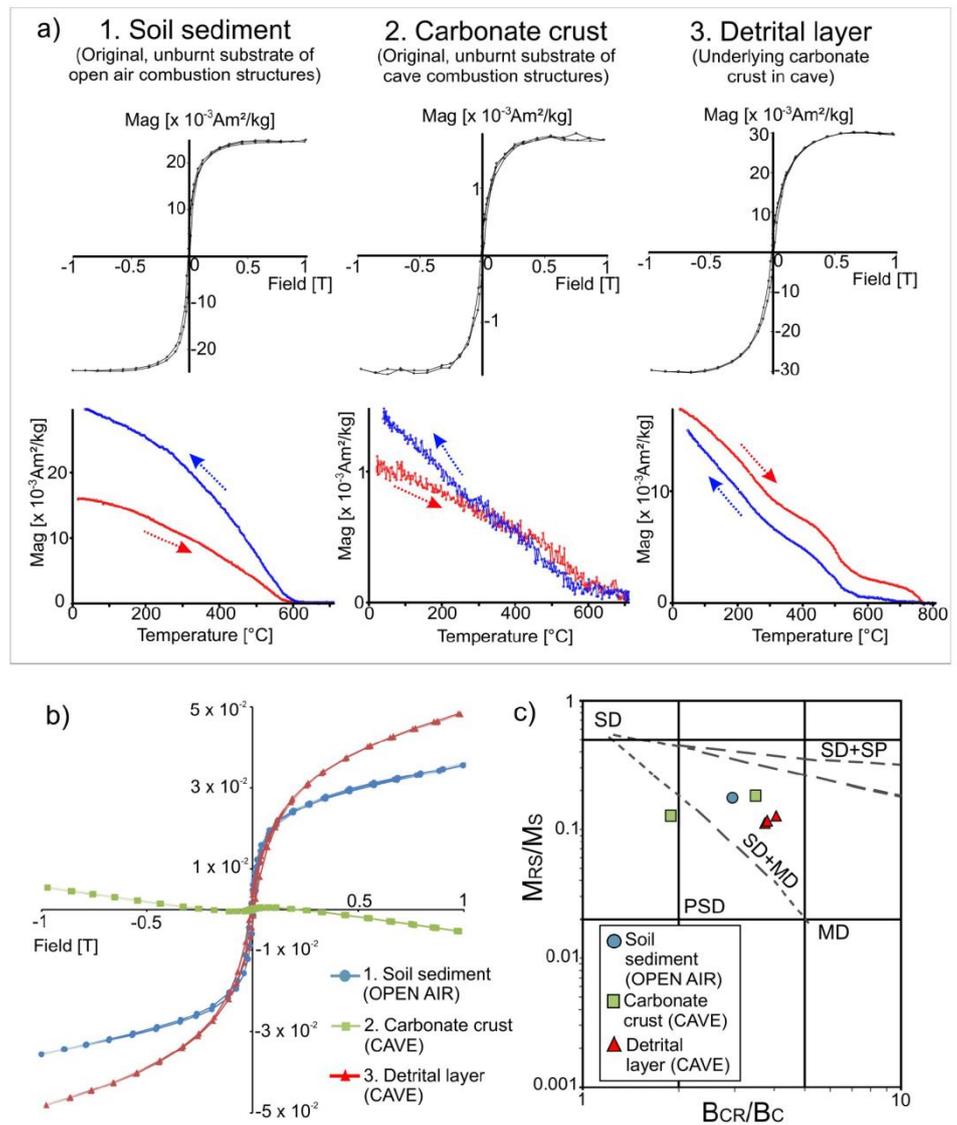


Fig 3. Representative hysteresis loops, temperature-dependent magnetization curves and Day Plot [85, 86] of unburnt materials. (A) Hysteresis loops with para-/diamagnetic correction (up) and thermomagnetic curves with correction of dia/paramagnetic contribution (down) of (1) unburnt open-air substrate and (2) unburnt carbonate crust and (3) detrital layer from the cave. (B) Uncorrected hysteresis plots of the samples showed in (A1), (A2) and (A3). (C) Day plot [85,86] (logarithmic scale) showing representative unburnt samples. The dashed lines represent mixing curves taken from [86] for mixtures of single domain (SD) and multidomain (MD) or superparamagnetic (SP) magnetite grains. PSD refers to pseudo-single domain.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g003>

In some cases, a new ferromagnetic phase is created starting around from 400–450°C (Fig 5F). It is secondary magnetite. Partial thermomagnetic curves in incremental temperature steps were carried out on a twin sample to that shown in Fig 5F. The heating and cooling cycle up to

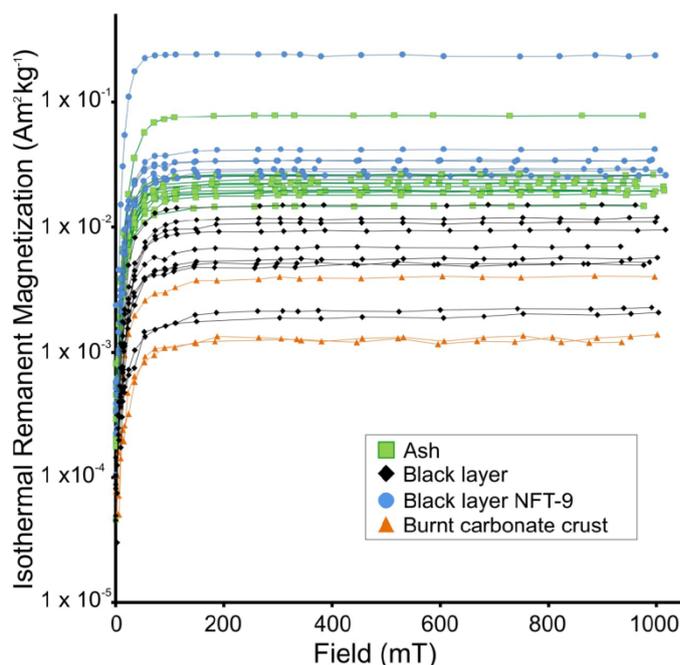


Fig 4. Progressive IRM acquisition curves per facies on logarithmic scale. Green squares = ash; black diamonds = black layer; blue circles = black layer from the intensively trampled NFT-9; orange triangles = burnt carbonate crust). Axis Y is on logarithmic scale.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g004>

300°C is clearly reversible (Fig 5G). The partial run up to 400°C is highly reversible, although slight irreversibility could be suggested (Fig 5H). The cycle up to 500°C is clearly irreversible and secondary magnetite is created (Fig 5I).

Magnetite is the main ferromagnetic mineral in the burnt carbonate crust (Fig 5C). However, in some cases a phase with Curie temperatures slightly above 600°C and an inflection around 300°C also reproducible on cooling is observed (Fig 5D).

The hysteresis ratios obtained range from $0.11 < M_{rs}/M_s < 0.25$ and $2.1 < B_{cr}/B_c < 4.1$ for the sample set studied. Analysis of hysteresis parameter ratios pointed towards PSD behaviour in the Day plot (Fig 6).

3. 2. Directional stability of NRM

3.2.1. Unburnt control samples. Unburnt materials from both the cave and open-air areas show heterogeneous NRM directional behaviours (Fig 7). Samples exhibit two or more palaeomagnetic components, clearly overlapped in AF diagrams (e.g.: Fig 7B). In the open air, it is most likely due to physical reworking undergone by this soil which was used until recently for gardening purposes. Nevertheless, a northward low-temperature/low-coercivity component is often observed (e.g.: Fig 7A and 7C). It is interpreted as a viscous overprint acquired after the mechanical reworking.

3.2.2. Combustion structures. The lowest-coercivity (< 6–8 mT) or lowest-temperature (< 100–150°C) steps are interpreted as a viscous overprint acquired after heating.

Three main directional behaviours have been distinguished and described below:

