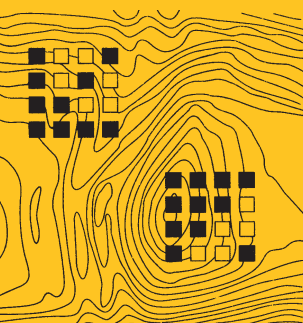


Año 2022. urtea

N.º 34. zk.



# TRABAJOS DE ARQUEOLOGÍA NAVARRA

SEPARATA

---

## Metalurgia de la Edad del Bronce en las Bardenas Reales (Navarra). Análisis de materiales y primera aproximación experimental

Alberto Obón Zúñiga, Héctor Conget Vicente, Andrés García-Arilla Oliver

---

# Sumario / Aurkibidea

## Trabajos de Arqueología Navarra

Año 2022. urtea - N.º 34. zk.

### ARTÍCULOS / ARTIKULUAK

<b>Metalurgia de la Edad del Bronce en las Bardenas Reales (Navarra). Análisis de materiales y primera aproximación experimental</b> Alberto Obón Zúñiga, Héctor Conget Vicente, Andrés García-Arilla Oliver	13
<b>Actuación arqueológica en el Cerro del Romero <i>Kaiskata/Cascantum</i> (Cascante, Navarra)</b> Marta Gómara Miramón, Ángel Santos Horneros, Óscar Bonilla Santander, Miriam Pérez Aranda	47

### NOTICIAS / BERRIAK

<b>Intervención arqueológica en el yacimiento de Resa (Andosilla)</b> Josu Narbarte, Mattin Aiestaran, Aitor Pescador, Eneko Iriarte, Oihane Mendizabal Sandonís, Euken Alonso, Carlos García, Juantxo Agirre Mauleon	69
<b>Prospección de cuevas en el valle del Araxes (Araitz-Betelu, Navarra). Campaña de 2022</b> Jesus Tapia Sagarna	77
<b>Arqueología en el yacimiento de Irulegi (Valle de Aranguren) 2022</b> Mattin Aiestaran, Daniel Ruiz-Gonzalez, Eneko Iriarte, Jesús Sesma, Jesús García, Jose Antonio Mujika-Alustiza, Juantxo Agirre-Mauleon	91
<b>Artziko aztarnategia (Artzibar/valle de Arce): 2022. urteko kanpainako emaitzen laburpena</b> Oihane Mendizabal Sandonís, Eder Martinez de Miguel, Juan Mari Martinez Txoperena, Rafa Zubiria Mujika, Javier Uriz Monaut, Ekhine Gartzia Gartzia, Juantxo Agirre Mauleon	99
<b>Cerco de Artajona. Actuaciones en el frente norte en 2022</b> Nicolás Zuazúa Wegener, Carlos Zuza Astiz	107
<b>II campaña arqueológica. Ermita de San Cristóbal (concejo de Artica 2022)</b> Iñaki Sagredo Garde, Jon Sagredo Alonso, Julen Azkona	115

# Sumario / Aurkibidea

<b>Zalduako aztarnategia (Auritz/Burguete): 2022. urteko kanpainako emaitzen laburpena</b> Oihane Mendizabal Sandonís, Leire Arana Ojanguren, Eder Martinez de Miguel, Juan Mari Martinez Txoperena, Rafa Zubiria Mujika, Ekhine Gartzia Gartzia, Juantxo Agirre Mauleon	123
<b>Pueblo Viejo de Caparroso, campaña de 2022</b> Carlos Zuza Astiz, Nicolás Zuazúa Wegener	131
<b>Trabajos arqueológicos en <i>villa</i> romana de Picordero I (Cascante, Navarra). En las campañas de 2021 y 2022</b> Marta Gómara Miramón, Óscar Bonilla Santander, Ángel Santos Horneros, Miriam Pérez Aranda, Alicia María Izquierdo	139
<b>IV campaña de excavación en el yacimiento romano de «El Plantío» de Corella (Navarra). 2022</b> Juan José Bienes Calvo, Óscar Sola Torres	149
<b>El foro de la ciudad romana de Santa Criz de Eslava: sondeos de 2022</b> Paloma Lorente Sebastián, Luis Romero Novella, Luka García de la Barrera	157
<b>2022. Real fundición de municiones de Eugi: la energía del agua</b> Francisco Labé Valenzuela, Ana Carmen Sánchez Delgado	165
<b>I Campaña arqueológica. Castillo de Funes</b> Iñaki Sagredo Garde, Julen Azcona, Jon Sagredo Alonso	171
<b>IV Campaña en Larraga. Consolidación y puesta en valor del yacimiento</b> Iñaki Sagredo Garde, Jon Sagredo Garde, Julen Azkona	179
<b>Prospección arqueológica de las cuevas del valle de Larraun (Navarra), campaña 2022</b> Jesus Tapia Sagarna	191
<b>Torre de San Gregorio (Lumbier). 2022. II campaña de excavaciones</b> Francisco Labé Valenzuela	201
<b>Metodología de la documentación y reconstrucción 3D del patrimonio arqueológico: el caso de El Castillar (Mendavia)</b> Leyre Arróniz Pamplona, Daniel Pérez Legido, Xavier Bayer Rodríguez, Clara Calvo Hernández, Héctor J. Fonseca de la Torre	209
<b>Consolidación del aljibe de Garaño y otras estructuras. Campaña 2022</b> Iñaki Sagredo Garde, Jon Sagredo Alonso, Julen Azkona	217
<b>Ermita de la Virgen del Pero (Peralta / Azkoien). Campaña arqueológica del 2022</b> Nerea Soto Úriz, Rosario Mateo Pérez	229
<b>Intervención arqueológica en la necrópolis islámica de Ribaforada (Navarra), campaña 2022. (Excavación en calle Príncipe de Viana, 18-20)</b> Óscar Sola Torres, Nerea Soto Úriz	237

# Sumario / Aurkibidea

<b>Castillo de Santacara, campañas de 2022</b> Nicolás Zuazúa Wegener, Carlos Zuza Astiz, Imanol Martínez Santamaría	243
<b>Investigación y puesta en valor del castillo de Guerga. Unzué/Untzue. Año 2022</b> Iñaki Sagredo Garde, Jon Sagredo Alonso, Julen Azkona	253
<b>Excavación arqueológica en el castillo de Valtierra. Campaña 2022</b> Juan José Bienes Calvo, Óscar Sola Torres, Jesús Lorenzo Jiménez	267
<b>Investigación arqueológica del yacimiento La Custodia (Viana). Campaña de 2022</b> Javier Armendáriz Martija	275
Normas para la presentación de originales / Idazlanak aurkezteko arauak / Rules for the submission of originals	287



# Metalurgia de la Edad del Bronce en las Bardenas Reales (Navarra). Análisis de materiales y primera aproximación experimental

---

Brontze Aroko metalurgia Errege Bardean (Nafarroa). Materialen analisis eta lehen hurbilketa esperimentalta

---

Bronze Age metallurgy from Bardenas Reales (Navarra, Spain). Materials analysis and experimental approach

Alberto Obón Zúñiga  
Investigador independiente  
albertoobon@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-3296-7163>

Héctor Conget Vicente  
Arqueología y Didáctica, Start Up Universidad de Zaragoza  
hconget@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0577-2283>

Andrés García-Arilla Oliver  
Arqueología y Didáctica, Start Up Universidad de Zaragoza  
garciarilla@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-6442-8618>

DOI: <https://doi.org/10.35462/tan34.1>

Agradecemos a D. Isidro Aguilera, director del Museo provincial de Zaragoza, y a D. Jesús Sesma de Dirección General de Cultura del Gobierno de Navarra, por haber facilitado el acceso a los materiales arqueológicos de Bardenas Reales y Moncín respectivamente, así como a D. Abel Berdejo y D. Alejandro Asín por su participación en las jornadas de experimentación, y al Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI de la Universidad de Zaragoza por su colaboración.

Recepción de original: 24/05/2022. Aceptación provisional: 09/09/2022. Aceptación definitiva: 04/10/2022.

## RESUMEN

Se exponen las posibilidades de abastecimiento de minerales cupríferos en el contexto de adopción de la aleación de bronce. Una serie de análisis por XRD a minerales y materiales experimentales sugieren el uso de mineralizaciones próximas. Se describen las evidencias de producción metalúrgica en el valle medio del Ebro pertenecientes a la primera mitad del II milenio cal. a. C., con nuevos análisis microestructurales por FESEM-EDS a capas escoriificadas en superficies cerámicas. Se realiza otra serie experimental sobre la técnica de obtención de bronce que confirma el uso de casiterita y de cerámica elaborada con arcillas locales.

**Palabras clave:** Valle medio del Ebro; Bardenas Reales; arqueometalurgia; microscopio electrónico de barrido de emisión de campo-detector de energía dispersiva de rayos X (FESEM-EDS); fluorescencia de rayos X (XRF); difracción de rayos X (XRD).

## LABURPENA

Brontze-aleazioa hedatzen ari zela, mineral kobredunak hornitzeko aukerak azaltzen dira. XRD bidezko analisiak egin zaizkie mineralei eta material esperimentalei, eta emaitzek iradokitzen dute hurbileko mineralizazioak erabiltzen zirela. Ebroko Erdialdeko ekoizpen metalurgikoaren ebidentziak deskribatzen dira, K.a. II. milurtekoko lehen erdikoak (kal.); FESEM-EDS bidez mikroegitura-analisi berriak egin zaizkie gainazal zeramikoetan zepatutako geruzei. Beste serie esperimental bat egiten da brontzea lortzeko teknikari buruz, eta horrek kasiteritaren eta tokiko buztinez egindako zeramikaren erabilera berresten du.

**Gako hitzak:** Ebro Erdialdea; Errege Bardea; arkeometalurgia; eremu igorpendun ekortze mikroskopio elektronikoa-X izpien energia barreiakorraren detektagailua (FESEM-EDS); X izpien fluoreszentsia (XRF); X izpien difrakzioa (XRD).

## ABSTRACT

The authors present the potencial copper ore supply sources in the region in the context of the adoption of the copper-tin alloy. A series of XRD analyses put against the results of a first experiment suggests probable use of close-range ores. Evidence for metallurgical activity within the mid-Ebro Basin belonging to the first half of the 2nd millennium BC are reported as well, in addition to new microstructural analyses of slag layers from crucible sherd surfaces (FESEM-EDS). A second experimental series focused on the copper-tin alloying technique confirms the use of cassiterite and ceramic pastes within the region.

**Keywords:** Middle Ebro Valley; The Bardenas Reales; Archaeometallurgy; field emission scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (FESEM-EDS); X-ray fluorescence (XRF); X-ray Diffraction (XRD).

1. INTRODUCCIÓN. 2. METODOLOGÍA. 2.1. Experimentación realista. 2.2. Revisión de materiales arqueometalúrgicos y técnicas de análisis. 3. POSIBILIDADES DE CAPTACIÓN DE MINERALES. 3.1. Mineralizaciones de cobre. 3.2. Mineralizaciones de estaño. 4. EVIDENCIAS DE PRODUCCIÓN DE BRONCE EN EL VALLE MEDIO DEL EBRO EN LA PRIMERA MITAD DEL SEGUNDO MILENIO A. C. 4.1. Bardenas Reales. 4.2. Valle del Huecha. 5. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN. 5.1. Serie 1. Pruebas de reducción de minerales locales. 5.2. Serie 2. Pruebas sobre la técnica de obtención de bronce. 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES. 7. LISTA DE REFERENCIAS. 8. ANEXO.

## 1. INTRODUCCIÓN

La procedencia de la materia prima y las posibles técnicas utilizadas para producir la aleación de bronce a partir de los minerales son aspectos tecnológicos todavía poco conocidos. En la península ibérica, parece haber una continuidad entre el Calcolítico y la Edad del Bronce en cuanto al modo de transformar minerales oxídicos para obtener metal, puesto que se ha identificado el uso de simples cubetas y de vasijas de reducción (Rovira, 2011). La primera evidencia de estaño metálico pertenece al Bronce Final (Llull et al., 2019), lo que sugiere que en los primeros períodos el bronce no se elaboraba a partir de la cofundición de estaño y cobre. Otra posibilidad descartada es el uso de especies minerales como la estannita, un sulfuro de cobre, hierro y estaño, o bien el uso de malaquita asociada a casiterita, que pueden dar lugar a bronce pobres por aleaciones accidentales similares a las del caso del cobre arsenical y los arseniatos de cobre (Obón et al., 2020). Pese a que estos minerales han sido identificados en contextos calcolíticos y

del Bronce Antiguo, como en Aldeagordillo (Ávila) o Villaviciosa de Odón (Madrid), la baja proporción (inferior al 2%) o ausencia de estaño en las gotas metálicas y objetos de esos yacimientos no permite defender la voluntariedad (Rovira & Montero 2003). Los porcentajes son mayores en el caso de la Bauma del Serrat del Pont (Girona) en contexto campaniforme datado en la primera mitad del III mil cal. a. C., donde destacan los hallazgos de una capa de escoria en cerámica con el 4,6% de estaño, y un resto de fundición y una punta de flecha con más del 7%, aunque también han sido interpretados como restos de una aleación accidental por el uso de minerales de cobre y estaño (Alcalde et al., 1998, p. 96). La explotación de estas mineralizaciones locales se ha confirmado mediante isótopos de plomo (Montes-Landa et al., 2021).

Según la principal hipótesis sobre el proceso y el ritmo de adopción, la aleación se difundiría por Europa a finales del III milenio cal. a. C., probablemente desde los Balcanes, alcanzando la península ibérica durante las

primeras centurias del II milenio cal. a. C. (Fernández-Miranda et al., 1995; Rovira, 2011). Como referíamos, en el noreste de la península ibérica, los restos arqueometalúrgicos pertenecientes al Bronce Antiguo epicampaniforme de la Bauma del Serrat del Pont (Tortellá, Girona), un resto de fundición y un punzón, ambos con abundante estaño, en un nivel datado en la segunda mitad del III mil cal. a. C. (Alcalde et al., 1998), y los restos de Minferri (Juneda, Lleida) datados en 2000-1800 cal. a. C., entre los cuales hay varios fragmentos de cerámica con escorificaciones de sales de cobre y estaño (Soriano & Escanilla, 2016), han sido considerados la prueba de la entrada de la aleación a través del sureste de Francia, constituyendo

las evidencias más antiguas de producción de bronce en la península ibérica. En el valle medio del Ebro, territorio en el que se centra este estudio (fig. 1), la aleación de cobre y estaño se difunde también a comienzos del II milenio cal. a. C. en las Bardenas Reales a partir de un nivel de Monte Aguilar datado en 1890-1750 cal. a. C. (Sesma & García, 1994), y en el valle del Huecha entre el 2000-1700 cal. a. C. en Moncín (Borja, Zaragoza), asociada a cerámica campaniforme y epicampaniforme (Aguilera, 2022, p. 292).