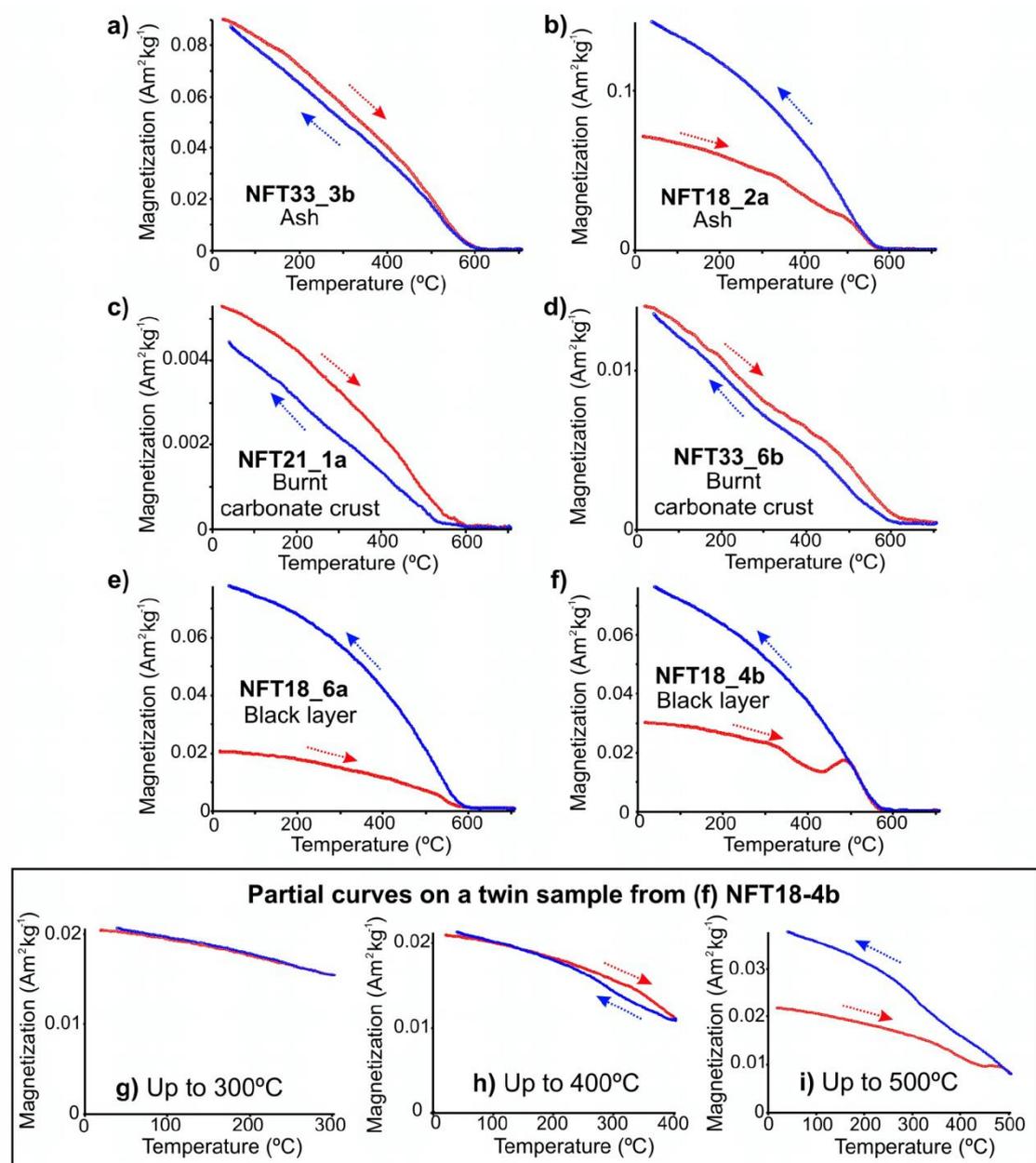


Fig 5. Representative thermomagnetic curves (temperature dependence of magnetization) of burnt materials. (A-B) Thermomagnetic curves of ash samples, (C-D) burnt carbonate crust and (E-F) black layer, all up to 700°C. (G-I) Partial thermomagnetic curves up to 300°C (G), 400°C (H) and 500°C (I) of a twin sample of black layer shown in (F).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g005>

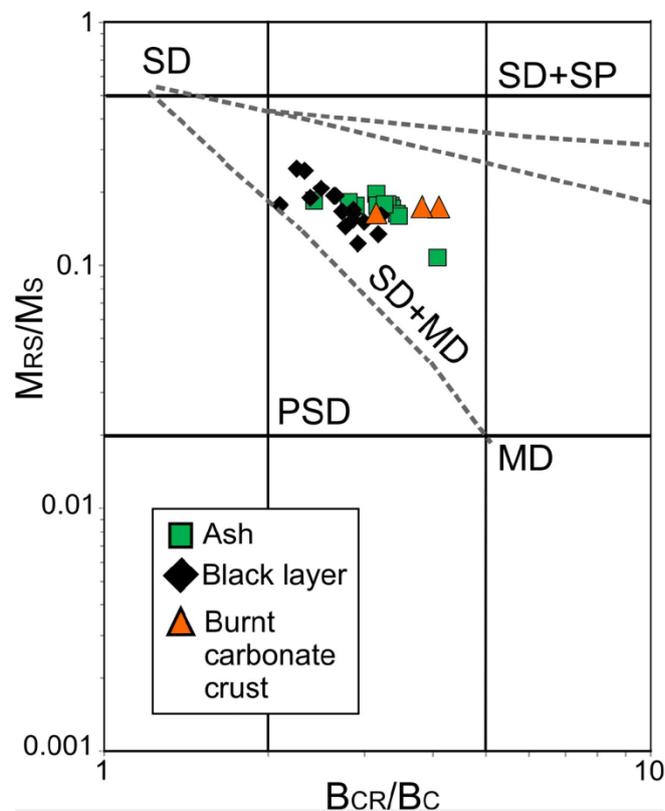


Fig 6. Day plot [85,86] of burnt samples (logarithmic scale). This graphic shows the ratio of saturation remanence (M_{RS}) to saturation magnetization (M_s) vs. the ratio of remanent coercive force (B_{CR}) to coercive force (B_c). Regions of single domain (SD), pseudo-single domain (PSD) and multi domain (MD) magnetite particles are plotted according to [86], as well as theoretical mixing curves showed as dashed lines including also SP (superparamagnetic) grains.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g006>

- a. A single component (A) whose direction is coherent with the local Earth's magnetic field and interpreted as the record related to the fire (Fig 8A–8D). Despite the NRM orthogonal demagnetization diagrams are defined by a single component, different types of intensity decay curves have been observed among the TH specimens. In some cases, the drop is gradual (Fig 8A), while in others there is a major decay at lower temperatures (*ca.* 250–300°C, e.g.: Fig 8C). AF demagnetized specimens are dominated by low-coercivity minerals (Fig 8B and 8D) with approximately the 90% of the NRM demagnetized at 30 mT and mean destructive fields (MDF) around 15–20 mT.
- b. A low temperature component (A_1) of normal polarity interpreted as the record associated to the last heating (Fig 9A–9F). This is the most common behaviour observed. The A_1 component is detected up to variable temperatures that oscillate between 150 and 500°C. It agrees well with the gradient of temperatures expected for these structures depending on the superficial location of samples (center vs periphery) and the depth. Intensity commonly shows a considerable drop at temperatures very close to the maximum unblocking temperatures (max T_{UB}) of the component A_1 (Fig 9A–9D). At higher temperatures, the behaviour

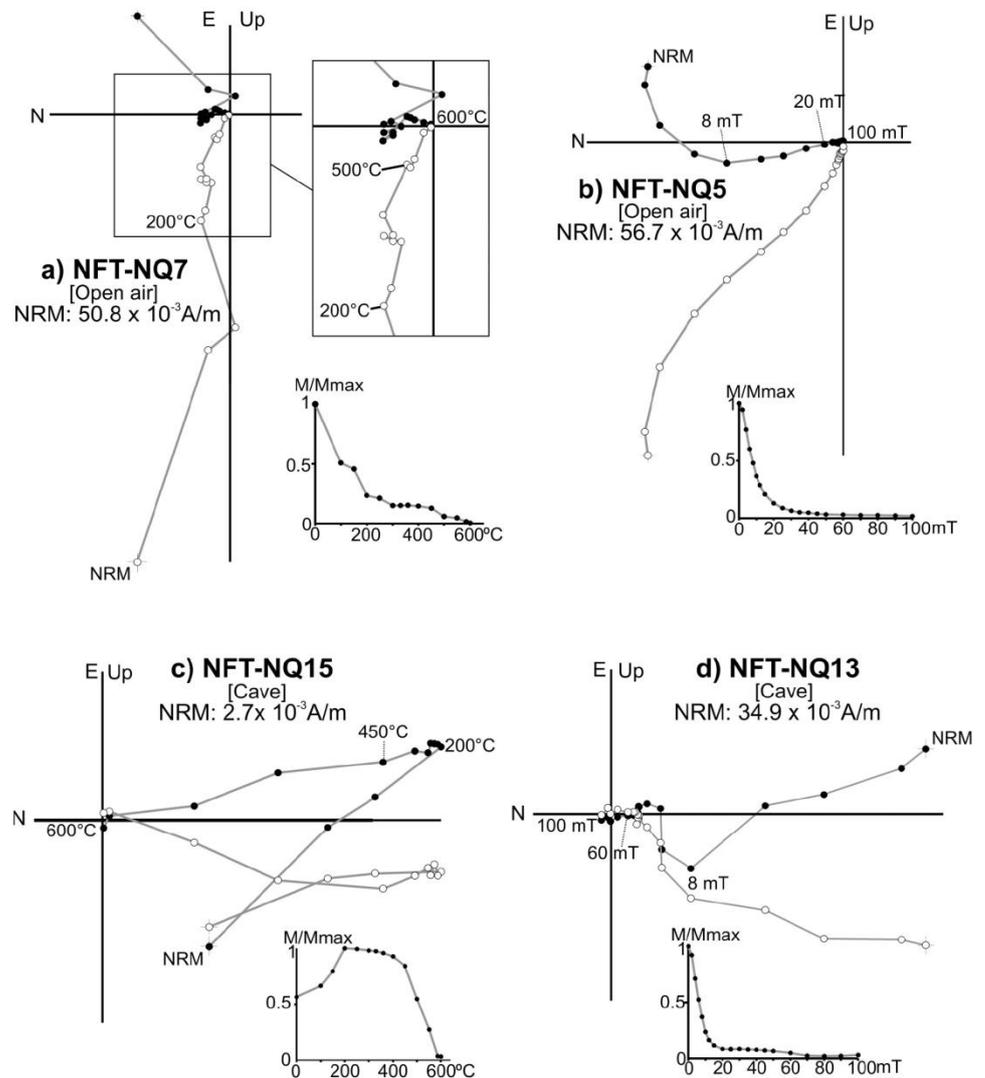


Fig 7. Representative orthogonal plots of NRM thermal and alternating field demagnetizations of samples from unburnt materials. (A-B) Examples from open air; (C-D) examples from cave. This graph shows the structure and direction of the magnetization vector(s) of a sample during the stepwise demagnetization process. Each point represents a demagnetization step. Conventionally, the direction of the vector is defined by two angles: declination (angle respect the North on the horizontal plane) and inclination (angle between the vector and the horizontal plane: downward or upward). Solid (open) circles show projections of vector endpoints onto the horizontal (vertical) plane. Sample code, magnetization intensity and normalized NRM intensity decay plots are also shown.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g007>

is more complex. A high-temperature component (B) (Fig 9A–9F) is observed with a scattered direction (Fig 10). It is interpreted as the magnetic record prior to the fire. As we suggested for unburnt materials, mechanical movements suffered by the substrate before the heating seems to be the cause of this dispersion in open area combustion structures.