El estudio del origen de la aleación de bronce supone abordar la problemática del abastecimiento, uso y función del estaño. El principal

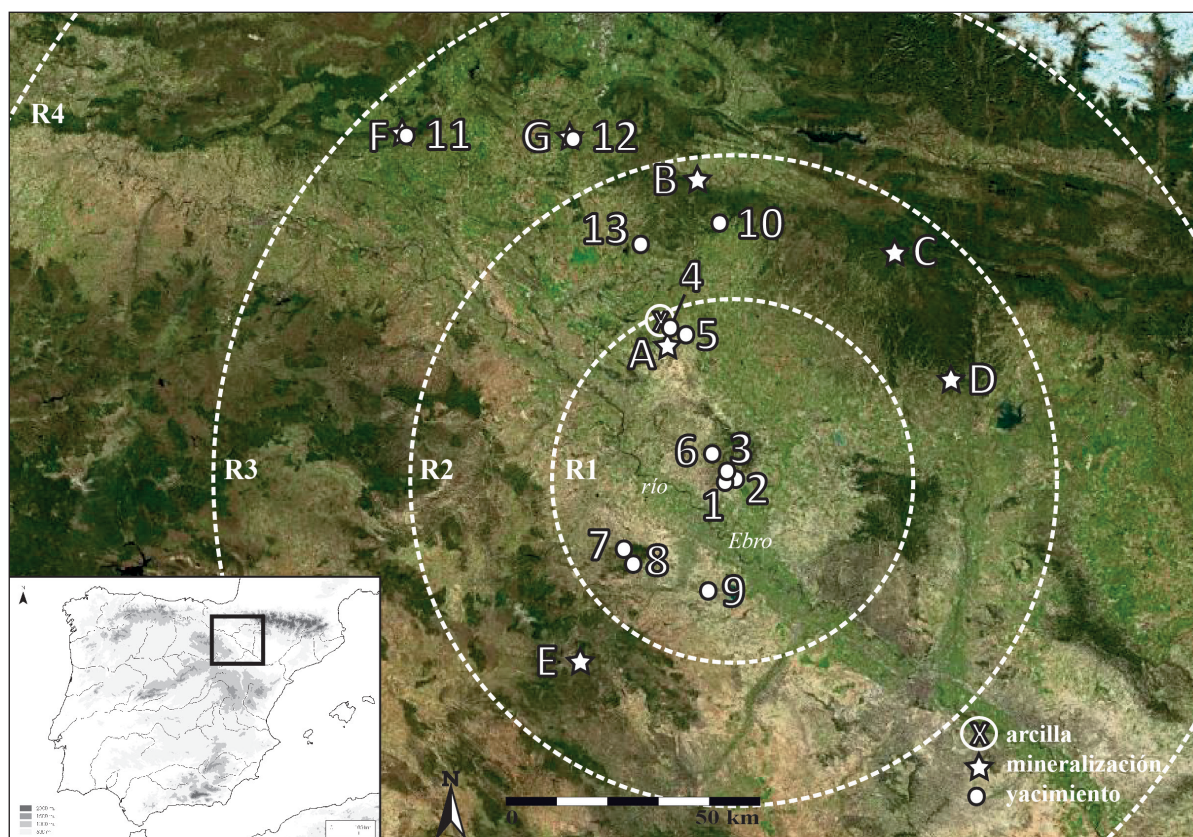


Figura 1. Mapa. Radio de las circunferencias: R1: 30 km; R2: 60 km; R3: 100 km; R4: + de 100 km. Yacimientos arqueológicos: 1: Valdenovillas II; 2: Monte Aguilar I y II; 3: El Abejar; 4: Gullizo de Abajo II; 5: Puy Águila I y II; 6: Portillo Lobo; 7: Majaladares; 8: Moncín; 9: Siete Cabezos; 10: Hallazgo hachas Cáseda; 11: Cueva de Urbiola; 12: Sepulcros megalíticos de Artajona; 13: Covaza. Mineralizaciones: A: El Cantalar; B: Gallipienzo; C: Biel; D: Casas de Esper; E: Barranco de Valdeplata (Calcena); F: Urbiola; G: Artajona.



mineral de estaño es la casiterita ( $\text{SnO}_2$ ). En la Edad del bronce pudo ser extraído a partir de pozos, galerías y trincheras que dieran con los filones, frecuentemente encajados en cuarzo. Sin embargo, la única explotación prehistórica conocida hasta el momento en la península ibérica está ubicada en el cerro de San Cristóbal de Logroán (Cáceres) y remite a fechas tardías, a partir del s. X cal. a. C. (Rodríguez et al., 2014). Otra posibilidad, recurrente en la bibliografía, aunque sin pruebas al respecto, es el uso de pequeños placeres aluviales de fácil acceso mediante la técnica del bateo.

A partir de este mineral, durante el Bronce Antiguo y Medio la aleación se obtendría mediante la correducción con minerales oxídicos de cobre o la cementación con cobre metálico. En los productos resultantes, además de los goterones de bronce que serán fundidos para crear los objetos, puede darse una gran variabilidad de fases mineralógicas según las oscilaciones de ambiente más o menos reductor y el contenido de impurezas y elementos minoritarios. Un estigma microestructural del uso de casiterita, que descarta que los restos procedan de operaciones de cofundición de cobre y estaño metálicos o de refundición de bronce, es la presencia de granos de casiterita sin transformar. Estos granos son diferentes a los cristales aciculares o rómbicos de  $\text{SnO}_2$  formados por la oxidación de estaño metálico, un fenómeno habitual debido a que el estaño se oxida fácilmente, y por lo tanto puede producirse en operaciones de reducción, correducción o cementación, así como de refundición de bronce o de cofundición de cobre y estaño (Dungworth, 2000; Rademakers & Farci, 2018). Si los cristales aciculares tienen un núcleo de cobre indican su formación a partir de metal fundido en momentos oxidantes en los que el estaño evita la oxidación del cobre. Otros indicadores del uso de casiterita son los elementos minoritarios asociados a la ganga (óxidos de titanio, hierro, tántalo o wolframio), además de gotas o nódulos de cobre o de bronce atrapados en la escoria y que sue-

len tener una cantidad de estaño muy variable (Farci et al., 2017, p. 341). También se pueden formar silicatos con estaño y calcio, detectados en muestras arqueológicas y experimentales (Rovira, 2011-2012).

La obtención de bronce por correducción puede ser la causa de la gran variabilidad de proporción de estaño que tienen los objetos. Esta técnica ha sido identificada en una muestra del yacimiento del Bronce Medio de Santa María de Matallana en Valladolid (Rovira, 2007; pp. 26-28), en el Bronce Final en Entre Aguas 5 en Portugal (Valerio et al., 2013) e incluso en la Edad del Hierro (Montes-Landa et al., 2020). La principal diferencia con la cementación es la presencia de restos de mineral de cobre, como por ejemplo cuprita que no ha llegado a reducir.

La experimentación en condiciones realistas puede generar materiales de contrastación que ayuden a identificar estas evidencias. Como hemos descrito en otra ocasión, en la bibliografía encontramos algunas experimentaciones de correducción de minerales de cobre y estaño (Gowland, 1912; Rostoker y Dvorak, 1991; Rovira, 2011-2012 en Obón 2017) y de cementación (Herdits et al., 1995; Lackinger, 2011; Rovira, 2011-2012 en *Ibíd.*), todas ellas experiencias aisladas y con diversos resultados. Recientemente, se ha publicado una nueva experimentación sobre las técnicas de aleación, aunque no aborda la cuestión de la correducción y se ha desarrollado en condiciones de laboratorio con cantidades mínimas de carga (Rademakers & Farci, 2018). Las razones por las cuales se adoptó y consolidó la innovación de la aleación cobre-estaño en las sociedades del Calcolítico se erige en el objetivo central de la investigación y gravita en torno a cuestiones relacionadas con la mejora de la producción: coladas más licuadas para formas más complejas, mejora de los aspectos mecánicos de las herramientas: dureza y resistencia de los objetos en su vida útil, o aspectos de tipo

perceptivo-ideológico: la búsqueda de determinada coloración en los objetos metálicos. La complejidad radica en que probablemente aspectos técnicos, económicos e ideológicos se combinan de forma no excluyente en la génesis de la innovación, reflejando un difícil problema de interpretación de la cultura materializada en el registro arqueometalúrgico.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Experimentación realista

La ausencia de datos respecto a las fuentes de materia prima utilizadas en el período señalado ha motivado la recogida de minerales de cobre en afloramientos conocidos y próximos a las Bardenas. Aunque en gran parte están asociados a la minería moderna, pueden ser similares a las mineralizaciones explotadas por las poblaciones prehistóricas. Para realizar un primer acercamiento a la cuestión de la procedencia, una muestra de cada una ha sido analizada por XRD. Las menas han sido utilizadas en la serie 1 para observar su comportamiento en una operación de reducción, a través del análisis por XRF al cobre obtenido. Ambos resultados pueden ser complementarios y contrastables con los resultados de análisis de isótopos de plomo.

La experimentación se ha llevado a cabo en el centro experimental de Aguilares en Arguedas

(Bardenas Reales). El protocolo experimental de la serie 1 consiste en reducciones de mineral de cobre de corta duración en las que interviene leña como combustible, *Pinus halepensis* acorde con el posible combustible utilizado en Monte Aguilar y Puy Aguila (Iriarte, 1993; Iriarte & Meaza, 1996), aproximadamente 3 kg de peso (encendida) por prueba, y una vasija de cerámica elaborada con arcilla (fig. 1), desgrasante y paja recogidos en las Bardenas Reales. La vasija se coloca en una cubeta del mismo tamaño. Interviene un fuelle de saco de cuero de aproximadamente ocho litros de capacidad y dos tubos de soplado elaborados en caña (*Arundo donax*<sup>1</sup>), siempre con una tobera o boquilla elaborada con la misma mezcla de arcilla, desgrasante y paja. Todos los elementos de barro están sin cocer, al menos en la primera operación.

Las mediciones de temperatura se han tomado con un pirómetro Testo 735-2 y una sonda tipo S colocada en el centro de la carga. También se han registrado las condiciones atmosféricas (temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad, viento) para comprobar que las pruebas se han desarrollado en condiciones similares. En cada prueba, el mineral triturado en fragmentos de entre 0,5 y 1,5 cm es vertido sobre un lecho de brasas, introducidas un poco antes en el fondo de la vasija, y después cubierto con una pequeña carga de combustible encendido de entre 1 y 2 kg. Cuando la temperatura se estabiliza, tras un ascenso térmico inicial, da comienzo la inyección de aire alternando

1 Las toberas no se realizaban con arcilla ya que, a diferencia de las puntas, no se ha hallado evidencias de la mismas. Ante este vacío de información en el registro arqueológico, los protocolos experimentales utilizan especies vegetales huecas, como las diferentes especies de *Sambucus* o poáceas, cuyo uso en sistemas de inyección de aire vinculados a actividades metalúrgicas resulta recurrente en trabajos etnográficos y se encuentra constatado arqueológicamente en el registro material referente al período estudiado. *Phragmites australis* (carrizo), autóctono de la península ibérica o *Arundo donax*, exógeno, están presentes en el registro arqueológico peninsular del período que nos ocupa de forma fundamentalmente indirecta (impresión sobre barro) en Caramoro I (Jover et al., 2020) o Rincón de Almendricos de Lorca (Ayala, 1989) por citar algunos ejemplos. Las diferencias reconocidas entre ambas se basan esencialmente en la consideración de cierto mayor diámetro para los ejemplares de la segunda especie, no obstante, las consecuencias del uso de una u otra en la experimentación son nimias, aunque abren la puerta a un debate de gran interés.

un fuelle y un soplador. Cuando se superan los 1000 °C comienza la fase de la gráfica de temperatura denominada meseta térmica. Se añade en torno a 1 kg más de combustible y prosigue la inyección de aire hasta que el combustible se agota y finaliza la prueba.

La serie 2 se centra en la cuestión de la obtención de bronce. Los datos generados han sido comparados con las muestras arqueométricas del registro de las Bardenas Reales para tratar de identificar estigmas producidos por la aplicación de una determinada técnica. El protocolo experimental es similar al de la serie 1. Se han realizado dos pruebas de correducción con una carga mezclada de carbonatos de cobre y

de casiterita en fragmentos de hasta 1 cm, una de ellas seguida por una fundición del metal obtenido, y finalmente una prueba de cementación de cobre en granalla y casiterita.

## 2.2. Revisión de materiales arqueometalúrgicos y técnicas de análisis

Un conjunto de muestras de la experimentación, desde fragmentos de minerales de cobre a productos de la reducción y la fundición han sido analizadas con diversas técnicas en el Servicio de Apoyo a la investigación (SAI) de la Universidad de Zaragoza. Varias muestras de los depósitos del Museo de Zaragoza y de Patrimonio Cultural de Navarra (fig. 2)



Figura 2. Materiales arqueológicos. 1-2: Fragmento de minerales de cobre de Monte Aguilar; 3-10: Cerámica con adherencias: Monte Aguilar I (3-7), Monte Aguilar II (8), Valdenovillas II (9) y Puy Águila II (10); 11: Boquilla o punta de tobera inédita de Monte Aguilar I; 12-16: Fragmentos de conglomerado de reducción y gotas metálicas de Monte Aguilar I; 17: Fragmento metálico de Gullizo de Abajo II; 18: Fragmento de cerámica con adherencias de Moncín.

también han sido analizadas en laboratorio para complementar los datos ya existentes. Estos se limitaban al análisis de la composición por elementos químicos mediante XRF. Dos muestras de minerales han sido analizadas ahora por XRD, y tres fragmentos de cerámica con superficies escoriñadas se han observado en un FESEM, dos procedentes de Moncín (Borja, Zaragoza) y dos de Monte Aguilar (PA4705 y PA4713).

Las probetas de muestras pulidas y preparadas con recubrimiento de carbono se han introducido en un FESEM Carl Zeiss Merlin para obtener imágenes y análisis puntuales que permitan determinar las fases presentes, y análisis de área para conocer la composición de pastas cerámicas, matrices vítreas de escoria y masas metálicas. El aparato tiene una resolución espacial de hasta 0,8 nm, microanálisis de rayos X (INCA 350 X-Sight de Oxford Instruments con resolución en energía de 127 eV a 5,9 keV) y detectores EDS/EBS/CL. Se han considerado elementos traza los valores inferiores de 0,2%. El cálculo en óxidos se ha hecho por estequiometría y los datos se han normalizado.

Para conocer la composición por elementos del metal obtenido en la reducción y en la fundición, se han hecho análisis por XRF en un espectrómetro secuencial de Thermo Electron, serie ARL modelo ADVANT'XP. Tubo de rayos X de Rodio (Rh) y se ha utilizado el programa UNQUANT para análisis semicuantitativo sin patrones (análisis secuencial desde el Mg al U). Los resultados se han normalizado omitiendo los elementos ligeros.

Las medidas de XRD se han recogido a temperatura ambiente usando un difractómetro Rigaku modelo D/max 2500 (40 kV y 80 mA, 2Theta 5° a 80° step = 0.04° t = 1s/step). Para la determinación de fases se ha utilizado la base de datos JCPDS-International Centre for Diffraction Data- 2000.

### 3. POSIBILIDADES DE CAPTACIÓN DE MINERALES

#### 3.1. Mineralizaciones de cobre

Las posibilidades de acceso a recursos minerales cupríferos a partir de las Bardenas son amplias y diversas. Corresponden principalmente a dos grupos a nivel geológico: Las areniscas oligocénicas del piedemonte pirenaico y el borde norte de la cordillera ibérica.

El criterio de distancia, establecido según lo que se puede recorrer a pie fácilmente en una jornada (30 km), nos ha permitido clasificar estas fuentes en diferentes radios con un centro que hemos establecido en el yacimiento de Monte Aguilar (fig. 1). Los resultados de los análisis por XRD a muestras recogidas en siete de estas mineralizaciones en todos los radios de alcance pueden consultarse en la tabla 1. En el radio 1 (R1), 30 km de una circunferencia de 60 km de diámetro, solo conocemos una mineralización en El Cantallar, un lugar situado en la Bardena Blanca (Sesma & García, 1994, pp. 143-144). Esta zona presenta una deposición postorogénica en el contexto de la antigua cubeta lacustre del Ebro (Iriarte & Meaza, 1996). Poco sabemos de este afloramiento que parece encajar en las calcarenitas de paleocanales que se intercalan con paquetes tanto de margas y arcillas como de yeso. En sus inmediaciones hay varias estructuras absidiales similares a las prospectadas en el cercano yacimiento de Covaza (Pitillas) (Sesma & García, 2002), en las que aparece cerámica con decoración de apliques plásticos digitados atribuibles a la Edad del Bronce, sobre las cuales venimos realizando excavaciones desde 2021.

Al R2 (60 km) corresponden mineralizaciones en lugares como Gallipienzo, Biel o Casas de Esper (Ardisa). El mismo metalotecto se da de este a oeste entre las provincias de Huesca, Zaragoza y el oeste de Navarra,



Tabla 1. Resultado de los análisis por XRD.

Muestra	Minerales
Monte Aguilar 1 (PA4695)	Azurita, brochantita, covellina, digenita, cuarzo
Monte Aguilar 1 (sigla: A; 2A, VB; 110)	Atacamita, cuarzo, yeso y espinela sin determinar
Artajona	Malaquita, azurita, cuarzo
El Cantalar	Atacamita, paratacamita, casiterita, calcita, cuarzo
Casas de Esper	Malaquita, cuarzo
Valdeplata (Calcena)	Moscovita, brochantita, calcita, cuarzo
Biel	Malaquita, albita, calcita, cuarzo y casiterita
Cueva Hombres Verdes (Urbiola)	Malaquita, azurita, atacamita, analcima, cuarzo
Serrana Segunda (Gallinero, Cameros)	Azurita, casiterita, cuarzo
Casiterita Salamanca	Casiterita, cuarzo
Casiterita Galicia	Casiterita, moscovita

en las formaciones Campodarbe, Uncastillo, Ujué-Artajona y Mués, todas ellas en areniscas fluviales terciarias y en conglomerados (Subías et al., 1989, 2003). El porcentaje de cobre suele ser bajo, pudiendo superar en algunos fragmentos el 5% (Gillot et al., 2012, p. 197). Las mineralizaciones primarias están constituidas por diversos sulfuros de cobre y otros sulfuros de Fe, Pb, Zn y Ag. La malaquita es muy común en impregnaciones verdosas en areniscas y margas, y también aparece cobre nativo.

Próximos a Cáteda, donde apareció la fosa sepulcral de la Edad del Bronce de La Saga con algún objeto metálico (García et al., 2001) y un hallazgo casual de dos hachas de rebordes (Ona & Perez, 1985), en Eslava y en Gallipienzo, hay diversos indicios de minas de cobre romanas (Armendáriz et al., 1995-96, pp. 353, 1997, p. 831). Dentro del R3 (100 km), encontramos la cueva sepulcral de Urbiola (Maluquer, 1962), donde aparecen carbonatos de cobre con una explotación presumiblemente de la Edad del Bronce. También existe un afloramiento en Artajona, junto a los conocidos sepulcros megalíticos y la Mina de Farangortea (Andrés, 1977).

En la cordillera ibérica, al sur de la sierra del Moncayo, hay conocidas mineralizaciones de cobre que corresponden al R2 en torno a los ríos Aranda e Isuela, como pueden ser Tierga y Mesones de Isuela. Otros afloramientos se encuentran dispersos en varios puntos de las serranías de la parte suroccidental de la provincia de Zaragoza. Hay minas en lugares próximos a los pueblos de Tabuena, Jarque, Épila, Ateca, Nuévalos, Alpartir, Munébrega o Fombuena, entre el R2 y el R3. Se tomaron muestras del yacimiento filoniano de Pb-Zn-Cu-As-Ag-Fe-Sb del barranco de Valdeplata (Calcena), de génesis hidrotermal. Las menas principales son galena, esfalerita y tenantita, acompañadas por pirita, arsenopirita y calcopirita (Subías, 1990; Subías et al., 1994). Encajan en areniscas o subarcosas con una composición de cuarzo, dolomita, feldespatos, siderita, cemento calcítico y micas con abundante moscovita. En los depósitos de alteración aparecen principalmente covellina, malaquita y marcasita. Los análisis del proyecto Arqueometalurgia de la península ibérica realizados por XRF a muestras de Valdeplata indican una composición de cobre acompañado por Fe, Zn, As, Pb y trazas de Co y Ni (tab. AC1; Aguilera, 2022).

En el R4 (más de 100 km) encontramos mineralizaciones en Navarra en Lantz, Orbaizeta, Arce, Arike o Mués. En la sierra de Cameros (La Rioja) perteneciente al borde septentrional de la Cordillera Ibérica, las mineralizaciones de cobre se dan en areniscas y lutitas de la cobertera mesozoica entre el Jurásico y el Cretácico, y son de tipo estratoligado (Mata-Perelló & Puche, 1992). Aparece calcopirita, calcosina y tetraedrita. Los minerales alterados, principalmente carbonatos de cobre, son muy abundantes. La muestra analizada procede de la mina Serrana Segunda, próxima a Gallinero de Cameros.

### 3.2. Mineralizaciones de estaño

La información al respecto sobre fuentes de explotación de casiterita y redes de distribución durante el Bronce Antiguo y Medio sigue siendo muy escasa. Las concentraciones importantes de casiterita de la parte occidental de la península ibérica (Galicia, Salamanca, Extremadura y Portugal) se encuentran a gran distancia de las Bardenas, en torno a 350-600 km de Monte Aguilar en línea recta. Este mineral es particularmente abundante en Pontevedra, Ourense, Extremadura y Salamanca donde existieron abundantes explotaciones modernas, pero también hay otras mineralizaciones de menor entidad en Zamora, Ávila y León.

En el sector madrileño de la sierra de Guadarrama, a unos 250 km en línea recta, la casiterita aparece en filones de cuarzo en contexto granítico y asociada a mineralizaciones de wolframita y arsenopirita. En esta zona hubo explotaciones modernas como la mina Asturias entre Hoyo de Manzanares y Colmenar Viejo, la mina Maribel en Galapagar, así como en Torreledones, Lozoyuela y Las Rozas (Jordá, 2008, pp. 242, 486-491), y también en San Rafael, Segovia (Vindel, 1982). El mineral beneficiado era en gran parte de tipo aluvionar pero también se realizaron abundantes calicatas o zanjas para explotar los filones a cielo abierto.

En algunas zonas de Cataluña también hay indicios de casiterita, siempre de forma poco abundante (Martín et al., 1999, pp. 129-130). En Lleida, en Arenys (Aristot Toloriú, Alto Urgel) a 250 km, hay granates ricos en estaño. También hay casiterita en minas de Viella en el valle de Arán.

El indicio más próximo a Bardenas, aunque todavía sin confirmar, se sitúa en Tiebas-Muruarte de Reta (Navarra), a 75 km en el R3, donde existe un documento sobre una explotación de mineral de estaño en la mina Iruña a principios del s. XX. En Bizkaia se encontró casiterita encajada en areniscas del Eoceno en distintos puntos, aunque debido a su baja concentración no ha tenido rentabilidad (Calvo, 2009). Una mineralización relativamente próxima, a 160 km de Monte Aguilar, se sitúa en Mutriku (Gipuzkoa) en torno a la desembocadura del río Deba.

Recientemente hemos recogido mineral de estaño mediante bateo en el río Rubios (Navasfrías, Salamanca) con el fin de someterlo a futuras experimentaciones realistas de reducción que pudieran permitir reconocer posibles estigmas diferenciales respecto a los restos de reducción de casiterita con roca encajante.

## 4. EVIDENCIAS DE PRODUCCIÓN DE BRONCE EN EL VALLE MEDIO DEL EBRO EN LA PRIMERA MITAD DEL SEGUNDO MILENIO A. C.

### 4.1. Bardenas Reales

Un completo corpus de evidencias de objetos de bronce y materiales relacionados con la cadena operativa de producción en el valle medio del Ebro se sintetiza en *Metalurgia y metalúrgicos en el valle del Ebro (c. 2900-1500 cal. A. C.)* (Rodríguez, 2005). La interpretación tecnológica de los datos arqueométricos proporcionados por el análisis de capas escoriales la encontramos en *Obtención de*

*metales en la Prehistoria de la Península Ibérica* (Gómez, 1999). Ambas obras recogen las evidencias de producción de bronce en el grupo de yacimientos de las Bardenas Reales como las más antiguas en el valle del Ebro, no así en el conjunto del noreste con las dataciones de la Bauma del Serrat del Pont (Girona) antes referidas.

En el yacimiento de Monte Aguilar contamos con restos de todo el proceso metalúrgico, desde fragmentos de mineral, conglomerado de reducción y cerámica con superficies escoriadas, hasta gotas metálicas, moldes y objetos (figs. 1 y 2). El material se encuentra disperso en los dos sectores excavados, aunque es más abundante en la fase V del sector A y en el nivel VII del sector B. Las dataciones de estos niveles dan fechas entre el 1890-1750 cal. a. C., dentro de una secuencia estratigráfica que comienza con presencia de cerámica campaniforme (Fernández-Miranda et al., 1995; Sesma & García, 1994).

Monte Aguilar es un yacimiento de enorme interés para la caracterización cultural de las comunidades del valle medio del Ebro en el segundo milenio. Se trata de un cerro amesetado de difícil acceso con una cota de 613 m s. n. m que se eleva unos 300 m sobre el entorno inmediato, a 8 km aproximadamente del cauce actual del río Ebro, en la vía natural del barranco de Valdenovillas por donde discurre la histórica cañada de los roncaleses. Descubierta por Gregorio Mayano, sus materiales fueron estudiados por M.<sup>a</sup> A. Beguiristain en su tesis doctoral de 1982 reconociendo una ocupación adscribible a la Edad del Bronce, pero su importancia en la jerarquización territorial del bronce de Bardenas Reales no sería reconocida hasta los trabajos sistemáticos de prospección realizados por J. Sesma y M.<sup>a</sup> L. García. A partir de los mismos se realizaron periódicamente campañas de excavación arqueológica en el yacimiento entre 1988 y 1991. Las prospecciones dieron a conocer una densidad de ocupación en

la Edad del Bronce en el territorio de las Bardenas Reales inédita hasta el momento con un centenar aproximado de yacimientos adscribibles a este período (Sesma & García, 1994). La ocupación de Monte Aguilar desempeña junto a Piskerra un papel preponderante en las Bardenas Reales durante el Bronce Medio y Tardío, y se caracteriza por la presencia de una serie de elementos estructurales como edificaciones estables que esbozan cierto protourbanismo, cisterna o sistemas de fortificación que han permitido establecer vínculos culturales con el bronce valenciano (Sesma, 2004), confirmados por el hallazgo de vasos geminados en Puy Aguila I, Valdenovillas II, Cueva Quemada IV, El Molino de Buñuel o Eras de la Cruz de Valtierra (Sesma et al., 2007-2008). La presencia bibliográfica de Monte Aguilar y de las Bardenas Reales en las publicaciones referentes al segundo milenio ha venido propiciada fundamentalmente por la densidad y naturaleza de los hallazgos de aleaciones de base cobre.

La composición de los objetos y gotas metálicas analizados es de cobre o bronce pobre (tabs. AC1 y AC2; Rovira et al., 1997, pp. 279-283). De diecisiete objetos de Monte Aguilar analizados por XRF, diez de ellos son punzones, a los que se suma otro ejemplar procedente de Monte Aguilar II. Los objetos tienen entre el 2,5 y el 7,5% de estaño, exceptuando una pieza con el 12,4%, tres con menos del 0,5% y cuatro donde no se detecta. Es frecuente la presencia de arsénico, entre 0,3 y 2,3%, y otros elementos minoritarios como antimonio, hierro, plata y en algunos casos plomo y níquel. En el resto de yacimientos, los objetos son de cobre, a veces con arsénico y estaño por debajo del 2%, y en general acompañados por hierro, plata y antimonio.

En la revisión realizada se han identificado los restos de una boquilla o tobera de soplado inédita procedente del sector A, fase VB (fig. 2, n. 11), además de un posible fragmento cerámico de crisol con pico vertedero (fig. 2,

n. 5). En prospección superficial se había detectado un fragmento de molde de hacha plana en arenisca (Sesma & García, 1994, p. 132). Su escaso grosor y una superficie bien pulida permiten deducir un vertido en vertical con una valva plana adicional, no bivalvo. Otro supuesto molde de punzones hallado en Monte Aguilar, yacimiento situado al pie del cerro y adscrito al Bronce Pleno, corresponde probablemente a un afilador.

Anteriormente, dos restos de mineral eran conocidos, un fragmento de malaquita hallado en Llanos del Escudero II (Sesma & García, 2006, p. 15) y otro perteneciente a Monte Aguilar (PA4695) con una composición por elementos de cobre con hierro, arsénico y trazas de antimonio y plata. Este último fragmento, analizado ahora por XRD, tiene una composición principalmente de azurita y brochantita, con relictos de sulfuros de los depósitos secundarios (covellina, digenita) y ganga de cuarzo (tab. 1). Se ha reconocido y analizado otro fragmento de este yacimiento cuyo análisis indica una composición de atacamita con ganga de cuarzo, yeso y espinela.

Algunos fragmentos de conglomerado de reducción (a veces denominados mineral parcialmente reducido o escoria), superficies escoriadas de fragmentos de cerámica y gotas metálicas habían sido analizados por el Proyecto Arqueometalurgia (tab. AC1). Un total de siete fragmentos de Monte Aguilar presentan una composición de cobre con bastante hierro. Destaca la abundancia de arsénico, también de

plata y antimonio. La aparente ausencia de níquel en estos restos, que sí aparece en los objetos, es coherente puesto que este elemento sufre pocas pérdidas y suele concentrarse durante el proceso metalúrgico (Tylecote et al., 1977). Hay un porcentaje de plomo en todos los restos salvo en las capas escoriadas en cerámica. El contenido de estaño es muy alto en una muestra (50%), bajo en otras dos (entre el 1 y el 2,5%), y en el resto es muy bajo o no se detecta.

El fragmento de cerámica con capa escoriada PA4705, mostraba en superficie una composición de cobre con el 2% de estaño, además de Fe, Sb, As y Ag. En el SEM, se observa una pasta cerámica ligeramente vitrificada con una composición de silicato con abundante aluminio y calcio, y desgrasante de granos de cuarzo (tab. 2). También se detectan inclusiones de ilmenita, un óxido de titanio-hierro que suele aparecer en microcristales en terrenos sedimentarios como las Bardenas. Su presencia podría indicar el origen local de la arcilla, al igual que la abundancia de CaO, si bien la proporción de este último es menor en una zona más viudrada de la cerámica (fig. 3). En la figura 4, se observa la capa escoriada que está formada por una matriz de aluminosilicato (gris oscuro) con abundantes cristales de magnetita (gris medio) que indican unas condiciones poco reductoras. Las impurezas, principalmente de la cerámica, con algún aporte del mineral y de la ceniza, han formado una masa vítrea que contiene abundantes gotas de cobre con algo de hierro (tab. 3). Algunas de estas gotas presentan un cerco de oxidación compuesto por

Tabla 2. Composición de las pastas cerámicas de las muestras arqueológicas de Monte Aguilar. Microanálisis de área y puntuales en el FESEM, % en peso como óxido; *nd* no detectado.