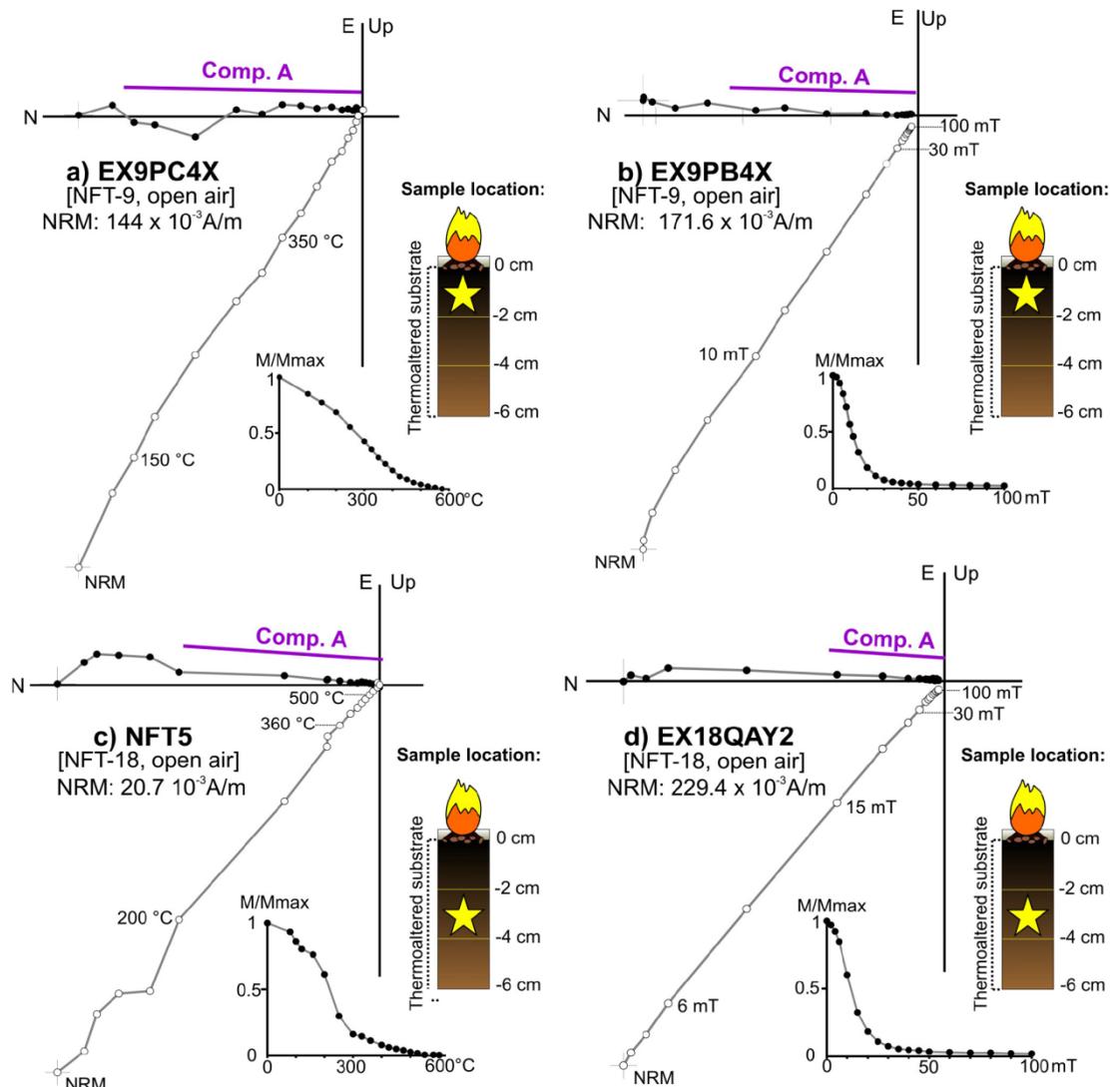


Fig 8. Representative orthogonal NRM thermal and alternating field demagnetizations plots of samples showing component A. (A-B) Superficial specimens; (C-D) intermediate specimens. Symbols as in Fig 7.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g008>

Occasionally, a third component is observed (Fig 9B). The AF demagnetised specimens again show a low coercivity behaviour with almost the 90% of the NRM destroyed at 30 mT (Fig 9F) and MDFs about 15–20 mT.

- c. Samples showing unstable and erratic NRM behaviour, anomalous directions and/or low intensities of NRM, which does not allow to isolate the ChRM (Fig 11). It is interpreted as the result of a very low (or even absence of) thermal impact. The specimens exhibiting this

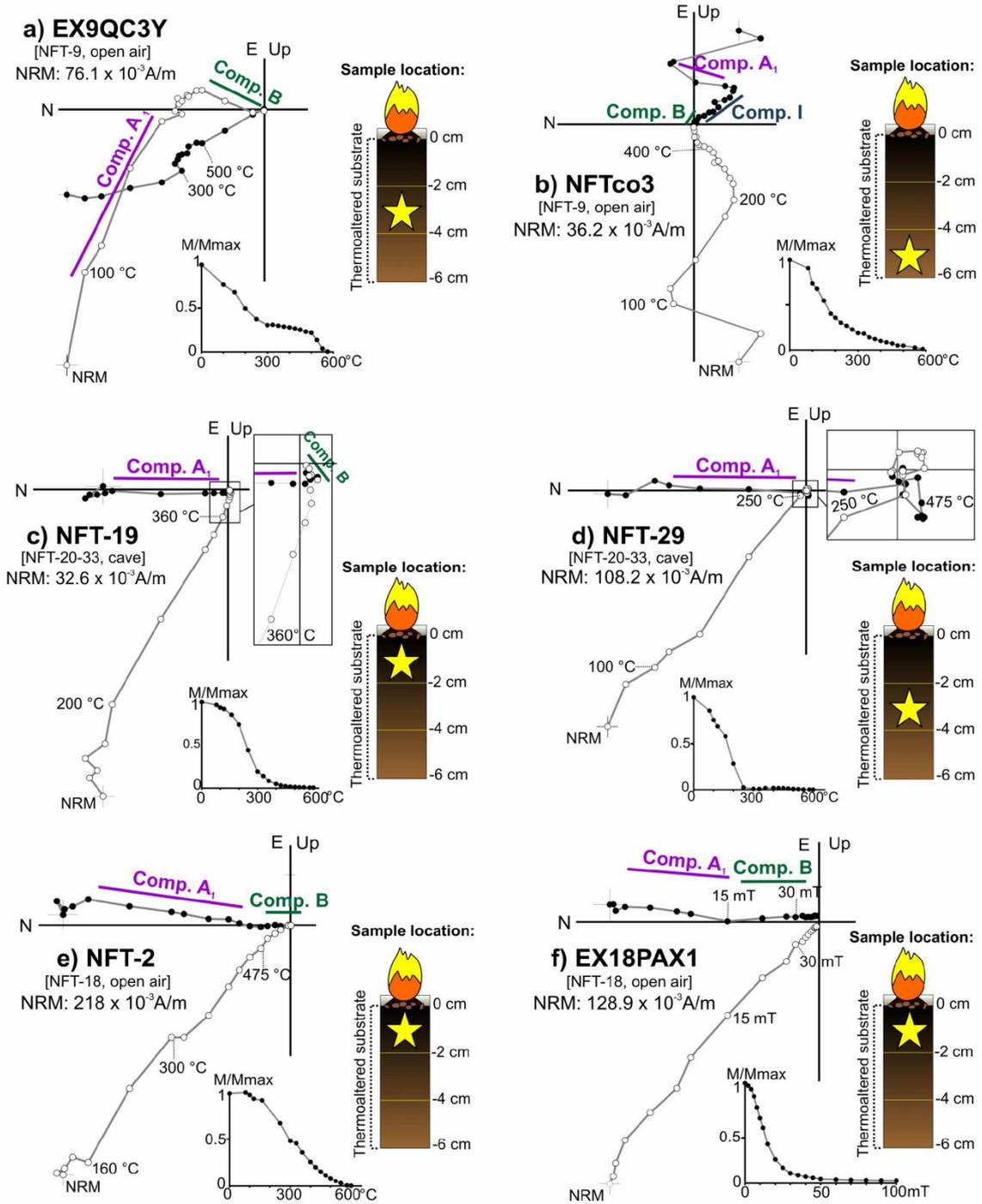


Fig 9. Representative orthogonal NRM thermal and alternating field demagnetizations plots of samples showing component A_1 . Stratigraphic location of each sample with respect to the surface is indicated for each panel. For clarity, the higher temperature steps of panels C and D are blown-up showing the presence of high-temperature components. Symbols as in Fig 7.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g009>

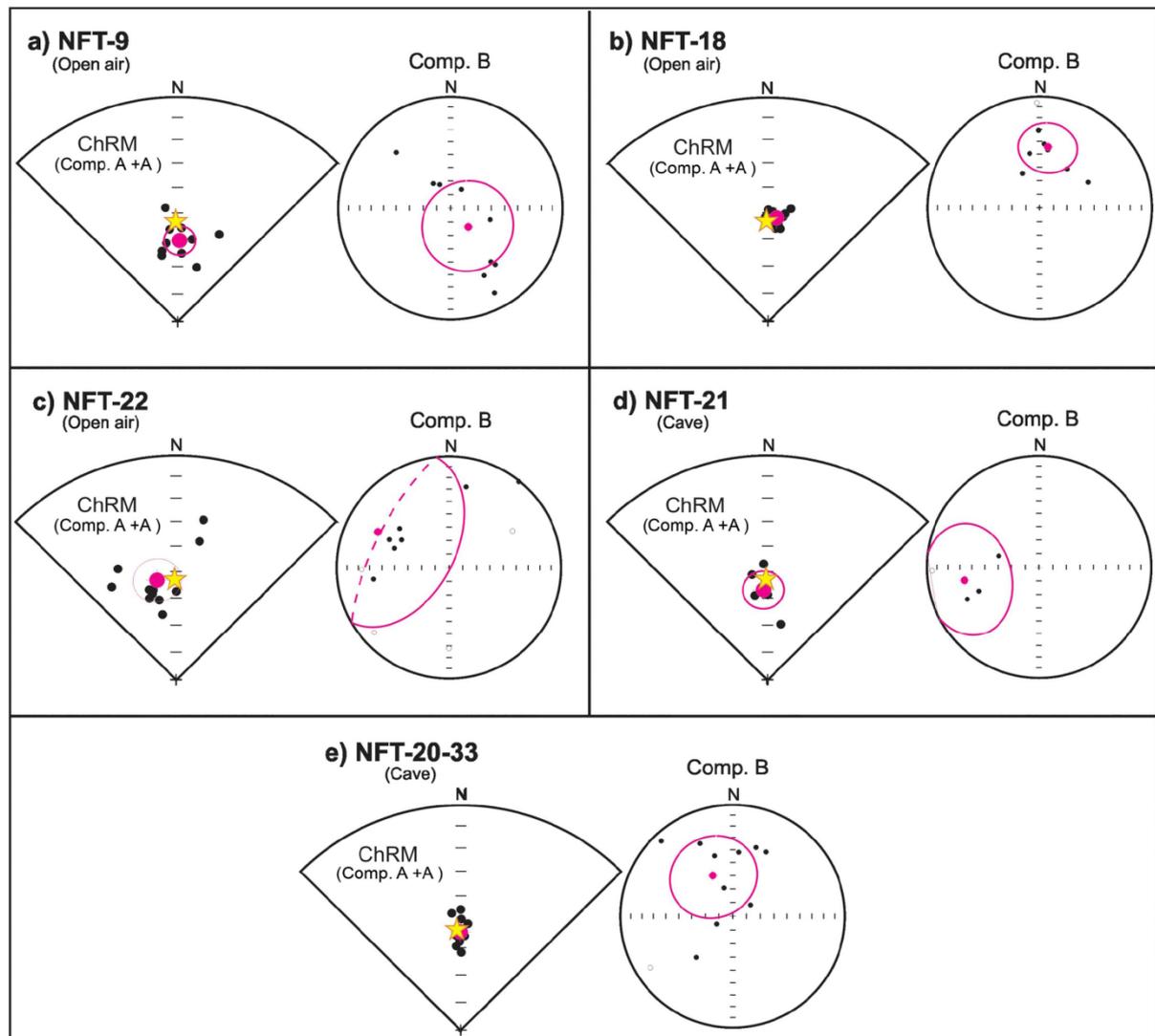


Fig 10. Equal area projections of the mean directions obtained. (A) NFT-9; (B) NFT-18; (C) NFT-20-33; (D) NFT-21; (E) NFT-22. Equal area projection shows the paleomagnetic directions described in the text of every specimen considered reliable (black points) and the mean direction obtained with its respective α_{95} semi angle of confidence (95% of probability), depicted as pink point and pink circle, respectively. The declination reads clockwise and is represented around the perimeter of the circumference, while the inclination varies from 0° (perimeter) to 90° (center of the circumference). Solid (open) symbols correspond to downward (upward) inclination. In the left part of each panel, ChRM mean direction (components A and A_1) is shown; in the right part, the mean direction of the high-temperature component (component B). The yellow star is the expected Earth's magnetic field direction at the time of burning.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g010>

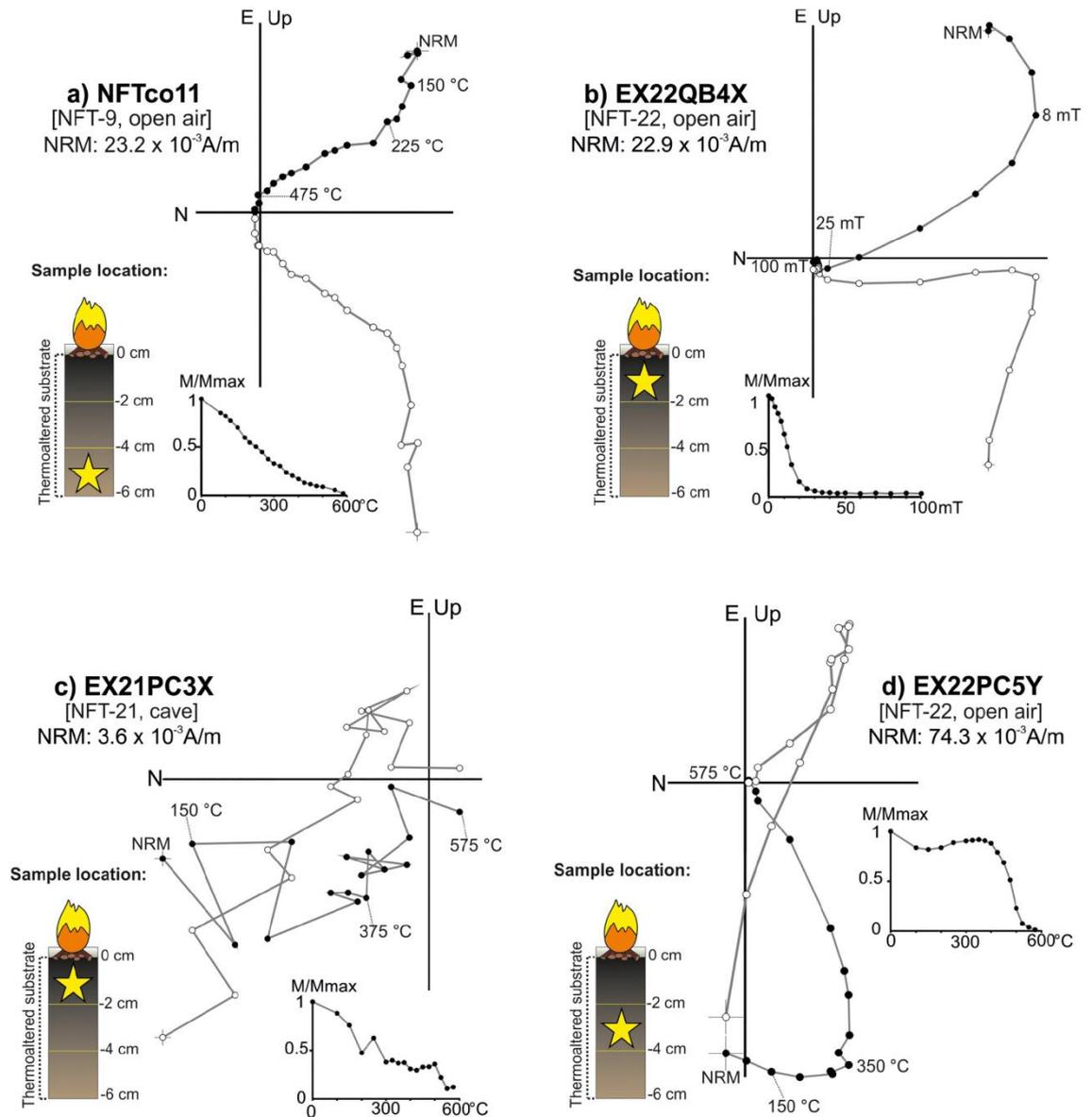


Fig 11. Representative orthogonal NRM thermal and alternating field demagnetizations plots of samples showing anomalous NRM behaviour. Stratigraphic location of each sample with respect to the surface is indicated for each panel. Symbols as in Fig 7.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.g011>

pattern and those broken during the demagnetization were excluded in the calculation of the mean ChRM directions.

In the cave combustion structures, the most common pattern in this third category is an erratic and unstable diagram with low NRM values (e.g.: Fig 11C). This is logical since in

Table 2. Summary of the statistical parameters associated to the ChRM mean directions (components A and A₁). From left to right: name of the combustion structure, N'/N (number of specimens used to calculate the direction/total number of demagnetized specimens), declination, inclination, parameter of precision *k*, α_{95} confidence cone error and β (angle between the calculated and the expected direction).

Hearth	N'/N	Dec. (°)	Inc. (°)	<i>k</i>	α_{95} (°)	β (°)
NFT-9	10/14	1.4	60.4	79.5	5.5	7.3
NFT-18	14/15	4.8	51.9	565.3	1.7	3.6
NFT-20-33	14/17	359.7	53.9	288.1	2.3	0.6
NFT-21	6/11	357.5	56.9	89.4	7.1	3.8
NFT-22	11/15	349.2	52.6	31.8	8.2	6.1

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221592.t002>

absence of heating the ferromagnetic content in carbonate crust is very poor. In the open air context, samples with moderate higher NRM values are observed but the diagrams show clear overlappings (curvatures) and anomalous directions (Fig 11A and 11B).

Fig 10 illustrates the mean directions of the ChRM (comps. A and A₁) of each combustion structure and their corresponding statistical parameters are shown in Table 2. The angle between the calculated and the expected mean direction (β) is also included in that table.

4. Discussion

The magnetic signature of burnt materials is affected by three main factors: (1) pre-burning conditions, (2) burning and (3) taphonomic processes. In order to detect and isolate the effects of taphonomic processes in the magnetic signature, the effects of pre-combustion conditions and burning should also be assessed. In the following sections we discuss the results of rock magnetic properties and NRM features in our experimental combustion structures and unburnt sediment in relation to the three issues mentioned above.