Muestra	Análisis/Zona	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO
PA4705	Área Fig. 3A	<i>nd</i>	3,2	9,4	51,6	<i>nd</i>	2,1	30,1	0,4	3,2
PA4705	Área Fig. 3B	<i>nd</i>	0,6	36,7	49,5	<i>nd</i>	2,4	3,5	1,4	6
PA4705	Inclusión imenita Fig. 3B	<i>nd</i>	<i>nd</i>	8,5	4,6	<i>nd</i>	<i>nd</i>	1,6	64,3	21
PA4713	Área	1,6	5,7	15,2	47,7	<i>nd</i>	1,7	22,6	0,6	4,9



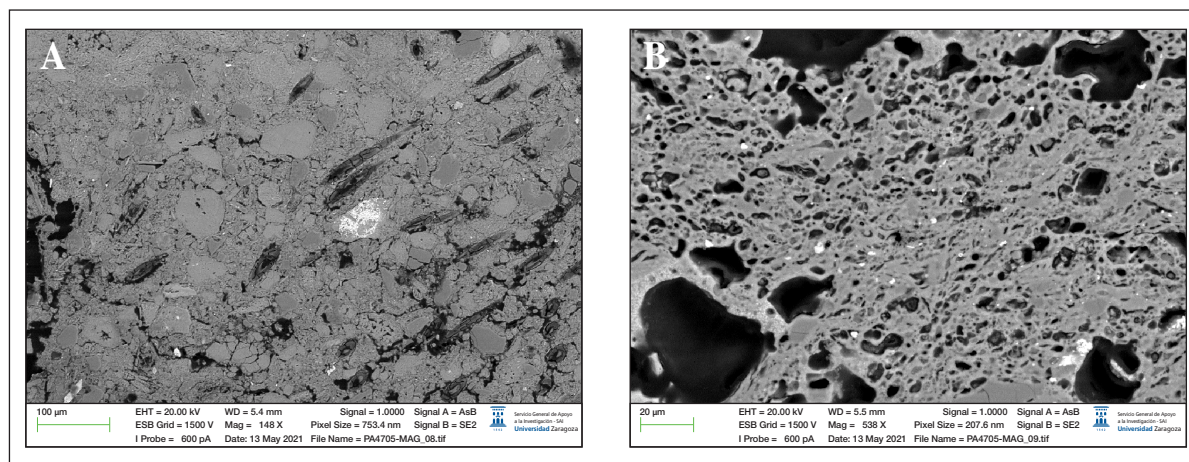


Figura 3. Imágenes SEM (electrones retrodispersados) de la pasta cerámica de las muestra PA4705 de Monte Aguilar. A) Zona poco vitrificada con desgrasante cuarzo; B) Zona vitrificada con inclusiones de ilmenita. Composición en tab. 2.

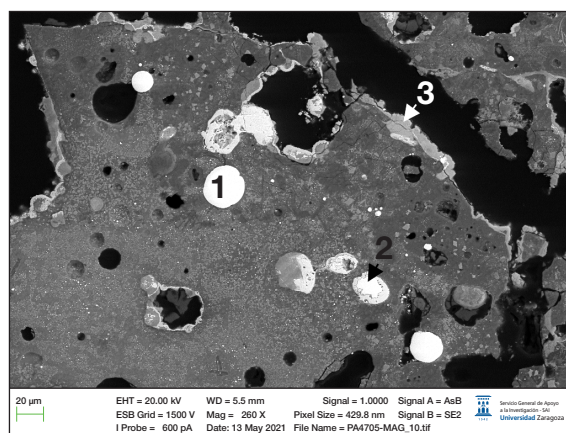


Figura 4. Imagen SEM (electrones retrodispersados) de la cerámica con superficie escoriificada PA4705 de Monte Aguilar. Matriz de aluminosilicato (gris oscuro) con abundantes exoluciones de magnetita (gris medio); 1 y 2: Gotas de cobre, composición en tab. 3. La número 2 presenta un cerco de cuprita; 3: Cloruro de cobre, alteración postdeposicional.

cuprita que se habría formado durante un episodio oxidante. La muestra está muy alterada y la meteorización postdeposicional ha generado cloruros de cobre. En otra zona se observan redeposiciones de cuprita, con inclusiones de sulfuro de plata (procedente del mineral de cobre) y óxidos de hierro. Aparecen formaciones de óxidos de estaño y hierro alterados, con presencia de cobre, arsénico, antimonio y níquel. Los elementos que acompañan al metal podrían indicar que se trata de una fundición de metal (tab. AC1), ya que son elementos que sufren pocas pérdidas del mineral al metal, como Ag y Ni. También Sb y As, aunque sufren más pérdidas a altas temperaturas y condiciones oxidantes, pueden conservarse en parte hasta el final del proceso.

Tabla 3. Composición de gotas metálicas de las muestras arqueológicas de Monte Aguilar, PA4705 (fig. 4), y Moncín (fig. 6 y otras zonas). Microanálisis puntuales en el FESEM, % en peso como elemento; *nd* no detectado.

Muestra	Análisis puntual	Fe	Cu	As	Sn
MAG-PA4705	Fig. 4_1	1,2	98,8	<i>nd</i>	<i>nd</i>
MAG-PA4705	Fig. 4_2	1,5	98,5	<i>nd</i>	<i>nd</i>
Moncín	Fig. 6B_1	1,1	97,8	1,1	<i>nd</i>
Moncín	Fig. 6B_2	1,1	97,4	1,5	<i>nd</i>
Moncín	Gota 3	1	99	<i>nd</i>	<i>nd</i>
Moncín	Gota 4	1	99	<i>nd</i>	<i>nd</i>

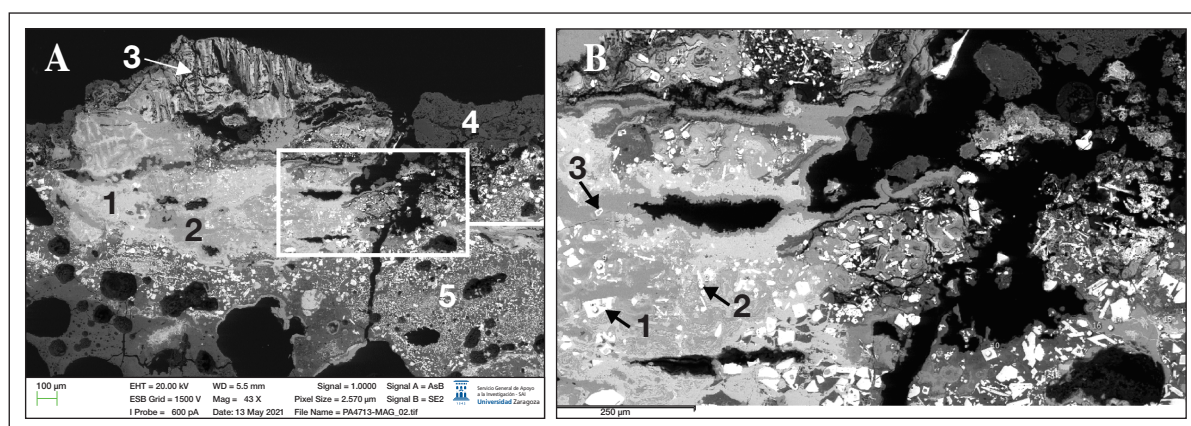


Figura 5. Imágenes SEM (electrones retrodispersados) de la cerámica con superficie scorificada PA4713 de Monte Aguilar. A: 1) cuprita, redeposición secundaria; 2) cloruro de cobre, corrosión postdeposicional; 3) Estructura columnar de silicato con Sn-Cu; 4) depósitos terrosos; 5) matriz silicatada con granos de casiterita, y agujas de SnO<sub>2</sub>, composición en tab. 4. B: 1) Grano de casiterita; 2) Aguja euhedral de SnO<sub>2</sub>; 3) Sección aguja de SnO<sub>2</sub> con núcleo de Cu, composición en tab. 4.

En la muestra PA4713, la cerámica, ligeramente vitrificada y porosa, se distingue mejor de la capa scorificada. Nuevamente es rica en CaO (22,6%) y tiene granos de desgrasante de cuarzo (tab. 2). La superficie de la escoria daba una composición próxima al 50% de cobre y 50% de estaño (tab. AC1). En la imagen del interior pulido (fig. 5A), la parte superior y la mayor parte de la mitad izquierda presenta formaciones muy alteradas por la meteorización química postdeposicional. Las estructuras columnarias de la parte superior izquierda presentan una composición de silicato con estaño y cobre. La zona media es una banda de cobre que se ha alterado a cuprita y cloruro de cobre. En la parte inferior derecha aparece un conjunto numeroso

de cristales blancos cuya composición es SnO<sub>2</sub>, asociados a una matriz en gris oscuro. Debido a la proximidad de estos cristales, el análisis puntual de la matriz da abundante SnO<sub>2</sub> (69%), pero hay indicios de que se trata de un aluminosilicato rico en CaO y algo de CuO (tab. 4). Los cristales corresponden tanto a fragmentos de casiterita sin reaccionar, como a agujas euhedrales formadas en episodios oxidantes por la oxidación de estaño metálico que se había reducido en un primer momento (fig. 5B). En algunos casos, los cristales aciculares tienen un núcleo de cobre que evidencia cómo la presencia de estaño evita la oxidación del cobre, constituyéndose como óxido el primero alrededor del segundo (Dungworth, 2000). La presencia de

Tabla 4. Composición de matrices vítreas o escorias y algunas fases de óxidos de las muestras arqueológicas de Monte Aguilar PA4713 (fig. 5) y Moncín (fig. 6). Microanálisis puntuales y de área en el FESEM, % en peso como óxido; *nd* no detectado.

Análisis	Fase	NaO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	CuO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>
Fig. 5A_5	matriz + SnO <sub>2</sub>	1,1	1,6	6,2	14,5	<i>nd</i>	1,4	3,5	<i>nd</i>	0,7	2,4	<i>nd</i>	68,7
Fig. 5B_1	casiterita	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	1,4	<i>nd</i>	98,6
Fig. 5B_2	aguja SnO <sub>2</sub>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	2,8	<i>nd</i>	97,2
Fig. 5B_3.a	aguja con núcleo	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	1,4	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	3,2	<i>nd</i>	95,4
Fig. 5B_3.b	núcleo aguja	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,4	12,5	<i>nd</i>	<i>nd</i>	1,8	<i>nd</i>	<i>nd</i>	50,5	<i>nd</i>	34,7
Área/Fig. 6A	matriz melilítica	<i>nd</i>	2,3	19,7	34,1	<i>nd</i>	1,9	25,7	0,4	7,6	8	1,3	<i>nd</i>

relictos de casiterita sugiere su uso para la producción de bronce, el cual desafortunadamente no ha sido detectado. La alteración postdeposicional de la muestra impide saber si el cobre ha entrado en el recipiente como metal o como mineral oxidado, aunque este tipo de imagen es habitual en escorias de producción de la aleación (Farci et al., 2017; Montes-Landa et al., 2020; Rovira, 2007; Valerio et al., 2013).

En el resto de yacimientos el material es más escaso. La superficie escorificada en una cerámica del yacimiento de Puy Águila II está compuesta por cobre con algo de hierro, similar a la de Valdenovillas II, aunque esta última tiene también cerca del 1% de estaño. También aparecen otros dos fragmentos en Puy Águila (Sesma & García, 1994, pp. 142-144). Interesante resulta la información respecto a posibles gestos en la cadena operativa como la posible adición de fundente a base de arena cuarzosa a la muestra PA4717 de Puy Águila debido a la presencia de granos de cuarzo característicos de una arena lavada o fundentes ferrosos en la PA4693 de Monte Aguilar (Gómez, 1999, p. 92), gesto técnico inferido de la morfología de las muestras, no confirmado por el tipo de restos de producción entre los que no hay tortas de escorificación intencional. En Gullizo de Abajo II hay dos gotas de cobre con más del 6% de estaño y trazas de níquel, hierro, antimonio y plata. En Portillo Lobo, otro yacimiento adscrito al Bronce Medio, apareció otra gota de cobre con un 16% de estaño, algo de hierro, níquel y antimonio.

Próximo a las Bardenas, en el yacimiento de la Edad del Bronce de Covaza (Pitillas) se descubrieron dos posibles fragmentos de conglomerado de reducción o gotas de fundición, un posible fragmento de molde en arenisca con superficie pulida y una capa escorificada (Sesma & García, 2002, pp. 21-22). Los fragmentos de cerámica de Plana Yesera V y del yacimiento campaniforme de El Abejar han sido asociados a la metalurgia (Sesma & García, 1994) aunque no presentan escorificaciones.

## 4.2. Valle del Huecha

Los recientes resultados publicados sobre evidencias de producción de bronce en la Muela de Borja (Aguilera, 2022) arrojan unas cronologías similares a las del entorno de Bardenas Reales, lo cual no resulta sorprendente dada la escasa distancia entre ambos grupos de yacimientos, ubicados en este caso inmediatamente en la margen derecha del río Ebro, frente a las Bardenas Reales, distando Monte Aguilar de Moncín, los dos yacimientos más conocidos respectivamente, en torno a 25 km.

La Muela de Borja donde se concentran una serie de yacimientos con ocupación desde el Calcolítico hasta el Bronce Final, es un relieve tabular de unos 20 km de superficie en su plataforma caliza, con una altitud máxima de 805 m s. n. m., alejada del frente NE del macizo del Moncayo por 11 km y por el norte le separan también 11 km del cauce del río Ebro. Sirve de divisoria de aguas entre el río Huecha por el este y el curso ocasional de la Cañada Madre por el noroeste (Aguilera, 2022). Los análisis de composición elemental (tabs. AC1 y AC3), fueron efectuados por el British Museum (Aguilera, 2022; Harrison et al., 1994), aunque algunos análisis de este último no tienen datos precisos de todos los elementos, y por el Proyecto Arqueometalurgia (Rovira et al., 1997). Moncín y Majaladares son los dos yacimientos mejor conocidos de la Muela de Borja, a base de restos de estructuras estables ubicadas al resguardo de la pared rocosa que corona perimetralmente la Muela, e inmediatamente en la pronunciada pendiente. Este hecho dificulta la lectura estratigráfica y la conservación de los materiales rescatados (Harrison, 2007; Harrison et al., 1994). En Moncín, en niveles del Bronce Antiguo y Medio se hallaron diez gotas metálicas, algunas de cobre arsenical y otras de cobre con estaño, además de treinta y cuatro fragmentos de cerámica con capas escorificadas, cuatro moldes de varillas o punzones y decenas de objetos



(Aguilera, 2022). Al menos once objetos presentan más del 9% de estaño, llegando hasta el 22,6% de una punta y el 32% en un remache. Otros son bronce pobres, cobres arsenicales y cobres. En algunas muestras se detecta presencia de plomo.

Las diez gotas metálicas analizadas tienen una composición de cobre con algo de hierro y arsénico. En cuatro casos, pertenecientes a la fase IID, presentan cobre con estaño, tres de ellas con datos precisos del 5, 10 y 20% respectivamente. Se detectaron algunos posibles moldes sin huellas de colada, que nuevamente parecen corresponder a afiladores.

Los fragmentos de cerámica con superficies escorificadas aparecen repartidos por todo el yacimiento y en todas las fases, salvo en la V perteneciente al Calcolítico que fue poco excavada (Aguilera, 2022). La mayoría presenta una deficiente cocción. La parte metálica da una composición de cobre, frecuentemente acompañado por hierro y arsénico, y en tres ocasiones por estaño, destacando un fragmento con el 36% que pertenece a la fase IIIB (2000-1700 cal. a. C.).

La muestra analizada en el FESEM, procedente del nivel IX, parece corresponder al fragmento que contiene Cu (44%), Sn (35%), As (12%) y Fe (tab. AC1), aunque ahora no se ha detectado estaño. Se trata de un fragmento cerámico con una capa superficial de escoria que corresponde a la parte superior de la fig. 6A. La zona de cerámica presenta un estado de vidriado intermedio con poros cuyo tamaño sugiere que se han alcanzado temperaturas de 1200 °C (Freestone & Tite, 1986, p. 39). La escoria está formada por una matriz melilitica (tab. 4) que contiene abundantes gotitas de cobre con presencia de hierro, y otras de cobre arsenical (tab. 3; fig. 6B). Los óxidos de dicha escoria proceden con bastante probabilidad de la cerámica. La pasta se compone de aluminosilicato con abundante CaO y desgrasante de cuarzo. Otros precipitados de la matriz son cristales de melilita que se aprecian en gris oscuro. Aunque todo parece indicar que el mineral utilizado era una mena oxidica de cobre con algo de hierro y arsénico, la muestra no ofrece estigmas suficientes para saber si se trata de un fragmento de vasija de reducción de minerales y no se puede descartar que sea una escoria residual de un crisol de fundición.