4.1. The influence of the substrate in the magnetic signature

The nature of the original (unburnt) substrate has a clear influence in the resulting magnetic values of the combustion substrate facies (BL and burnt carbonate crust). The substrate of open-air combustion structures contains organic matter and is rich in ferromagnetic minerals (*s.l.*) as indicated by concentration-dependent parameters such as magnetic susceptibility (Fig 2B). The presence of ferromagnetic minerals such as magnetite in soils is rather common. These pre-combustion conditions of the substrate result in little change in concentration-dependent parameters upon heating (Fig 2B). Despite the high temperatures reached in these open-air combustion structures, ferrimagnetic neoformation was limited. In unburnt cave materials, magnetization values of the carbonate crust in the hysteresis plots and thermomagnetic curves are lower than those of the detrital layer underlying the carbonate crust. (Fig 3A and 3B). This is interpreted as a difference in the presence of ferromagnetic minerals (*s.l.*). The carbonate crust is considerably poorer in ferromagnetic minerals than the detrital layer. Therefore, the proportion of detrital layer versus the carbonate crust included in each sample influences the results. Samples used for rock magnetic analyses (~300 mg) allowed us to isolate every facies in detail. However, the oriented cubes (~ 8–10 cm³) include both facies and cannot be separated. The high dispersion of NRM and magnetic susceptibility values of unburnt oriented specimens is probably an effect of the variability in the proportion of detrital layer, which is different for each specimen. For this reason, the comparison of NRM and susceptibility values between unburnt and burnt sediment must be interpreted with caution.

The substrate also influences the Q_n ratio. As expected, unburnt samples exhibit lower Q_n values than the burnt samples in their respective contexts. Some cave sediment samples

show high Q_n values even when NRM values are not very high (see the [results](#) for intermediate (2–4 cm) unburnt cave samples, [Fig 2C](#)). In these cases, Q_n ratio is affected by low susceptibility values due to the influence of the diamagnetic fraction (which strongly reduces the susceptibility).

The origin of the iron identified in the detrital layer is for the moment unknown. However, its presence in the unburnt substrate before heating does not compromise the magnetization record produced by fire.

4.2. Variation of the magnetic signature by heating

As far as the magnetic composition is concerned, all the samples (open-air, cave entrance and unburnt sediment) are dominated by low-coercivity minerals, mainly magnetite. The Day plot shows that all the samples are quite well clustered in the pseudo-single domain (PSD) area, which suggests that heating conditions homogenize the magnetic granulometry of the burnt facies ([Fig 6](#)). However, interesting differences among burnt facies were observed. The most strongly burnt facies (ashes) display the highest IRM values followed in decreasing order by black layer and carbonate crust samples ([Fig 4](#)). As all samples are dominated by the same ferromagnetic mineralogy (mainly magnetite), IRM can be interpreted as a magnetic concentration-dependent parameter (higher magnetization equates to higher concentration of ferromagnetic minerals). IRM points to a higher concentration of ferromagnetic minerals in ashes than in the BL and burnt carbonate crust samples. An exception is given by the BL samples from the NFT-9 open-air combustion structure, which displays higher values than ashes from other combustion structures. Unfortunately, it was not possible to isolate pure ash from the NFT-9 combustion structure in the field for rock-magnetic analysis because this combustion structure was intensively trampled for two weeks. Most probably, these values are related to taphonomic processes as will be discussed in section 4.3.

A variable heat impact in the combustion substrate layers (BL and burnt carbonate crust) is reflected in the decreasing NRM intensity and magnetic susceptibility with depth ([Fig 2A and 2B](#)).

Thermomagnetic curves suggest that BLs reached temperatures clearly lower than 700°C, since thermomagnetic curves up to such temperature are always irreversible (heating and cooling does not coincide) ([Fig 5E and 5F](#)) and show neo-formation of magnetite. Otherwise, they should exhibit thermomagnetic reversibility when re-heated to that temperature in the lab. This behaviour has been previously observed in similar burnt cave facies [[55,88,89](#)]. Partial thermomagnetic curves were carried out on a twin sample of one of the samples showing irreversible behaviour in the thermomagnetic curve up to 700°C ([Fig 5F](#)). The change from a highly reversible behaviour in the partial curve up to 400°C to clearly irreversible behaviour in the curve up to 500°C ([Fig 5H and 5I](#)) suggests that this sample was not originally heated over 500°C (probably 450°C, considering the increasing of magnetization during lab heating around this temperature in the curve up to 700°C, [Fig 5F](#)). These results agree with the pTRMs identified in the directional analyses, which are characterized by maximum unblocking temperatures of up to 500°C. Moreover, it is also coherent with the interpretation of BLs given by Mallol *et al.* [[32](#)] according to which the colour of BLs results from incomplete combustion of organic matter contained in the original substrate.

The different behaviours observed in the orthogonal NRM demagnetization diagrams of the combustion substrate facies (BL and burnt carbonate crust) are interpreted in terms of distinct magnetization mechanisms related with heating impact. Component A is interpreted as a TRM when in addition to an univectorial structure of the NRM, the intensity decay curves are gradual ([Fig 8A](#)). However, in cases in which the intensity drop is more abrupt at intermediate

temperatures in the intensity decay curves (ca. 300°C; e.g.: Fig 8C), TCRM is suggested as the magnetization mechanism. This interpretation would imply that these samples did not exceed the Curie temperature (T_C) of the main magnetic carrier (magnetite $T_C = 585^\circ\text{C}$). The first part of the component (up to the temperature at which the abrupt drop is detected; ca. 300°C) contains magnetic grains with T_B below the maximum heating temperature reached. The magnetization mechanism of this part is a thermal magnetic remanence. The remaining steps include the new minerals created by fire but with T_B higher than the maximum temperature reached. In this case, those grains are of chemical origin. As both parts are acquired in presence of the same field, they are not directionally distinguishable and the directional record is reliable [90]. Carrancho and Villalain [76] demonstrated this hypothesis in a study of an experimental combustion structure made on a clayey substrate.

Component A_1 is interpreted as a pTRM related to the fire and component B is interpreted as a record prior to the fire (Fig 9). Therefore, these samples did not exceed the Curie temperature or the main remanence carrier. It is worth mentioning that maximum unblocking (max. T_{UB}) temperatures of the pTRMs are coherent with the results of the partial thermomagnetic curves, which suggest maximum temperatures below 500°C. Although the ash (WL facies) and possibly also the substrate's surface reached high temperatures ($> 600^\circ\text{C}$), lower temperatures inside the black layer and carbonate crust can be explained by the insulating effect of the ashes limiting the penetration of heat in depth [70,91], among other factors. Furthermore, there is significant lateral and vertical temperature variability in combustion structures such as the ones studied here, supporting co-existence of different magnetization mechanisms (full TRM, TCRM and pTRM) in different parts of the same combustion structure.

4.3. Preservation of the magnetic signature and taphonomic conditions

Certain behaviours of the thermomagnetic curves can be interpreted in terms of taphonomic processes. Ashes are variable showing both high thermomagnetic reversibility and irreversibility in some cases. A stable and highly reversible thermomagnetic behaviour is expected given their associated high temperatures ($> 600^\circ\text{C}$). Irreversibility can be explained as a result of certain taphonomic processes such as trampling, animal bioturbation or other processes that enhance reworking of ashes with underlying lightly burnt or overlying unburnt substrates. During excavation of the open-air combustion structures, it was difficult to identify ash. Also, grayish-brown aggregates (probably a mixture of sediment and ashes) were observed on top of the combustion structures, presumably as a result of earthworm activity. Plant growth in the open-air combustion structures was also observed (S4 Fig). Regarding cave-entrance combustion structures, the ashes were reasonably well-preserved but not physically *in situ* given their high volatility. Assessing the preservation potential of ash is important for archaeomagnetic analysis because it contains the highest concentrations of ferromagnetic minerals. Unfortunately, our data corroborate that in the contexts tested, ash layers are not suitable for archaeomagnetic directional analyses since their *in situ* nature cannot be guaranteed.

Exceptionally high values of magnetization observed in IRM results of NFT-9 BL are also interpreted as a result of taphonomic conditions. Surprisingly, these values are even higher than those from ashes of other combustion structures. Keeping in mind that this combustion structure was intensively trampled for 15 days just after the firing, it is suggested that trampling incorporated ash into the subjacent BL consequently enhancing its magnetic mineral concentration. Mallol *et al.* [32] showed micromorphological evidence of ash inclusions in the BL of an experimental combustion structure trampled for 21 days.

Regarding to the directional dataset, it is expected that taphonomic processes as those observed (mainly bioturbation) affect the magnetic record due to mechanical sedimentary

disturbance. However, directional results show considerable high quality. The angular distance (β) between each ChRM mean direction and the expected direction of the EMF at the experiment location oscillates between 0.6° and 7.3° . In combustion structures NFT-20-33, NFT-21 and NFT-22, the expected direction is within α_{95} . This is not the case for NFT-9 and NFT-18. However, in all cases the difference between β and α_{95} ($\beta - \alpha_{95}$) is $< 2^\circ$. This value can be considered to fall within the estimation error for the EMF at the studied location (obtained from the IGRF-12 model [83]). Subsequently, the errors can be considered stochastic and no statistically significant systematic error was found. In all cases, deviation can be explained as caused by stochastic dispersion related to subsampling, measurement errors, mechanical disturbance related to taphonomic processes, etc.

Precision parameter k is also informative of the quality of the directions, since it reflects the dispersion of the sample collection. When k values are higher, the population is better grouped. In our dataset, values are variable, although generally good. In the cases of NFT-18 and NFT-20-33, k values are exceptionally high (Table 2).

Directional analyses were exclusively developed on specimens of BL and burnt carbonate crust substrates. The BLs were relatively compacted before heating, and the burnt carbonate crust was lithified. Thus, they are less susceptible to reworking than ashes. Such higher degree of compaction and consolidation might explain the good state preservation observed. Consequently, selection of the facies for archaeomagnetic analyses is a key methodological aspect. Combustion substrate facies seem to be better candidates than ashes.

In spite of the general good quality of the directions, there is room for some remarks. Below, we discuss each combustion structure individually in order to interpret our archaeomagnetic results considering their specific taphonomic conditions.

The inclination obtained in open-air combustion structure NFT-9 is somewhat higher than the expected (Fig 10A). Trampling should have caused a shallowing effect with lower inclination values, but this is not the case. The precision parameter ($k = 79.5$) is statistically rather acceptable and the discrepancy between the obtained and expected direction might be explained by the error associated to sampling, sub-sampling and/or measuring. The most striking result is that a reliable archaeomagnetic direction was obtained from the BL facies even though this combustion structure was intensively trampled. Thus, the compact, more consolidated original state of the BL facies compared to the loose WL facies (ash) is a factor to consider in assessing the preservation potential of different facies within a combustion structure.

Open-air combustion structure NFT-18 shows a very low deviation of the archaeomagnetic direction ($\beta = 3.6^\circ$) and the highest precision parameter ($k = 565.3$; Table 2 and Fig 10B). Such a small deviation is interpreted as a result of sampling/sub-sampling error but the quality of the palaeomagnetic direction and the statistical parameters are unquestionable.

Open-air combustion structure NFT-22 displays the poorest statistical results ($k = 31.8$) and maximum deviation from the expected direction ($\beta = 6.1^\circ$) although the expected direction is within the α_{95} ($\beta < \alpha_{95}$; Table 2 and Fig 10C). As the sampling and subsampling processes here were the same as for the other combustion structures, the cause of this higher dispersion might be linked to taphonomic processes. The interpretation of its NRM demagnetization diagrams was complex. Its Q_n ratio values are the lowest among the open air burnt samples (Fig 2C and 2D), suggesting that the magnetization record is not very efficient. Moreover, the maximum T_{UB} of the ChRM direction (pTRMs) tends to be relatively low (ca. 150 – 300°C). Interestingly, during its excavation the identification of the burnt facies was not as clear as in the other combustion structures. With the exception of NFT-9 which was intensively trampled, all open-air combustion structures underwent similar taphonomic processes.

We therefore interpret the poor directional results of NFT-22 due to a lower thermal impact in the sampled areas. Notwithstanding, a poor preservation cannot be totally excluded

The archaeomagnetic results of cave entrance combustion structure NFT-21 are conditioned by breakage of the most heated part of one of the blocks, resulting in weak and erratic NRM diagrams (e.g.: Fig 11C). This fire was extinguished with sediment, which would have presumably affected the ashes but not the underlying (lithified) burnt carbonate substrate. Nonetheless, despite the relatively high uncertainty due to the low number of available specimens ($\alpha_{95} = 7.1^\circ$; Table 2), α_{95} contains the expected direction ($\beta < \alpha_{95}$; Fig 10D).

Finally, cave entrance combustion structure NFT-20-33 gave us the opportunity to explore archaeomagnetic properties in relighting events, as it is a fire made directly on top of a preceding one carried out three years before. The high temperatures achieved in both fires and the lithified nature of the carbonate substrate facilitated a suitable record of the Earth's magnetic field ($\beta < 1^\circ$, Fig 10E) and the *in situ* preservation of the burnt surface. The statistical results are very good ($k = 288.1$). Some authors have shown that reheated structures are likely to yield better archaeomagnetic results than a single heating even at high temperature [92]. Reheating was not detected in the magnetic signal for two main reasons: First, if the last heating reaches high enough temperatures, the previous magnetization will be reset [93]. Second, the local Earth's magnetic field direction in 2010 and 2013 was so similar that is statistically impossible to distinguish such variation in our results.

Our results reinforce the idea that archaeomagnetism and rock magnetism are two promising tools for the study of prehistoric fire. Although poor results should be expected considering the observed taphonomic conditions, the preservation of the magnetic signature is very good. The reliability of the EMF's directional record on the studied combustion structures supports the application of archaeomagnetic analyses in Palaeolithic contexts, which can be helpful to assess geochronological questions. At the same time, analysis of magnetic signature provides information on estimation of maximum temperatures and thus contribute to the thermal characterization of Paleolithic fires by combining this information with the data obtained from other disciplines. Furthermore, bearing in mind the general good directional results despite the taphonomic processes observed, detection of very deviated and scattered mean archaeomagnetic directions in Palaeolithic combustion structures may be linked to mechanic post-depositional processes of higher impact than those detected here. Such directional behaviour might also be related to low heat impact if pTRM with low unblocking temperatures are detected and the macroscopic evidence of heating is ambiguous.

5. Conclusions

The following conclusions can be obtained from our study of five experimental combustion structures:

- Combustion structures must be analysed in terms of type of substrate and facies to fully understand the final magnetic outcome.
- Ashes show the highest concentration of ferromagnetic minerals followed by black layers (BL) and burnt carbonate crusts. The main magnetic carrier was pseudo-single domain (PSD) slightly substituted magnetite.
- In spite of the high concentration of ferromagnetic minerals in ashes and their good preservation in the cave entrance combustion structures, ashes are not the most suitable facies for archaeomagnetic directional analyses due to their propensity towards physical reworking, in contrast to more consolidated combustion substrate facies

- A decreasing pattern of NRM intensities and magnetic susceptibility was observed in black sedimentary layers and burnt carbonate crusts as a function of thermal impact.
- Most black layer and carbonate crust samples have systematically recorded pTRMs as a result of mild heating undergone by these facies in the field experiment. However, samples carrying a full TRM or TCRM were also detected. These different behaviours are consistent with the lateral and vertical variability of temperatures in this kind of structures, since the mechanism of magnetization is mainly controlled by the temperatures reached and the mineralogical or granulometric changes involved. Regardless of whether the mechanism is thermal or thermochemical, in both cases the directional record takes place in presence of the same field and thus it is reliable.
- When pTRMs are identified, the combination of NRM thermal demagnetization and partial thermomagnetic curves is a useful approach to estimate maximum last heating temperatures.
- High quality archaeomagnetic directions were obtained from BLs and burnt carbonate crusts of the open-air and cave entrance combustion structures respectively. The moderately compacted nature of the BLs and the lithified character of the burnt carbonate crusts favoured their *in situ* preservation.
- Generally, systematic deviations in directions were not larger than the uncertainty derived from stochastic dispersion.
- The thermally altered substrate of the combustion structure (excluding ashes) trampled for two weeks showed very good directional results and no significant distortion caused by that action.
- There is a correlation between well-preserved combustion structures and good archaeomagnetic results. The poorest results (multicomponent and erratic directional behaviours, low NRM intensities and k values ($k < 40$)), were obtained from combustion structures in which the thermal impact was unclear during their excavation or in which we know that the most heated part was lost. These results can be useful indicators of taphonomic alterations and/or low heat impact in similar archaeological combustion structures.
- The reheated combustion structure showed a good directional record. However, relightings cannot be distinguished if the last heating reached high temperatures to reset the previous magnetization and/or if the directions of the local Earth's magnetic field at the time of the heating(s)/cooling(s) are so similar as to be statistically differentiated.

Supporting information

S1 Text. Detailed description of the studied combustion structures.

(DOC)

S1 Fig. Pictures of the studied structures after the combustion. (A-B) NFT-9 (A: conditions immediately after the end of the combustion; B: conditions after the addition of burnt bone from other fire and after trampling), (C) NFT-18, (D) NFT-20, (E) NFT-33, (F) NFT-21, (G) NFT-22. In the cases of NFT-21 and NFT-22, as there are no pictures of that moment, the images included are the available photographs closest to the end of the combustion and post-combustion actions, taken around three months later.

(TIF)

S2 Fig. Examples of specimens from the hearth NFT-20-33, showing the different facies observed.

(TIF)

S3 Fig. Detail of a block from NFT-21, showing the presence of oncolites. A colour degradation pattern from the top (most heated, upper part of the image) to the bottom (less heated, lower part of the image) can be observed

(TIF)

S4 Fig. Vegetation grown over the area where open-air combustion structures were carried out.

(TIF)

S5 Fig. Location of the oriented hand-blocks within each hearth. (A) NFT-9, (B) NFT-18, (C) NFT20-33, (D) NFT-21, (E) NFT-22. The orange/white transversal cord indicates approximately the middle of the hearth and the stars mark the location of the hand blocks for archaeomagnetism.

(TIF)

Acknowledgments

Special thanks to all the people who contributed to the making and excavation of the experimental fires and to Pablo Calvin who contributed valuable comments to improve earlier versions of the manuscript.

Author Contributions

Conceptualization: Ángel Carrancho, Juan José Villalaín.

Formal analysis: Ángela Herrejón Lagunilla, Ángel Carrancho, Juan José Villalaín.

Funding acquisition: Ángel Carrancho, Juan José Villalaín, Carolina Mallol, Cristo Manuel Hernández.

Investigation: Ángela Herrejón Lagunilla.

Methodology: Ángela Herrejón Lagunilla, Ángel Carrancho, Juan José Villalaín.

Project administration: Ángel Carrancho, Juan José Villalaín, Carolina Mallol, Cristo Manuel Hernández.

Supervision: Ángel Carrancho, Juan José Villalaín, Carolina Mallol, Cristo Manuel Hernández.

Writing – original draft: Ángela Herrejón Lagunilla.

Writing – review & editing: Ángela Herrejón Lagunilla, Ángel Carrancho, Juan José Villalaín, Carolina Mallol, Cristo Manuel Hernández.

References

1. Mallol C, Henry A. Ethnoarchaeology of Paleolithic Fire: Methodological Considerations. *Curr Anthropol*. 2017; 58(S16):S217–29.
2. Aldeias V. Experimental Approaches to Archaeological Fire Features and Their Behavioral Relevance. *Curr Anthropol*. 2017; 58(S16):S191–205.
3. Goldberg P, Dibble H, Berna F, Sandgathe D, McPherron SJP, Turq A. New evidence on Neandertal use of fire: Examples from Roc de Marsal and Pech de l'Azé IV. *Quat Int*. 2012; 247:325–40.