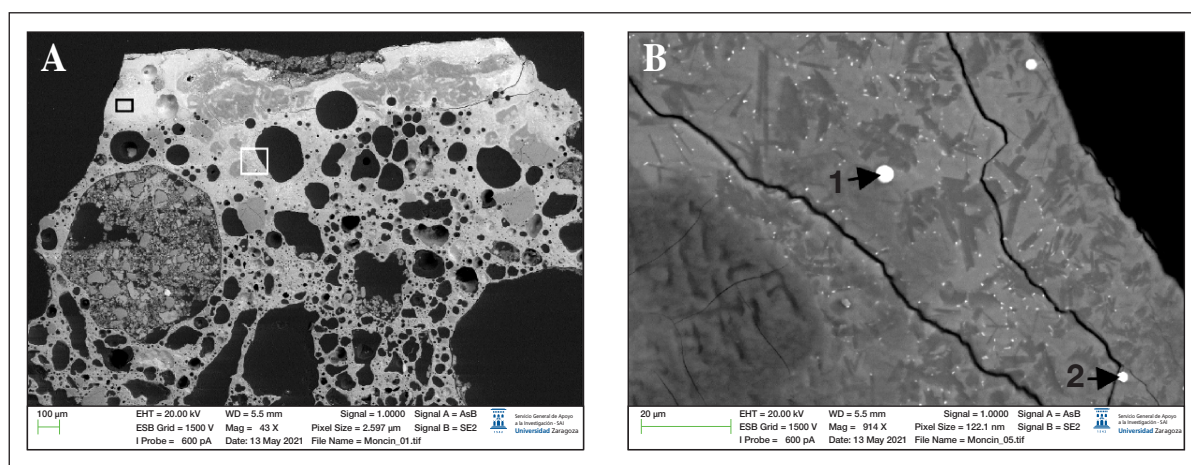


Figura 6. Imágenes SEM (electrones retrodispersados) de la cerámica con superficie escorificada de Moncín. A: Parte inferior cerámica vitrificada porosa; Parte superior en gris claro adherencia escoriácea; Cuadro negro: composición de área, resultado en tab. 4; Cuadro blanco: situación de la fig. 6B; B: Detalle de la matriz melilitica con exoluciones de gotas de cobre arsenical (composición en tab. 3) y cristales de melilita.



En el yacimiento de Majaladares (Borja), con una ocupación entre el Calcolítico campaniforme y el Bronce Pleno (2400-1600 cal. a. C.), se recuperaron varios objetos: una gota metálica, un molde de punzones en arenisca y un total de 26 fragmentos de cerámica con escoriaciones (Aguilera, 2022). Separado en la cueva y la parte exterior, el material apareció disperso en todo el asentamiento y en todas las fases, aunque es más abundante en los momentos finales. Los objetos son de cobre con algo de arsénico, plomo y níquel. En tres casos son bronce con entre el 12 y el 15% de estaño. Los análisis de seis superficies escoriadas en fragmentos de cerámica muestran presencia de hierro, cobre y algo de arsénico.

En otro punto del valle del Huecha, Siete Cabezas (Magallón, Zaragoza), un yacimiento adscrito al Bronce Pleno por comparación con la cerámica de la fase IID de Moncín (1950-1750 cal. a. C.), apareció una punta de flecha de bronce (9% Sn, 1% As) y varios fragmentos de un recipiente cerámico de aproximadamente 20 cm de diámetro, decorado con incisiones en el borde y elaborado con arcilla depurada y desgrasante

vegetal (Harrison et al., 1990). Presentaba escoriaciones en las que se detecta cobre, estaño y trazas de arsénico. Fuera de los dos núcleos reseñados, contamos con presencia de crisoles en la transición entre la primera y segunda mitad del segundo milenio en el Collado de la Abeja, en el río Huerva (Muel-Alfamén), pero sin analíticas que confirmen su uso para la producción de la aleación (Pérez-Lambán et al., 2018), lo cual se puede extender también a las adherencias y fragmentos de escoria de los Hermanillos (Zaragoza) (Pérez-Lambán et al., 2010).

## 5. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

### 5.1. Serie 1. Pruebas de reducción de minerales locales

En las pruebas de transformación de minerales procedentes de El Cantalar (R1), Valdeplata/Casas de Esper (R2) y Artajona (R3) (fig. 7, n. 3-11), se logró reducir parcialmente una carga de mineral de entre 90 y 140 g (tab. 5). El

Tabla 5. Datos generales de la experimentación. Ø diámetro; *h* altura; *nr* no registrado; *mbar* presión atmosférica; *RH* humedad relativa.

Prueba	Carga	Tamaño	Vasija	Crisol	Resultado	<i>mbar</i>	<i>RH</i>	<i>T<sub>amb</sub></i> °C
Artajona	87,8 g malaquita/ azurita	0,3-0,8 cm	Ø: 24,5; h: 5,5	–	54 g conglomerado y cuprita/Cu; conglomerado adherido a cerám.	971	20/24%	34,5/39
Cantalar	101 g malaquita	0,3-2 cm	Ø: 24,5; h: 5,5	–	49,6 g cuprita/Cu; 37,3 g conglomerado	965	30%	33
Casas de Esper	140 g malaquita	polvo-1 cm	Ø: 22,5; h: 4,5	–	28 g Cu/cuprita; torta cuprita/Cu adherida a cerámica	968	22%	36,5
Valdeplata	140 g malaquita	0,5-1 cm	Ø: 23; h: 5,5	–	25 g cuprita; 9,2 g Cu; 55 g conglomerado	968	<i>nr</i>	<i>nr</i>
Correducción 1 Salamanca	100 g malaquita 50 g casiterita	0,5-1,5 cm	Ø: 22,8; h: 5,5	–	53 g conglomerado/Cu; 44 g metal/cuprita	970	21/38%	42/33,5
Correducción 2 Galicia	100 g malaquita 50 g casiterita	polvo-1 cm; 0,5 cm	Ø: 24,8; h: 4,8	–	86 g conglomerado/metal	969	20%	38,5
Fundición Galicia	73 g gotas bronce corred. 2	–	Ø: 24,8; h: 4,8	Ø: 8; h: 2,6	36,8 g colada; formaciones adheridas a cerámica	971	43%	29
Cementación	110 g Cu, 36 g casit. Salamanca	–	Ø: 24,8; h: 4,8	Ø: 8,5; h: 2	122,2 g torta metálica con casiterita adherida	969	32%	26,3

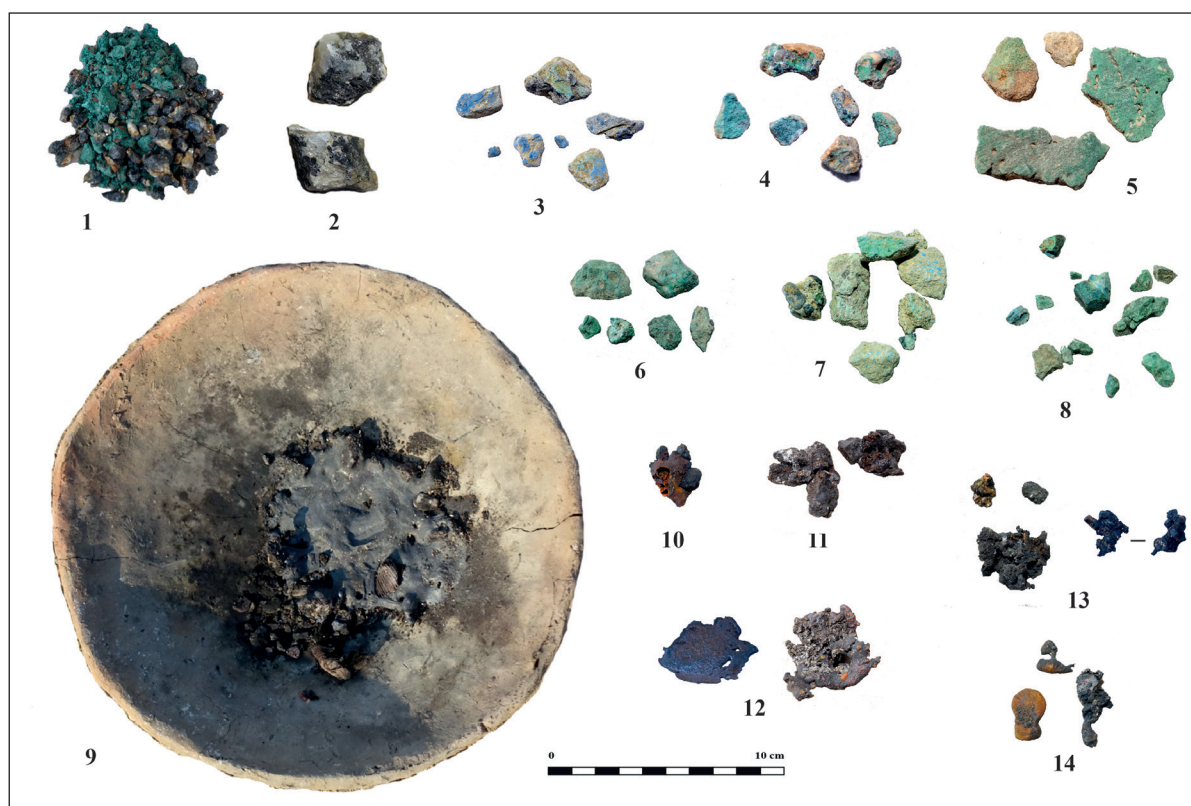


Figura 7. Materiales experimentales. Casiterita: 1: Galicia y malaquita de Bou Beker; 2: Salamanca con cuarzo; Carbonatos de cobre: 3: Artajona, 4: Biel, 5: El Cantalar, 6: Valdeplata (Calcena), 7: Casas de Esper, 8: Urbiola; 9: Cerámica con adherencia de la prueba con mineral de Casas de Esper; Productos: 10: Muestra de la reducción de Casas de Esper; 11: Muestra de la reducción de Artajona, 12: Muestra de la prueba de cementación, 13: Muestras de metal y conglomerado de la correducción 2 con casiterita de Galicia, 14: Muestras de la fundición con el material de la correducción 2 Galicia.

resultado fue en todos los casos un conglomerado de reducción formado por cobre metálico atrapado, cuprita que no ha reducido y zonas de escoria. Las condiciones ambientales fueron similares salvo por la intensidad variable de las rachas de viento, hecho que explica la distinta duración del calentamiento del mineral, de entre 15 y 28 min, y también las diferencias de temperatura al inicio de la inyección de aire, entre 765 y 873 °C (tab. 6; fig. 8A). La prueba con mineral de Valdeplata tuvo un calentamiento más corto y una temperatura inicial superior.

El tiempo del ascenso hasta el inicio de la meseta fue de 2,25 min en esta prueba y de

entre 3 y 5 min en las restantes. La temperatura máxima alcanzó aproximadamente los 1300 °C en todas las pruebas salvo en la experiencia con mineral de El Cantalar, debido a que la tobera del fuelle se agrietó disminuyendo fuertemente su eficacia. La temperatura media de la meseta también fue baja en esta prueba, inferior a 1100 °C. En la prueba de Casas de Esper dicha media alcanzó a los 1155 °C. El tiempo de la meseta fue similar, entre 37 y 39 min, algo menor en la prueba de El Cantalar (29 min).

Una muestra de cada reducción ha sido analizada por XRF para disponer de un dato orientativo del resultado (tab. 7; fig. 7: n. 9-11).

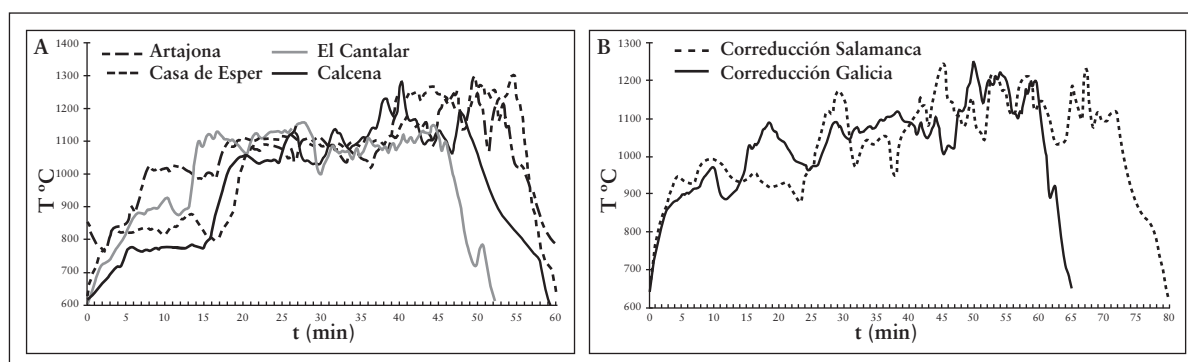


Figura 8. Gráficas de temperatura de las pruebas. A: Pruebas de reducción de la serie 1; B: Pruebas de correducción de la serie 2.

Tabla 6. Promedio de temperatura ( $T$ ) y tiempo ( $t$ ) del conjunto de las pruebas; *nr* no registrado.

Prueba	$t_{\text{calentamiento}}$ (min)	$T_{\text{inicio}}$ aire (°C)	$t_{\text{ascenso}}$ (min)	$T_{\text{max}}$ (°C)	$T_{\text{media}}$ meseta (°C)	$t_{\text{meseta}}$ (min)	$t_{\text{total aire}}$ (min)
Artajona	17,5	765,6	5,25	1298,9	1113,2	39,5	44,75
El Cantalar	28	778,7	3	1158,3	1078,5	29	32
Casas de Esper	22	798,8	3	1303,3	1155,8	37	40
Valdeplata (Calcena)	15	873,2	2,25	1283,7	1114,9	37,5	39,75
Correducción 1 Salamanca	20	910,7	7,5	1252,2	1106,3	47	54,5
Correducción 2 Galicia	13,5	885,5	3,25	1255,1	1085,6	46	49
Fundición Galicia	11	775,3	22,25	1135,8 / nr	1022 / nr	26	48
Cementación	13,5	788,1	6	<i>nr</i>	<i>nr</i>	<i>nr</i>	<i>nr</i>

Tabla 7. Resultados de los análisis por XRF a muestras de la experimentación. 1-7: gotas metálicas extraídas de conglomerados de reducción; 8-9: goterones de fundición; 10 torta metálica; *nd* no detectado; *tr* trazas.

Prueba	Fe	Co	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Ba	Pb	Bi
1. Artajona	2,88	<i>nd</i>	94,86	0,06	0,1	0,3	0,06	<i>nd</i>	0,1	1,64	<i>nd</i>
2. El Cantalar	2,6	<i>nd</i>	43,44	0,09	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	1,9	52	<i>nd</i>
3. Casas de Esper	0,99	<i>nd</i>	98,22	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,2	0,1	<i>nd</i>	0,2	0,3	<i>nd</i>
4. Valdeplata	4,99	0,2	53,23	19	6,3	0,3	<i>nd</i>	8,02	1,07	6,71	0,19
5. Correducción 1 Salamanca A	5,42	<i>nd</i>	86,1	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,66	<i>nd</i>	<i>nd</i>	7,86	<i>nd</i>
6. Correducción 1 Salamanca B	15,04	<i>nd</i>	57,49	<i>tr</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	3,35	<i>nd</i>	<i>nd</i>	24,12	<i>nd</i>
7. Correducción 2 Galicia	6,92	<i>nd</i>	38,82	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	51,74	<i>nd</i>	<i>nd</i>	2,37	0,15
8. Fundición Galicia A	2,41	<i>nd</i>	83,73	<i>nd</i>	<i>tr</i>	<i>nd</i>	13,12	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,68	0,06
9. Fundición Galicia B	3,3	<i>nd</i>	85,4	<i>nd</i>	<i>tr</i>	<i>nd</i>	10,67	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,63	<i>tr</i>
10. Cementación	<i>nd</i>	<i>nd</i>	91,4	<i>tr</i>	<i>tr</i>	<i>nd</i>	8,12	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,5	<i>tr</i>

Se trata de gotas metálicas atrapadas en conglomerados de reducción. El contenido de elementos ligeros era de entre el 16 y el 41 % antes de la normalización, en su mayoría Ca y Si. La muestra de la prueba de Valdeplata tiene bastante escoria procedente del mineral, detectándose Ca y Si de la calcita y el cuarzo, K y Al de la moscovita identificada y también S, que en parte puede proceder de la brochantita (tab. 1). Aparece abundante Zn, Sb, Pb, As y Fe, elementos que en gran medida deben corresponder a óxidos de zonas de escoria. Hay presencia de Ag, Co y Bi.