4. Goldberg P, Miller CE, Mentzer SM. Recognizing Fire in the Paleolithic Archaeological Record. *Curr Anthropol*. 2017; 58(S16):S175–90.
5. Karkanas P, Shahack-Gross R, Ayalon A, Bar-Matthews M, Barkai R, Frumkin A, et al. Evidence for habitual use of fire at the end of the Lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, Israel. *J Hum Evol*. 2007; 53(2):197–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2007.04.002> PMID: 17572475
6. Meignen L, Goldberg P, Bar-Yosef O. The Hearths at Kebara Cave and Their Role in Site Formation Processes. In: Bar-Yosef O, editor. *Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: The Middle and Upper Paleolithic Archaeology, Part I*. American School of Prehistoric Research, Peabody Museum, Harvard University Press; 2007. p. 90–122.
7. Morley MW, Goldberg P, Sutikna T, Tocheri MW, Prinsloo LC, Jatmiko, et al. Initial micromorphological results from Liang Bua, Flores (Indonesia): Site formation processes and hominin activities at the type locality of *Homo floresiensis*. *J Archaeol Sci*. 2017; 77:125–42.
8. Nakazawa Y, Straus LG, González-Morales MR, Solana DC, Saiz JC. On stone-boiling technology in the Upper Paleolithic: behavioral implications from an Early Magdalenian hearth in El Mirón Cave, Cantabria, Spain. *J Archaeol Sci*. 2009; 36(3):684–93.
9. Rodríguez-Cintas Á, Cabanes D. Phytolith and FTIR studies applied to combustion structures: The case of the Middle Paleolithic site of El Salt (Alcoy, Alicante). *Quat Int*. 2017; 431(A):16–26.
10. Shahack-Gross R, Berna F, Karkanas P, Lemorini C, Gopher A, Barkai R. Evidence for the repeated use of a central hearth at Middle Pleistocene (300ky ago) Qesem Cave, Israel. *J Archaeol Sci*. 2014; 44(1):12–21.
11. Théry-Parisot I, Costamagno S, Brugal JP, Fosse P, Guillbert R. The use of bone as fuel during the palaeolithic, experimental study of bone combustible properties. In: Mulville J, Outram AK, editors. *Proceedings of the 9th Conference of the International Council of Archaeozoology*, Durham, August 2002. Oxbow Books; 2002. p. 50–9.
12. Vidal-Matutano P, Blasco R, Sañudo P, Fernández Peris J. The Anthropogenic Use of Firewood During the European Middle Pleistocene: Charcoal Evidence from Levels XIII and XI of Bolomor Cave, Eastern Iberia (230–160 ka). *Environ Archaeol*. 2017;1–16.
13. Alperson-Afil N, Richter D, Goren-Inbar N. Phantom Hearths and the Use of Fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel. *PaleoAnthropology*. 2007;1–15.
14. Vidal-Matutano P, Henry A, Théry-Parisot I. Dead wood gathering among Neanderthal groups: Charcoal evidence from Abric del Pastor and El Salt (Eastern Iberia). *J Archaeol Sci*. 2017; 80:109–21.
15. Vidal-Matutano P, Hernández CM, Galván B, Mallol C. Neanderthal firewood management: Evidence from Stratigraphic Unit IV of Abric del Pastor (Eastern Iberia). *Quat Sci Rev*. 2015; 111:81–93.
16. Zhang Y, Guo Z, Deng C, Zhang S, Wu H, Zhang C, et al. The use of fire at Zhoukoudian: evidence from magnetic susceptibility and color measurements. *Chinese Sci Bull*. 2014; 59(10):1013–20.
17. White R, Mensan R, Clark AE, Tartar E, Marquer L, Bourrillon R, et al. Technologies for the Control of Heat and Light in the Vézère Valley Aurignacian. *Curr Anthropol*. 2017; 58(S16):S288–302.
18. Wroth K, Cabanes D, Marston JM, Aldeias V, Sandgathe D, Turq A, et al. Neanderthal plant use and pyrotechnology: phytolith analysis from Roc de Marsal, France. *Archaeol Anthropol Sci*. 2019;
19. Alperson-Afil N. Continual fire-making by Hominins at Gesher Benot Ya'aqov, Israel. *Quat Sci Rev*. 2008; 27(17–18):1733–9.
20. Bentsen SE. Using Pyrotechnology: Fire-related Features and Activities with a Focus on the African Middle Stone Age. *J Archaeol Res*. 2014; 22(2):141–75.
21. Berna F, Goldberg P, Horwitz LK, Brink J, Holt S, Bamford M, et al. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proc Natl Acad Sci*. 2012; 109(20):E1215–20. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117620109> PMID: 22474385
22. Berna F, Goldberg P. Assessing Paleolithic pyrotechnology and associated hominin behavior in Israel. *Isr J Earth Sci*. 2007; 56(2):107–21.
23. Brown KS, Marean CW, Herries AIR, Jacobs Z, Tribolo C, Braun D, et al. Fire as an engineering tool of Early Modern Humans. *Science* (80-). 2009; 325(5942):859–62. <https://doi.org/10.1126/science.1175028> PMID: 19679810
24. Buonasera T, Herrera-Herrera AV., Mallol C. Experimentally Derived Sedimentary, Molecular, and Isotopic Characteristics of Bone-Fueled Hearths. *J Archaeol Method Theory*. 2019;
25. Goldberg P, Miller CE, Schiegl S, Ligouis B, Berna F, Conard NJ, et al. Bedding, hearths, and site maintenance in the Middle Stone Age of Sibudu Cave, KwaZulu-Natal, South Africa. *Archaeol Anthropol Sci*. 2009; 1(2):95–122.
26. Gowlett JAJ, Wrangham RW. Earliest fire in Africa: Towards the convergence of archaeological evidence and the cooking hypothesis. *Azania Archaeol Res Africa*. 2013; 48(1):5–30.

27. Mentzer SM. Microarchaeological Approaches to the Identification and Interpretation of Combustion Features in Prehistoric Archaeological Sites. *J Archaeol Method Theory*. 2014; 21(3):616–68.
28. Roebroeks W, Villa P. On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe. *Proc Natl Acad Sci*. 2011; 108(13):5209–14. <https://doi.org/10.1073/pnas.1018116108> PMID: 21402905
29. Sandgathe DM, Berna F. Fire and the Genus Homo: An Introduction to Supplement 16. *Curr Anthropol*. 2017; 58(S16):S165–74.
30. Carrancho Á, Villalain JJ, Vergés JM, Vallverdú J. Assessing post-depositional processes in archaeological cave fires through the analysis of archaeomagnetic vectors. *Quat Int*. 2012; 275:14–22.
31. Friesem DE, Zaidner Y, Shahack-Gross R. Formation processes and combustion features at the lower layers of the middle palaeolithic open-air site of neshet ramla, Israel. *Quat Int*. 2014; 331:128–38.
32. Mallol C, Hernández CM, Cabanes D, Sistiaga A, Machado J, Rodríguez Á, et al. The black layer of Middle Palaeolithic combustion structures. Interpretation and archaeostratigraphic implications. *J Archaeol Sci*. 2013; 40(5):2515–37.
33. Schiegl S, Goldberg P, Bar-Yosef O, Weiner S. Ash Deposits in Hayonim and Kebara Caves, Israel: Macroscopic, Microscopic and Mineralogical Observations, and their Archaeological Implications. *J Archaeol Sci*. 1996; 23(5):763–81.
34. Mallol C, Hernández C. Advances in palimpsest dissection. *Quat Int*. 2016; 417:1–2.
35. Carrancho Á, Villalain JJ, Vallverdú J, Carbonell E. Is it possible to identify temporal differences among combustion features in Middle Palaeolithic palimpsests? The archaeomagnetic evidence: A case study from level O at the Abric Roman?? rock-shelter (Capellades, Spain). *Quat Int*. 2016; 417:39–50.
36. Leierer L, Jambriña-Enríquez M, Herrera-Herrera A V., Connolly R, Hernández CM, Galván B, et al. Insights into Neanderthal group mobility from the geoarchaeological study of combustion structures: A micromorphological and biomarker investigation of El Salt, unit Xb, Alcoy, Spain.
37. Gur-Arieh S, Boaretto E, Maeir A, Shahack-Gross R. Formation processes in Philistine hearths from Tell es-Safi/Gath (Israel): An experimental approach. *J F Archaeol*. 2012; 37(2):121–31.
38. Henry A, Théry-Parisot I. From Evenk campfires to prehistoric hearths: Charcoal analysis as a tool for identifying the use of rotten wood as fuel. *J Archaeol Sci*. 2014; 52:321–36.
39. Lacanette D, Mindeguia JC, Brodard A, Ferrier C, Guibert P, Leblanc JC, et al. Simulation of an experimental fire in an underground limestone quarry for the study of Paleolithic fires. *Int J Therm Sci*. 2017; 120:1–18.
40. Lebon M. Characterization of burnt bones in archaeological context: a comparative study of modern and fossil material by infrared spectroscopy. In: Théry-Parisot I, Chabal L, Costamagno S, editors. *The Taphonomy of burned organic residues and combustion features in archaeological contexts*. *Palethnology*; 2010. p. 145–58.
41. Liedgren L, Hörnberg G, Magnusson T, Östlund L. Heat impact and soil colors beneath hearths in northern Sweden. *J Archaeol Sci*. 2017; 79:62–72.
42. Miller CE, Sievers C. An experimental micromorphological investigation of bedding construction in the Middle Stone Age of Sibudu, South Africa. *J Archaeol Sci*. 2012; 39(10):3039–51.
43. Miller CE, Conard NJ, Goldberg P, Berna F. Dumping, sweeping and trampling: Experimental micromorphological analysis of anthropogenically modified combustion features. *P@lethnologie*. 2010; 2:25–37.
44. Mallol C, Hernández CM, Cabanes D, Machado J, Sistiaga A, Pérez L, et al. Human actions performed on simple combustion structures: An experimental approach to the study of Middle Palaeolithic fire. *Quat Int*. 2013; 315:3–15.
45. Sievers C, Wadley L. Going underground: experimental carbonization of fruiting structures under hearths. *J Archaeol Sci*. 2008; 35(11):2909–17.
46. Théry-Parisot I, Chabal L. From wood to charcoal: an experimental approach to combustion. In: Théry-Parisot I, Chabal L, Costamagno S, editors. *The Taphonomy of burned organic residues and combustion features in archaeological contexts*. *Palethnology*; 2010. p. 79–91.
47. Vergés JM, Burguet-Coca A, Allué E, Expósito I, Guardiola M, Martín P, et al. The Mas del Pepet experimental programme for the study of prehistoric livestock practices: Preliminary data from dung burning. *Quat Int*. 2016; 414:304–15.
48. Albert RM, Cabanes D. Fire in prehistory: An experimental approach to combustion processes and phytolith remains. *Isr J Earth Sci*. 2007; 56(2–4):175–89.
49. Backhouse PN, Johnson E. Where were the hearths: an experimental investigation of the archaeological signature of prehistoric fire technology in the alluvial gravels of the Southern Plains. *J Archaeol Sci*. 2007; 34(9):1367–78.

50. Bentsen SE. Size matters: Preliminary results from an experimental approach to interpret Middle Stone Age hearths. *Quat Int.* 2012; 270:95–102.
51. Bentsen SE. Controlling the heat: an experimental approach to Middle Stone Age Pyrotechnology. *South African Archaeol Bull.* 2013; 68:137–45.
52. Braadbaart F, Poole I, Huisman HDJ, van Os B. Fuel, Fire and Heat: an experimental approach to highlight the potential of studying ash and char remains from archaeological contexts. *J Archaeol Sci.* 2012; 39(4):836–47.
53. Brodard A, Lacanette-Puyo D, Guibert P, Lévêque F, Burens A, Carozza L. A new process of reconstructing archaeological fires from their impact on sediment: a coupled experimental and numerical approach based on the case study of hearths from the cave of Les Fraux (Dordogne, France). *Archaeol Anthropol Sci.* 2016; 8(4):673–87.
54. Brodard A, Guibert P, Lévêque F, Mathé V, Carozza L, Burens A. Thermal characterization of ancient hearths from the cave of Les Fraux (Dordogne, France) by thermoluminescence and magnetic susceptibility measurements. *Quat Geochronol.* 2012; 10:353–8.
55. Carrancho A, Herrejón Lagunilla Á, Vergès JM. Three archaeomagnetic applications of archaeological interest to the study of burnt anthropogenic cave sediments. *Quat Int.* 2016; 414:244–57.
56. Clemente-Conte I. Thermal alterations of flint implements and the conservation of microwear polish: preliminary experimental observations. In: Ramos-Millán A, Bustillo MA, editors. *Siliceous Rocks and Culture*. Granada: Universidad de Granada; 1997. p. 525–35.
57. Asmussen B. Intentional or incidental thermal modification? Analysing site occupation via burned bone. *J Archaeol Sci.* 2009; 36(2):528–36.
58. Castillo RF, Ubelaker DH, Acosta JAL, de la Fuente GAC. Effects of temperature on bone tissue. Histological study of the changes in the bone matrix. *Forensic Sci Int.* 2013; 226(1–3):33–7. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.11.012> PMID: 23287528
59. Ellingham STD, Thompson TJU, Islam M, Taylor G. Estimating temperature exposure of burnt bone—A methodological review. *Sci Justice.* 2015; 55(3):181–8. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2014.12.002> PMID: 25934370
60. Shipman P, Foster G, Schoeninger M. Burnt bones and teeth: an experimental study of color, morphology, crystal structure and shrinkage. *J Archaeol Sci.* 1984; 11(4):307–25.
61. Brain CK, Sillen A. Evidence from the Swartkrans cave for the earliest use of fire. *Nature.* 1988; 336(6198):464–6.
62. Werts SP, Jahren AH. Estimation of temperatures beneath archaeological campfires using carbon stable isotope composition of soil organic matter. *J Archaeol Sci.* 2007; 34(6):850–7.
63. Hroudá F, Müller P, Hanák J. Repeated progressive heating in susceptibility vs. temperature investigation; a new palaeotemperature indicator? *Phys Chem Earth.* 2003; 28(16–19):653–7.
64. Linford N, Platzman E. Estimating the approximate firing temperature of burnt archaeological sediments through an unmixing algorithm applied to hysteresis data. *Phys Earth Planet Inter.* 2004; 147(2–3):197–207.
65. Spassov S, Hus J. Estimating baking temperatures in a Roman pottery kiln by rock magnetic properties: implications of thermochemical alteration on archaeointensity determinations. *Geophys J Int.* 2006; 167(2):592–604.
66. Berna F, Behar A, Shahack-Gross R, Berg J, Boaretto E, Gilboa A, et al. Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in Late Bronze and Iron Age Strata at Tel Dor (Israel). *J Archaeol Sci.* 2007; 34:358–73.
67. Spencer JQ, Sanderson DCW. Mapping thermal exposure by luminescence thermometry. *Radiat Meas.* 1994; 23(2–3):465–8.
68. Valladas H. Investigation of thermoluminescence of burnt sandstones from prehistoric sites. *Nucl Instrum Methods.* 1980; 175(1):230–2.
69. Wadley L. Some combustion features at Sibudu, South Africa, between 65,000 and 58,000 years ago. *Quat Int.* 2012; 247:341–9.
70. Aldeias V, Dibble HL, Sandgathe D, Goldberg P, McPherron SJP. How heat alters underlying deposits and implications for archaeological fire features: A controlled experiment. *J Archaeol Sci.* 2016; 67:64–79.
71. Bellomo R V. A methodological approach for identifying archaeological evidence of fire resulting from human activities. *J Archaeol Sci.* 1993; 20(5):525–53.
72. Beatrice C, Coisson M, Ferrara E, Olivetti ES. Relevance of magnetic properties for the characterisation of burnt clays and archaeological tiles. *Phys Chem Earth.* 2008; 33(6–7):458–64.

73. McClean RG, Kean WF. Contributions of wood ash magnetism to archaeomagnetic properties of fire pits and hearths. *Earth Planet Sci Lett.* 1993; 119(3):387–94.
74. Peters C, Church MJ, Mitchell C. Investigation of fire ash residues using mineral magnetism. *Archaeol Prospect.* 2001; 8(4):227–37.
75. Calvo-Rathert M, Carrancho Á, Stark F, Villalain JJ, Hill M. Are burnt sediments reliable recorders of geomagnetic field strength? *Quat Res.* 2012; 77(2):326–30.
76. Carrancho Á, Villalain JJ. Different mechanisms of magnetisation recorded in experimental fires: Archaeomagnetic implications. *Earth Planet Sci Lett.* 2011; 312(1–2):176–87.
77. Hathaway JH. Determining the Source of Remanence in Archaeological Soils: A Microscopic Study of Heated and Unheated Soils. In: Eighmy JL, Sternberg RS, editors. *Archaeomagnetic Dating.* Tucson: University of Arizona Press; 1990. p. 178–94.
78. Hathaway JH. Firing temperature and Time as Variables Affecting the Quality of Archaeomagnetic Results. In: Eighmy JL, Sternberg RS, editors. *Archaeomagnetic Dating.* Tucson: University of Arizona Press; 1990. p. 158–67.
79. Gose WA. Palaeomagnetic Studies of Burned Rocks. *J Archaeol Sci.* 2000; 27(5):409–21.
80. Ozán IL, Orgeira MJ, Vázquez C, Naselli M. Magnetic Alteration of Soils by Late Holocene Hunter–Gatherer Groups (Tierra Del Fuego, South America). *Archaeometry.* 2017; 59(6):1135–49.
81. Tema E, Ferrara E. Magnetic measurements as indicator of the equivalent firing temperature of ancient baked clays: New results, limits and cautions. *J Cult Herit.* 2019; 35:64–75.
82. Chadima M, Hrouda F. Remasoft 3.0—a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer. *Trav Géophysiques.* 2006; XXVII:20–1.
83. Thébaud E, Finlay CC, Beggan CD, Alken P, Aubert J, Barrois O, et al. International geomagnetic reference field: The 12th generation. *Earth, Planets Sp.* 2015; 67:79.
84. Stacey FD. The Koenigsberger ratio and the nature of thermoremanence in igneous rocks. *Earth Planet Sci Lett.* 1967; 2:67–8.
85. Day R, Fuller M, Schmidt VA. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Phys Earth Planet Inter.* 1977; 13:260–7.
86. Dunlop DJ. Theory and application of the Day plot (M_{rs} / M_s versus H_{cr} / H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J Geophys Res.* 2002; 107(B3):1–22.
87. Leonhardt R. Analyzing rock magnetic measurements: The RockMagAnalyzer 1.0 software. *Comput Geosci.* 2006; 32(9):1420–31.
88. Carrancho Á, Villalain JJ, Angelucci DE, Dekkers MJ, Vallverdú J, Vergés JM. Rock-magnetic analyses as a tool to investigate archaeological fired sediments: A case study of Mirador cave (Sierra de Atapuerca, Spain). *Geophys J Int.* 2009; 179(1):79–96.
89. Kapper KL, Donadini F, Mauvilly M, Panovska S, Hirt AM. New directional archaeomagnetic data of burned cave sediments from Switzerland and geomagnetic field variations in Central Europe. *Geophys J Int.* 2014; 198(2):1208–21.
90. Dunlop DJ, Özdemir Ö. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers.* New York: Cambridge University Press; 1997.
91. Canti MG, Linford N. The Effects of Fire on Archaeological Soils and Sediments: Temperature and Colour Relationships. In: *Proceedings of the Prehistoric Society.* 2000. p. 385–95.
92. Kostadinova-Avramova M, Kovacheva M. The magnetic properties of baked clays and their implications for past geomagnetic field intensity determinations. *Geophys J Int.* 2013; 195(3):1534–50.
93. Smith GP. Cube Size and Refiring as Factors that Influence Archaeomagnetic Results. In: Eighmy JL, Sternberg RS, editors. *Archaeomagnetic Dating.* Tucson: University of Arizona Press; 1990. p. 148–57.