La muestra de la prueba de Artajona es Cu (94%) acompañado por Fe y Pb y en menor medida Ag, As y Sn. En el caso de Casas de Esper, acompañan al Cu (98%) una pequeña cantidad de Fe, Pb, Ag y Sn. Finalmente, la muestra de El Cantalar tiene óxidos de Ca y Si debido a la presencia de cuarzo y calcita en el mineral. Los elementos principales son Pb y Cu debido a que parte del mineral utilizado estaba asociado a óxidos de plomo como la cerusita, aunque no fue detectado en la muestra de mineral analizada en la tabla 1.

## 5.2. Serie 2. Pruebas sobre la técnica de obtención de bronce

En esta serie la carga de mineral consiste en 100 g de malaquita y 50 g de casiterita en las correducciones, y 110 g de cobre electrolítico y 36 g de casiterita en la cementación (tab. 5). Los carbonatos de cobre provienen de Bou Beker (Marruecos), un mineral descrito en otra ocasión (Obón et al., 2020). Está acompañado por pequeñas cantidades de brochantita, calcopirita, óxidos de hierro y óxidos y sulfatos de plomo. La roca encajante es principalmente dolomía y cuarzo. La casiterita procede de Salamanca y de Galicia. La primera, asociada a cuarzo (tab. 1), se utiliza en la cementación y en la correducción 1. En la correducción 2 se introduce casiterita de Galicia que está asociada a moscovita.

Todas las pruebas tuvieron una duración total y temperaturas similares (ver 2.1 y tab. 6). El calentamiento del mineral fue algo superior en la correducción 1: 20 min. En las otras pruebas fue de 13,5 min. Al inicio de la inyección de aire, la temperatura se estabilizó en torno a los 900 °C en ambas correducciones e inferior a 800 °C en la cementación. El tiempo de ascenso térmico hasta alcanzar los 1000 °C fue corto, de 2 y 3 min en las correducciones y de 6 min en la prueba de cementación. La temperatura máxima fue en ambas superior a los 1250 °C y la duración de la meseta ha sido de 46 y 47 min. La temperatura media de la meseta fue ligeramente superior en la correducción 1, por encima de los 1100 °C.

La correducción 2 tuvo un resultado de 86 g de conglomerado de reducción con gotas metálicas recuperables, mientras que en la correducción 1 se recuperaron 96,6 g de material repartido en 44 g de metal y 53 g de escoria y mineral alterado. La fundición del metal obtenido en la correducción 2 tuvo una larga fase de ascenso térmico de 22 min, debido a que la carga metálica toma mucho calor, y una fase de meseta breve de 26 min. Una parte del material introducido fue fundido y analizado y el resto quedó adherido a las paredes del crisol (fig. 7, n. 13-14).

Las muestras de las correducciones analizadas por XRF son gotas metálicas extraídas de conglomerados de reducción (tab. 7). Las dos muestras de la prueba 1 (Salamanca) nos indican una composición con abundante plomo y hierro que podría proceder de la malaquita de Bou Beker, aunque solo la muestra B parece corresponder a un bronce pobre (3,4% de Sn). La muestra de correducción 2 (Galicia) es una gota de bronce (52% de Sn y 39% de Cu) adherida a escoria. También tiene bastante hierro (7%) y plomo (2,4%). Las dos muestras analizadas de la prueba de fundición con gotas de bronce obtenidas en la correducción 2, son dos goterones de bronce con entre 10 y 13%

de estaño. Todavía se detecta hierro (3%), plomo (0,7%) y elementos ligeros que proceden de impurezas residuales.

Un fragmento de conglomerado de reducción de Galicia ha sido analizado en el FESEM. Desafortunadamente, no se han detectado las formaciones de bronce que cabía esperar. Dentro de la muestra, hay una gota de cobre con numerosas inclusiones de cuprita globular (tab. 8). Otro fragmento presenta dos zonas claras. Una de ellas es metálica y está constituida por cobre con algo de estaño (0,6%) con inclusiones de bronce o de óxidos de cobre y estaño. Otra zona corresponde a moscovita

probablemente procedente de la ganga de la casiterita. En el contacto entre ambas zonas, la ganga presenta poros de gases en el proceso de vidriado (fig. 9). Se observan granos de casiterita junto a formaciones dendríticas de cuprita que reaccionan para dar formaciones dendríticas o globulares de bronce con entre el 10 y el 58,5% de estaño.

El resultado de la prueba de cementación es una torta metálica de 122 g con algo de casiterita adherida sin reducir (fig. 7, n. 12). No contiene hierro y el contenido de plomo es muy bajo (0,5%). En el FESEM, el análisis de área en el interior de la muestra indica un bronce

Tabla 8. Composición del metal bruto de las muestras experimentales, correducción 2 Galicia y cementación. Microanálisis en el FESEM puntuales representados en Figs. 9 y 10 y de área en otras zonas; % en peso como elemento; *nd* no detectado.

Prueba	Análisis	S	Fe	Cu	Sn	Inclusiones
Correducción 2	Fig. 9B_1	<i>nd</i>	0,2	90	9,8	-
Correducción 2	Fig. 9B_2	<i>nd</i>	<i>nd</i>	41,5	58,5	-
Correducción 2	área 1	<i>nd</i>	0,2	99,2	0,6	bronce, óxidos Sn-Cu
Correducción 2	área 2	<i>nd</i>	<i>nd</i>	100	<i>nd</i>	cuprita
Cementación	Fig. 10_1	<i>nd</i>	<i>nd</i>	99,3	0,7	-
Cementación	Fig. 10_2	<i>nd</i>	<i>nd</i>	87,4	12,6	-
Cementación	área	0,2	<i>nd</i>	95,9	3,9	Bi y Cu <sub>2</sub> S

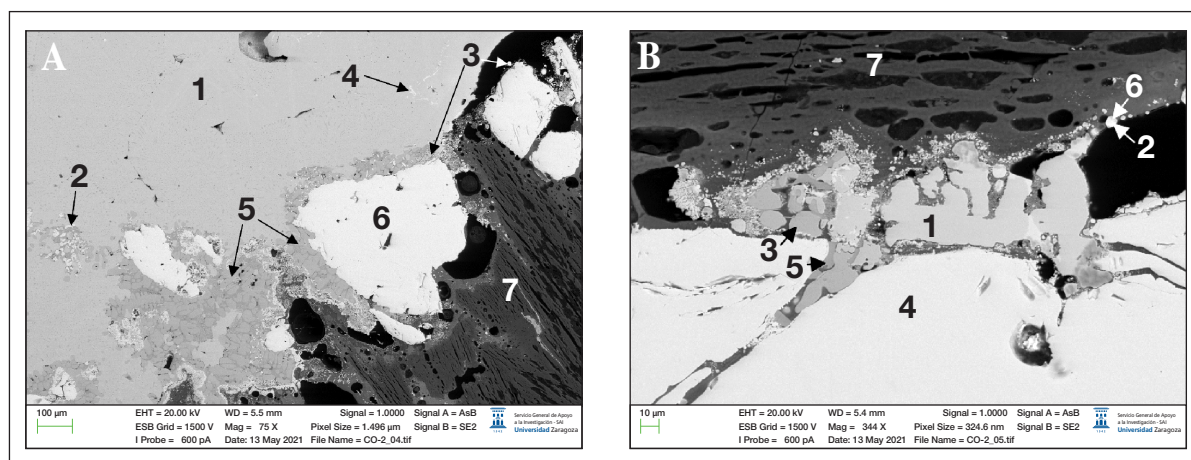


Figura 9. Imágenes SEM (electrones retrodispersados) de la muestra de la prueba de correducción 2 con casiterita de Galicia. A: 1) Cu; 2 y 3) Bronce; 4) Óxidos; 5) Cuprita; 6) Casiterita; 7) Moscovita. B: 1 y 2) Bronce, composición en tab. 8; 3) Cuprita; 4) Casiterita; 5) Óxidos (FeO, 33%; CuO, 55%; SnO<sub>2</sub>, 12%); 6) Óxidos (42% CuO, 58% SnO<sub>2</sub>); 7) Moscovita.



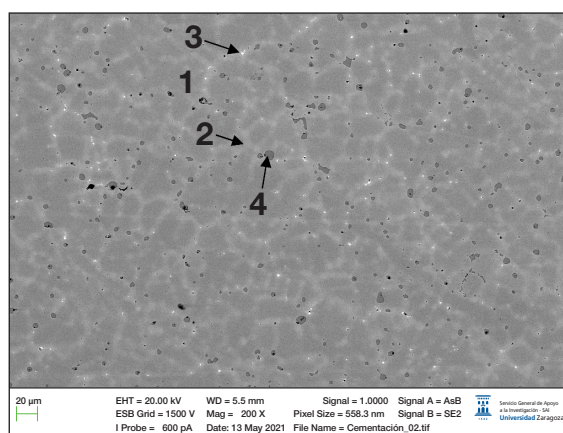


Figura 10. Imagen SEM (electrones retrodispersados) de la muestra de la prueba de cementación. 1 y 2) Bronce en zonas oscuras y claras, composición en tab. 8; 3) Inclusión con bismuto; 4) Inclusión sulfuro de cobre.

más pobre (4% de Sn) que en superficie (8% de Sn; tabs. 7 y 8). Se observa un metal de microestructura nucleada con núcleos de bronce (fase alfa) pobre en estaño, y una retícula de bronce (también fase alfa) con el 12,6% de dicho elemento (fig. 10). En el material de la retícula, que solidifica después que el de los núcleos por tener mayor proporción de estaño, se han acumulado impurezas de bismuto y  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El conjunto de materiales arqueometalúrgicos involucrados en la producción de bronce del valle medio del Ebro pertenecientes al Bronce Antiguo y Medio tiene características que manifiestan una continuidad con la tradición calcolítica, como ya se ha señalado (Rovira, 2011, p. 47). Algunos yacimientos citados con las dataciones más antiguas en relación con la aleación cobre-estaño, como Monte Aguilar, Moncín o Majaladares, presentan niveles campaniformes. Pese a que los minerales utilizados a veces contienen relictos de sulfuros, como sucede en una muestra de Monte Aguilar (tab. 1),

parece claro que se siguen utilizando minerales de cobre de tipo oxídico fácilmente accesibles. La transformación de estos minerales tiene lugar en el interior de recipientes cerámicos similares a los de uso doméstico. Los análisis realizados revelan, tanto en Moncín como en Monte Aguilar, el aprovechamiento de arcillas locales como es frecuente en el Calcolítico, en este caso ricas en óxido de calcio. Una temperatura media de 1100-1200 °C se alcanzaría en hogares sencillos y abiertos. En estas estructuras las condiciones *redox* son cambiantes produciéndose frecuentes episodios oxidantes como atestigua la muestra de Monte Aguilar PA4705, donde hay abundante magnetita y otros indicadores como gotas metálicas con un cerco de cuprita globular (fig. 4). En estos materiales las fases de escoria no pertenecen a una escorificación intencional, sino que son más bien materiales residuales introducidos por la ganga del mineral, las paredes de la cerámica y las cenizas. En las muestras analizadas, el material de estas fases, impurezas y compuestos aluminosilicatados ricos en CaO y MgO, tiene su origen en la cerámica como es el caso de la escoria de Moncín y la muestra de Monte Aguilar PA4713 (tab. 4), con pequeños aportes de la ceniza (CaO y  $\text{K}_2\text{O}$ ). En PA4705 el abundante hierro parece proceder del mineral.

Los resultados de este trabajo ofrecen algunos indicios sobre la procedencia de los minerales de cobre. Su valor debe ser corroborado con una serie más amplia de análisis de composición de las mineralizaciones descritas y análisis de isótopos de plomo. Es probable la explotación de mineralizaciones muy próximas como El Cantalar por parte de los asentamientos de Bardenas Reales. La muestra analizada coincide en la composición de atacamita y cuarzo con un fragmento de mineral de Monte Aguilar (tab. 1). En la muestra de reducción, el cobre está acompañado por plomo y hierro, elementos que, si bien aparecen en los fragmentos de conglomerado de reducción del yacimiento (tabs. 7 y AC1), están en mayor o

menor medida presentes en todas las mineralizaciones analizadas.

La presencia de arsénico en numerosos objetos y otros materiales arqueometalúrgicos de estos yacimientos (tabs. AC1-AC3) indica la probabilidad del uso de mineralizaciones como Valdeplata en Calcena. Un dato no desdeñable de la serie 1 experimental, pese a ser insuficiente un análisis por prueba, es que únicamente el metal obtenido con dicho mineral presenta una cantidad importante de As (6%), y del resto solo la muestra de Artajona contiene trazas (tab. 7). En las muestras de minerales de Valdeplata también se detecta cinc, antimonio, hierro, plomo y plata formando parte de minerales oxídicos. Los objetos y restos de Bardenas presentan, además de estaño y arsénico, una cierta cantidad de antimonio, hierro y plata, y en algunos casos plomo y níquel. El cinc no ha sido detectado en los fragmentos de conglomerado de reducción del valle medio del Ebro, aunque hay que señalar que es un elemento bastante volátil en las condiciones mencionadas (Tylecote et al., 1977). La concentración de níquel que aparece en gotas y objetos metálicos de Bardenas, aunque no se detectaba en restos intermedios del proceso, es coherente con el comportamiento de este elemento. También se concentra la plata, que aparece en las muestras arqueológicas y en todas las experimentales salvo en El Cantalar.

Sobre la técnica de obtención de bronce, se confirma la ausencia de evidencias de cofundición de cobre y estaño metálicos. Por otra parte, la asociación natural de casiterita y malaquita es más frecuente de lo que se esperaba, puesto que se ha detectado en el mineral de El Cantalar, Biel y sierra de Cameros y las muestras de reducción de Casas de Esper y Artajona contienen trazas de estaño, cinco muestras sobre siete procedencias diferentes. Aun así, la aleación natural es, en el estado actual de nuestro conocimiento, descartable, porque el contenido de casiterita es siempre muy bajo como

indica la ausencia de estaño en la muestra de El Cantalar (tabs. 1 y 7).

En la muestra de Monte Aguilar PA4713 aparecen relictos de casiterita que indican sin duda el uso de este mineral. Por lo tanto, si bien la cofundición está descartada (Gómez, 1999) la cuestión se centra en averiguar si el método habitual que se aplicaba consistía en reducir primero los minerales de cobre para luego cementar las gotas metálicas con casiterita en un crisol, o bien la correducción de minerales y la posterior fundición de las gotas de bronce obtenidas. Desafortunadamente, las muestras arqueológicas escogidas para el SEM presentan alteraciones postdeposicionales que dificultan su interpretación y los análisis realizados no ofrecen pruebas concluyentes sobre esta cuestión. Esta diferenciación entre correducción y cementación podría proporcionar datos importantes sobre el uso, distribución y consideración del mineral de estaño, gran desconocido del registro arqueológico, por parte de las comunidades del segundo milenio.

Aunque los datos experimentales de la serie 2 no son suficientes para determinar estigmas de la técnica utilizada, se ha comprobado al menos la eficacia de las operaciones cortas y sin una cantidad excesiva de combustible (Obón et al., 2020), uso abundante que se presupone debido a la necesidad de generar ambientes reductores para la reducción de casiterita en una estructura de combustión, la vasija-horno, que parece persistir en el Bronce Medio y Pleno (Gómez, 1999). La aplicación de las técnicas mencionadas puede dejar pocos restos de escoria siempre que los minerales de partida tengan poca ganga, como ha sucedido en las pruebas de cementación y correducción 2, cuyo resultado es principalmente bronce o casiterita sin transformar.

En unas horquillas cronológicas similares a Minferri (Juneda, Lleida) y levemente más modernas que la Bauma del Serrat del Pont (Tortellá, Girona), la producción de bronce en

la zona alta del valle medio del Ebro se concentra en Bardenas Reales y Muela de Borja, lo que permite sugerir la recepción independiente desde el suroeste francés o una rápida llegada desde los núcleos referidos de Cataluña.

A pesar de que, con excepciones (Rovira, 2011-2012), ha sido muy poco utilizada hasta ahora, la experimentación realista es una metodología de trabajo que puede aportar información fundamental para conocer mejor los aspectos tecnológicos de las primeras producciones de bronce y las razones de la adopción de la aleación, hecho que sin duda encierra motivaciones no reducibles a una única causa.

## 7. LISTA DE REFERENCIAS

- Aguilera Aragón, I. (2022). *La comunidad prehistórica de la Muela de Borja. 2550-1200 cal. ANE. Caesaraugusta*, 87. Institución Fernando el Católico. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_salduie/sald.2022227418](https://doi.org/10.26754/ojs_salduie/sald.2022227418)
- Andrés Rupérez, M. T. (1977). Los sepulcros megalíticos de Artajona. *Príncipe de Viana*, 148-149, 403-422.
- Armendáriz Aznar, R., Mateo Pérez, M. R. & Sáez de Albéniz Arregui, M. P. (1995-96). Prospección arqueológica del término municipal de Eslava. *Trabajos de Arqueología Navarra*, 12, 351-354.
- Armendáriz Aznar, R., Mateo Pérez, M. R. & Sáez de Albéniz Arregui, M. P. (1997). Santa Criz, una necrópolis romana de incineración en Eslava (Navarra). *Isturitz*, 9, 823-841.
- Ayala Juan, M. M. (1989). La irrigación y desarrollo agrícola de la comunidad argárica del poblado de llanura El Rincón de Almendricos. Lorca. Murcia. En L. Cara Barrionuevo (coord.), *El agua en zonas áridas. Arqueología e historia. Hidráulica tradicional de la provincia de Almería* (pp. 1-27). Instituto de Estudios Almerienses.
- Calvo Rebollar, M. (2009). *Minerales y minas de España. Vol. IV. Óxidos e hidróxidos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid & Fundación Gómez Pardo.
- Dungworth, D. (2000). Serendipity in the Foundry? Tin Oxide Inclusions in Copper and Copper Alloys as an Indicator of Production Process. *Bulletin of the Metals Museum*, 32, 1-5.
- Farci, C., Martín-Torres, M. & González Álvarez, D. (2017). Bronze production in the Iron Age of the Iberian Peninsula: The case of *El Castro*, Vigaña (Asturias, NW Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 11, 338-351. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.009>
- Fernández-Miranda, M., Montero Ruiz, I. & Rovira Llorens, S. (1995). Los primeros objetos de bronce en el occidente de Europa. *Trabajos de Prehistoria*, 52(1), 57-69. <https://doi.org/10.3989/tp.1995.v52.i1.431>
- Freestone, I. C. & Tite, M. S. (1986). Refractories in the ancient and preindustrial world. En W. D. Kingery (ed.), *High-Technology Ceramics: Past, Present, and Future* (vol. 3, pp-35-63). The American Ceramic Society.
- García Gazólaz, J., Sesma Sesma, J. & Tabar Sarrías, I. (2001). La fosa sepulcral de La Saga (Cáteda, Navarra). *Trabajos de Arqueología Navarra*, 15, 115-122.
- Gillot, T., Badía, D., Manso, J. A. & Cuchí, J. A. (2012). Nota sobre mineralizaciones en Monzorrobal (Ayerbe, Huesca). *Lucas Mallada: revista de ciencias*, 14, 193-200.
- Gómez Ramos, P. (1999). *Obtención de metales en la Prehistoria de la Península Ibérica* (BAR International Series, 753). British Archaeological Reports.



- Harrison, R. J. (2007). *Majaladares (Spain) A Bronze Age Village of Farmers, Hunters and Herders* (Internationale Archäologie, 107). Verlag Marie Leidorf.
- Harrison, R. J., Aguilera Aragón, I. & Moreno López, G. (1990). Excavaciones arqueológicas en un poblado de la Edad del Bronce en Siete Cabezas (Magallón, Zaragoza). *Cuadernos de Estudios Borjanos*, 23-24, 29-59.
- Harrison, R. J., Moreno Lopez, G. & Legge, A. J. (1994). *Moncín: un poblado de la Edad del Bronce (Borja, Zaragoza)*. Gobierno de Aragón, Departamento de Educación y Cultura.
- Iriarte Chiapusso, M. J. (1993). El entorno vegetal en Las Bardenas Reales (Navarra) durante la Prehistoria reciente. *Vasconia. Cuadernos de Historia-Geografía*, 20, 358-368.
- Iriarte Chiapusso, M. J. & Meaza, G. (1996). Las Bardenas Reales. Aproximación a la evolución del paisaje vegetal desde mediados del segundo milenio a. C. a la actualidad. En P. Ramil-Rego, C. Fernández & M. Rodríguez (coords.), *Biogeografía pleistocena-holocena de la Península Ibérica* (pp. 137-147). Xunta de Galicia, Consellería de Cultura.
- Jordá Bordehore, L. (2008). *La minería de los metales en la provincia de Madrid. Patrimonio minero y puesta en valor del espacio subterráneo* [Tesis doctoral inédita]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Jover Maestre, F. J., Pastor Quiles, M., Basso Rial, R. L., Martínez Monleón, S. & López Padilla, J. (2020). Sobre la racionalidad campesina en El Argar. Caramoro I como ejemplo de unidad básica de producción. En F. J. Jover, S. Martínez & J. A. López López (eds.), *La vida en la frontera argárica: el asentamiento de Caramoro I (Elche, Alicante)*. Museu de Prehistòria de València, Diputació de València.
- Llull Estarellas, B., Perelló Mateo, L., Guerrero Ayuso, V. M., Fullola Pericot, M., Petit i Mendizábal, M. A. & Calco Trias, M. (2019). Caracterización isotópica y elemental de los metales de la Cova des Pas (Ferrerries, Menorca). Una necrópolis de transición del Bronce Final al Hierro. *Trabajos de Prehistoria*, 76(1), 102-119. <https://doi.org/10.3989/tp.2019.12228>
- Maluquer de Motes, J. (1962). Cueva sepulcral de Urbiola. *Príncipe de Viana*, 88-89, 419-424.
- Mata-Perelló, J. M. & Puche Riart, O. (1992). Introducción al estudio de indicios cupríferos en Brieva de Cameros y en Ajamil (Sierra de Cameros, Cordillera Ibérica, La Rioja). *Geogaceta*, 12, 76-77.
- Martín Cóllega, A., Gallart Fernández, J., Rovira Hortalà, C. & Mata-Perelló, J. M. (1999). Nordeste. En G. Delibes & I. Montero (coords.), *Las primeras etapas metalúrgicas en la península ibérica. II. Estudios regionales* (pp. 115-177). Instituto Universitario Ortega y Gasset.
- Montes-Landa, J., Montero-Ruiz, I., Castanyer Masoliver, P., Santos Retolaza, M., Tremoleda Trilla, J. & Martínón-Torres, M. (2020). Traditions and innovations: versatility of copper and tin bronze making recipes in Iron Age Emporion (L'Escala, Spain). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12, 124. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01081-7>
- Montes-Landa, J., Murillo-Barroso, M., Montero-Ruiz, I., Rovira-Llorens, S. & Martínón-Torres, M. (2021). Interwoven traditions in Bell Beaker metallurgy: Approaching the social value of copper at Bauma del Serrat del Pont (Northeast Iberia). *Plos One*, 16(8), e0255818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255818>
- Obón Zúñiga, A. (2017). Historia de la investigación experimental sobre la metalurgia del cobre primitiva. *Salduie*, 17, 31-57. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_salduie/sald.2017176705](https://doi.org/10.26754/ojs_salduie/sald.2017176705)

Obón Zúñiga A., Berdejo Arcéiz, A. & Berdejo Arcéiz, V. (2020). Los inicios de la obtención de cobre en el suroeste europeo. Aproximación experimental a la metalurgia de Almizaraque (Almería). *Trabajos de Prehistoria*, 77(2), 284-302.

Ona Gonzalez, J. L. & Pérez Casas, J. A. (1985). Dos hachas de rebordes halladas en la Bardena de Cáseda. *Trabajos de Arqueología Navarra*, 4, 33-40.

Pérez-Lambán, F., Fanlo Loras, J. & Picazo Millán, J. V. (2010). El poblamiento antiguo en el valle del río Huerva. Resultados de las campañas de prospección de 2007-2009. *Salduie*, 10, 285-315. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_salduie/sald.2010106621](https://doi.org/10.26754/ojs_salduie/sald.2010106621)

Pérez-Lambán, F., Picazo Millán, J. V. & Fanlo Loras, J. (2018). El Collado de la Abeja. Una aldea agrícola en llano del Bronce Medio. En II Congreso CAPA, Arqueología y Patrimonio Aragonés, 2017, Zaragoza, *Actas: 9 y 10 de noviembre de 2017* (pp. 127-138). Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras y en Ciencias de Aragón.

Rademakers, F. W. & Farci, C. (2018). Reconstructing bronze production technology from ancient crucible slag: experimental perspectives on tin oxide identification. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 18, 343-355. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.01.020>

Rodríguez de la Esperanza, M. J. (2005). *Metalurgia y metalúrgicos en el valle del Ebro (c. 2900-1500 cal. a. C.)*. Real Academia de la Historia & Institución Fernando el Católico.

Rodríguez Díaz, A., Pavón Soldevila, I., Duque Espino, D. M., Hunt Ortiz, M. A., Ponce de León Iglesias, M., Vázquez Paz, J., Márquez Gallardo, J. M. & Rodríguez Mellado, J. (2014). La minería protohistórica en Extremadura. El

caso del estaño en el cerro de San Cristóbal de Logrosán (Cáceres). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 24, 167-201.

Rovira, S. (2007). La producción de bronce en la Prehistoria. En J. Molera et al. (eds.), *Avances en Arqueometría. Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría (Girona, 2005)* (pp. 21-35). Universidad de Girona.

Rovira, S. (2011). Contribution of the analytical work to the knowledge of the early metallurgy in the Iberian Peninsula. En C. Giardino (coord.), *Archeometallurgia: dalla conoscenza alla fruizione* (Beni archaeologici, 8) (pp. 43-55). Edipuglia.

Rovira S. (2011-2012). Arqueometalurgia experimental en el departamento de Prehistoria y Arqueología de la UAM. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la UAM*, 37-38, 105-120. <https://doi.org/10.15366/cupauam2012.38.005>

Rovira, S. & Montero, I. (2003). Natural tin-bronze alloy in Iberian Peninsula metallurgy: potentiality and reality. En A. Giumliamair & F. Lo Schiavo (eds.), *Le problème de l'étain à l'origine de la métallurgie* (BAR International Series, 1199) (pp. 15-22). Archaeopress.

Rovira Llorens, S., Montero Ruiz I. & Consuegra Rodríguez, S. (1997). *Las primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica. I. Análisis de materiales*. Instituto Universitario Ortega y Gasset.

Sesma Sesma, J. (2004). Estructuras de habitación en las Edad del Bronce del Alto Valle del Ebro y áreas circundantes, apuntes sobre su evolución. En M. Hernández & L. Hernández (coords.), *La Edad del Bronce en tierras valencianas y zonas limítrofes* (pp. 613-627). Instituto Alicantino de Cultura Juan Gil Albrecht & Ayuntamiento de Villena.

- Sesma Sesma, J. & García García, M. L. (1994). La ocupación desde el Bronce Antiguo a la Edad Media en las Bardenas Reales de Navarra. *Cuadernos de Arqueología de la Universidad de Navarra*, 2, 89-218. <https://doi.org/10.15581/012.2.27828>
- Sesma Sesma, J. & García García, M. L. (2002). Los yacimientos de Covaza y Picarana (Pitillas, Navarra). Algunos datos sobre la Edad del Bronce en la Navarra Media. *Trabajos de Arqueología Navarra*, 16, 15-44.
- Sesma Sesma, J. & García García, M. L. (2006). Llanos de Escudero II. Una cista de la Edad del Bronce en las Bardenas Reales de Navarra. *Revista del Centro de Estudios Merindad de Tudela*, 14, 7-24.
- Sesma Sesma, J., García Gazólaz, J. & Tabar Sarrías, M.<sup>a</sup> I. (2007-2008). Vasos geminados de la Edad del Bronce en Navarra. *Veleia*, 24-25, 925-936.
- Soriano, I. & Escanilla, N. (2016). Can Mur (Barcelona). Crisoles con sistema de presión y la metalurgia de la Edad del Bronce en el nordeste de la Península Ibérica. *Trabajos de Prehistoria*, 73(1), 160-179. <https://doi.org/10.3989/tp.2016.12169>
- Subías Pérez, I. (1990). Las minas de Calcena. *Cuaderno de Estudios Borjanos*, 23-24, 185-200.
- Subías Pérez, I., Fernández-Nieto, C. & González López, J. M. (1989). Mineralogía de las areniscas cupríferas de Biel (Zaragoza). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 12, 315-327.
- Subías Pérez, I., López Ciriano, A., Fanlo González, I. & Fernández-Nieto, C. (1994). La mineralización de Pb-Zn-Cu-Ag de Valdeplata (Calcena, Zaragoza). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 17, 95-102.
- Subías, I., Fanlo, I., Mateo, E. & García-Veigas, J. (2003). A model for the diagenetic information of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Aragón (NE Spain): S/C ratios and Sulphur isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 23, 55-70. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(03\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(03)00014-3)
- Tylecote, R. F., Ghaznavi, H. A. & Boydell, P. J. (1977). Partitioning of trace elements between the ores, fluxes, slags and metal during the smelting of copper. *Journal of Archaeological Science*, 4(4), 305-333. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(77\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0305-4403(77)90027-9)
- Valério, P., Monge Soares, A. M., Silva, R. J. C., Araújo, M. F., Rebelo, P., Neto, N., Santos, R. & Fontes, T. (2013). Bronze Production in Southwestern Iberian Peninsula: The Late Bronze Age Metallurgical Workshop from Entre Águas 5 (Portugal). *Journal of Archaeological Science*, 40, 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.07.020>
- Vindel, E. (1982). Estudio mineralógico y metalogénico de las mineralizaciones de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español). *Boletín Geológico y Minero*, 93(2), 120-145.

## 8. ANEXO

Tabla AC1. Resultado de los análisis por XRF existentes a restos de actividad metalúrgica del Bronce Antiguo y Medio del valle medio del Ebro.

Yacimiento	Análisis	Tipo de objeto	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	LE	Fuente
Monte Aguilar I	PA4695A	mineral Cu	5,55	nd	91,85	nd	2,51	tr	nd	0,1	nd	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4695B	mineral Cu	2,8	nd	97,09	nd	nd	0,02	nd	0,09	nd	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4692A	conglomerado red.	25,58	nd	61,5	nd	10,8	tr	0,09	1,32	0,74	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4692B	conglomerado red.	18,59	nd	69,24	nd	8,99	0,07	0,14	0,94	2,04	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4696	conglomerado red.	0,73	nd	94,7	nd	0,47	0,3	nd	0,07	3,78	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4706	conglomerado red.	9,75	nd	78,75	nd	6,08	0,5	2,41	2,48	tr	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4693	conglomerado red.	32,73	nd	64,75	nd	nd	0,15	0,26	0,15	1,96	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4705A	adherencia cer.	3,74	nd	89,18	nd	0,85	0,45	2,17	3,6	nd	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4705B	adherencia cer.	5,96	nd	90,1	nd	1,1	0,28	1,10	1,21	nd	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4713	adherencia cer.	1,17	nd	48,5	nd	nd	nd	50,28	nd	nd	-	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar II	PA4854	adherencia cer.	2,57	nd	94,94	nd	2,29	nd	0,10	0,10	nd	-	Rovira et al., 1997
Puy Aguila I	PA4717	conglomerado red.	det	nd	det	nd	nd	det	nd	det	det	-	Rovira et al., 1997
Puy Aguila II	PA4720	adherencia cer.	2,38	nd	97,5	nd	nd	0,01	0,08	0,04	nd	-	Rovira et al., 1997
Guillizo de Abajo II	PA4687A	gota metálica	0,12	0,16	93,55	nd	nd	0,02	6,13	0,02	nd	-	Rovira et al., 1997
Guillizo de Abajo II	PA4687B	gota metálica	0,08	0,13	92,7	nd	nd	0,01	6,74	0,05	nd	-	Rovira et al., 1997
Portillo Lobo	PA4686	gota metálica	0,16	0,07	83,05	nd	nd	nd	16,69	0,02	nd	-	Rovira et al., 1997
Valdenovillas II	PA4721	adherencia cer.	2,99	nd	95,8	nd	nd	0,01	0,86	0,32	nd	-	Rovira et al., 1997
Majaladares Ext.	VIII; C, lay 1; 181	adherencia cer.	11,5	nd	5,33	nd	0,01	nd	nd	nd	0,03	81,6	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	VIII; C, lay 1; 182	adherencia cer.	14,9	nd	1,2	0,01	0,89	nd	nd	nd	0,04	82,4	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	VII; C, lay 2; 485	adherencia cer.	4,75	nd	3,89	nd	0,29	nd	nd	nd	0,01	90,7	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	V; F, lay 1; 948	adherencia cer.	5,12	nd	1,2	nd	nd	nd	nd	nd	0,02	93,2	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	VIII; F, lay 1; 999	adherencia cer.	11,6	nd	2,35	nd	0,59	nd	nd	nd	0,03	81,1	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	III; A, lay 4; 57	adherencia cer.	3,84	0,02	7,01	nd	0,13	nd	nd	nd	0,03	88,9	Harrison, 2007
Moncín	I; VI; A	adherencia cer.	28	nd	38	nd	33	nd	nd	nd	1	-	Harrison, 2007
Moncín	IIA; I; A	adherencia cer.	64	nd	36	nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIA; VI; C	adherencia cer.	7	nd	92	nd	1	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIA; VI; 1479; A/B	adherencia cer.	72	nd	25	nd	3	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIA; VI; B	adherencia cer.	60	nd	28	nd	12	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994

Yacimiento	Análisis	Tipo de objeto	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	LE	Fuente
Moncín	IIA; VI; 1517; D	adherencia cer.	0,5	nd	96	nd	3,5	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIC; I; 313; C	adherencia cer.	nd	nd	det.	nd	det.	nd	det.	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIC; VI; A	adherencia cer.	21	nd	65	nd	14	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIC; X; A	adherencia cer.	nd	nd	det.	nd	det.	nd	det.	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	II E; VIII; B	adherencia cer.	64	nd	15	nd	21	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	II E; VIII; B	adherencia cer.	13	nd	52	nd	35	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; A	adherencia cer.	94	nd	6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; ζ	adherencia cer.	det.	nd	det.	nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; C	adherencia cer.	56	nd	43	nd	1	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; B	adherencia cer.	1	nd	94	nd	5	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; A	adherencia cer.	7	nd	88	nd	5	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; 789; A	adherencia cer.	2	nd	87	nd	11	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; A	adherencia cer.	1	nd	95	nd	4	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I; B	adherencia cer.	82	nd	15	nd	3	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; VIII; 1146; ζ	adherencia cer.	det.	nd	det.	nd	det.	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIA; VIII; 1282; C	adherencia cer.	35	nd	65	nd	nd	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	III; IX; 1944; B	adherencia cer.	9	nd	44	nd	12	nd	35	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IVA; VIII; A	adherencia cer.	5	nd	95	nd	nd	nd	nd	nd	8	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IVA; VIII; B	adherencia cer.	26	nd	73	nd	1	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IVA; VIII; D	adherencia cer.	det.	nd	det.	nd	det.	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IIC; I	gota metálica 0,5 g	3	nd	94	nd	3	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I	gota metálica 14,8 g	2	nd	93	nd	0,3	nd	5	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I	gota metálica 0,1 g	0,2	nd	89	nd	0,1	nd	10	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I	gota metálica 36,8 g	1	nd	78	nd	0,1	nd	20	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; I	gota metálica 25,1 g	6	nd	94	nd	0,1	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Moncín	IID; VIII	gota metálica 9,6 g	det.	nd	det.	nd	det.	nd	nd	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Siete Cabezos	39044R Cuadro 1900	adherencia cer.	nd	nd	det.	nd	tr	nd	det.	nd	nd	-	Harrison et al., 1994
Calcena Mina Valdeplata	PA24097 a 24101	media 5 fr. mineral (8 análisis)	2,32	0,07	16,2	2,18	0,40	nd	nd	nd	0,32	78,17	Aguilera, 2017

Tabla AC2. Resultado de los análisis por XRF existentes a objetos de la Edad del Bronce de Bardenas.

Yacimiento	Análisis	Tipo de objeto	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Fuente
Monte Aguilar I	PA4689	fragmento de punzón	0,164	nd	96,95	nd	2,341	0,007	nd	0,215	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4690	fragmento de punzón	0,055	nd	96,2	nd	tr	tr	3,564	0,139	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4702	fragmento de punzón	0,056	nd	98,9	nd	0,877	tr	0,062	0,123	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4708	fragmento de punzón	0,102	nd	97	nd	nd	0,267	2,452	0,018	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4711	fragmento de punzón	0,063	nd	87,42	nd	nd	0,014	12,41	0,074	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4698	punzón	0,131	0,095	92,65	0,168	0,335	0,007	5,942	0,058	0,464	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4710	punzón	0,147	nd	95,81	nd	nd	nd	4,025	0,017		Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4714	punzón	0,08	nd	98,8	nd	0,628	nd	0,315	0,123	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4699	punzón biapuntado	0,081	0,123	98,93	nd	0,661	nd	0,076	0,121	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4712	punzón biapuntado	0,157	0,158	98,39	nd	0,976	nd	nd	0,123	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4691	fragmento de lámina	0,065	nd	92,28	nd	nd	0,019	7,551	0,084	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4697	Viruta	0,134	nd	94,18	nd	nd	nd	5,669	0,009	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4700	fragmento de anillo	0,168	0,084	93,07	nd	0,646	0,027	5,96	0,108	0,218	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4701	anillo dos vueltas	0,196	0,086	93,32	nd	0,485	0,021	5,298	0,099	0,327	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4703	remache	0,111	nd	98	nd	1,46	nd	nd	0,408	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4704	remache	nd	nd	97,3	nd	2,285	0,027	nd	0,397	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar I	PA4709	puñal 2 remaches	0,138	0,049	96,78	nd	nd	nd	2,933	0,103	nd	Rovira et al., 1997
Monte Aguilar II	PA4684	grapa	0,09	nd	92,53	nd	nd	0,017	7,364	nd	tr	Rovira et al., 1997
Puy Aguila IV	PA4716	fragmento de puñal	0,366	nd	97,32	nd	1,609	0,097	0,012	0,572	nd	Rovira et al., 1997
Puy Aguila IV	PA4724	Punzón	0,122	nd	97,35	nd	nd	nd	1,627	0,022	0,814	Rovira et al., 1997
Valdenovillas II	PA4722	punzón	0,628	nd	97,2	nd	nd	0,064	1,292	0,801	nd	Rovira et al., 1997
Cuatro Cabañas II	PA4671	Hoja de puñal	0,032	nd	98,17	nd	nd	0,029	nd	0,454	1,32	Rovira et al., 1997
Punta del Olmo IV	PA4685	Lámina plegada	0,263	0,077	98,72	0,172	0,182	0,064	0,137	0,217	0,166	Rovira et al., 1997
Roncalesa I	PA4682	Lezna	0,061	tr	96,09	nd	3,411	0,016	nd	0,134	nd	Rovira et al., 1997
Roncalesa II	PA4681	Punta de aletas	0,05	nd	99,15	nd	nd	0,023	1,695	0,088	nd	Rovira et al., 1997
Bardenas	PA4723	indet.	0,181	nd	63,09	nd	nd	0,237	nd	8,451	28,04	Rovira et al., 1997
Artajona (mina de Farangortea)	PA4864	Punzón biapuntado	0,106	0,101	98,37	nd	1,409	0,012	nd	0,005	nd	Rovira et al., 1997

Yacimiento	Análisis	Tipo de objeto	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Fuente
Navarra	PA4858	Hacha Plana	0,06	0,06	98,58	<i>nd</i>	1,27	0,001	0,01	0,003	<i>nd</i>	Rovira et al., 1997
Navarra	PA4871	Hacha Plana	<i>tr</i>	<i>tr</i>	87,82	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,047	12,14	<i>tr</i>	<i>nd</i>	Rovira et al., 1997
Navarra	PA4872	Hacha Plana	0,11	0,17	86,51	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,03	12,75	0,01	0,42	Rovira et al., 1997
Navarra	PA4873	Hacha Plana	0,07	0,24	92,65	<i>nd</i>	0,23	<i>nd</i>	6,6	0,197	<i>nd</i>	Rovira et al., 1997
Navarra	PA4874	Hacha Plana	0,17	0,11	93,73	<i>nd</i>	<i>nd</i>	0,765	5,06	0,167	<i>nd</i>	Rovira et al., 1997
Navarra	PA4881	Hacha de rebordes	<i>tr</i>	0,19	89,98	<i>nd</i>	0,11	0,112	9,6	<i>tr</i>	<i>tr</i>	Rovira et al., 1997



Tabla AC3. Resultado de los análisis por XRF existentes a objetos de la Edad del Bronce de la Muela de Borja.

Yacimiento	Análisis	Tipo de objeto	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Fuente
Cueva Majaladares	PA5780	Hacha plana (fr talón)	0,057	nd	99,42	0,476	0,009	0,015	0,018	nd	PA 1
Cueva Majaladares	PA5588	Hacha plana	0,032	nd	99,7	0,155	0,017	tr	0,015	nd	PA 1
Cueva Majaladares	PA5585	Punta de aletas	0,025	nd	99,22	0,643	0,002	nd	0,008	nd	PA 1
Majaladares Ext.	II; F. lay 5; 376	Punzón	nd	0,15	97,6	1,9	nd	nd	nd	0,2	PA 2
Majaladares Ext.	II; F. lay 5; 377	Puñal escotaduras	nd	0,93	96,8	2,03	nd	nd	nd	0,15	PA 2
Majaladares Ext.	III; F. lay 4; 378	Punzón/espátula	nd	3,57	93,8	2,14	nd	nd	nd	0,2	PA 2
Majaladares Ext.	V; C, lay 3; 381	Hacha plana A	nd	nd	99,6	0,51	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	V; C, lay 3; 381	Hacha plana B	0,032	nd	99,7	0,155	0,017	tr	0,015	nd	PA 1
Majaladares Ext.	V; C, lay 3; 382	Hacha plana rota A	nd	nd	99,6	1,55	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Majaladares Ext.	V; C, lay 3; 382	Hacha plana rota B	0,057	nd	99,42	0,476	0,009	0,015	0,018	nd	PA 1
Majaladares Ext.	VI; A, f 22; 367	Punta lanza tubo	0,2	nd	83,4	3,86	nd	11,8	nd	0,81	PA 2
Majaladares Ext.	VII; A, lay 2; 375	Filo cincel	nd	0,06	89,2	0,54	nd	11,8	nd	0,81	PA 2
Cueva Majaladares II	I; 2A	Punzón	nd	0,09	84,5	0,1	nd	14,8	nd	0,59	Aguilera, 2017
Cueva Majaladares II	II; 6A	Punzón	nd	0,39	98,8	0,44	nd	nd	nd	0,34	Aguilera, 2017
Cueva Majaladares II	III; 2A	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	97,2	2,28	0,1	nd	nd	0,52	Aguilera, 2017
Fuente de Arbolitas	–	Gota derrame molde	1,46	nd	97,3	1,27	nd	nd	nd	0,06	Aguilera, 2017
Era del Diablo	–	Puñal de lengüeta	0,26	nd	98,6	0,6	nd	nd	nd	0,58	Aguilera, 2017
Moncín	PA5582	Punta de aletas	0,053	0,063	98,8	0,882	0,042	nd	0,116	nd	PA 1
Moncín	I; E; 534	Punta pedúnculo y muescas	nd	nd	77	nd	nd	22,6	nd	0,37	PA 2
Moncín	II; V; 483	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	86,5	nd	1,59	11,3	nd	0,55	PA 2
Moncín	IIA; I; 564	Brazalete	nd	nd	det.	nd	nd	det.	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA; VIII; 981	Cuchillito?	nd	nd	det.	nd	nd	det.	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA; VIII; 1017	Punta de lanza?	nd	nd	det.	nd	nd	det.	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA; III; 405	Punta pedúnculo y aletas	0,04	nd	98,3	1,6	nd	nd	nd	0,1	PA 2
Moncín	IIA; VI; 1421	Punzón	nd	nd	89	nd	nd	10	nd	1	Harrison, 2007
Moncín	IIA; VI; 1420	Fr punzón	nd	nd	99	1	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA; VI; 1480	Punzón	nd	nd	96	3	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA; X; 1649	Punta cuchillo?	nd	nd	80	nd	nd	10	nd	5,6	Harrison, 2007
Moncín	IIA; X; 1650	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	99	tr	nd	tr	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA; X; 1682	Punzón	nd	nd	94	nd	nd	6	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIA?; H; 2043	Punzón	nd	nd	99	nd	nd	tr	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIB; X; 1737	Punta flecha piramidal	nd	nd	99	tr	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIB; X; 1787	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	90	nd	nd	10	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIC; I; 270	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	96	tr	nd	1	nd	nd	Harrison, 2007



Yacimiento	Análisis	Tipo de objeto	Fe	Ni	Cu	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Fuente
Moncín	IID; I; 788	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	99	nd	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IID; I; 784	Remache	nd	nd	67	nd	nd	32	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IID; I; 783	Punta cincel	nd	nd	85	nd	nd	15	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IID; I; 786	Punzón	nd	nd	90	nd	nd	9	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IID; I; 787	Punzón	nd	nd	76	nd	nd	22	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IID; VIII; 1137	Punzón	nd	nd	98,2	nd	nd	1,27	nd	0,5	PA 2
Moncín	IID; VIII; 1891	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	det.	tr	nd	det.	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IID; VIII; 1182	Punzón	0,07	0,07	93	0,1	nd	6,69	nd	0,09	PA 2
Moncín	IID; VIII; 1183	Punzón	0,04	nd	98,3	1,6	nd	nd	nd	0,1	PA 2
Moncín	IID; VIII; 1184	Punzón	nd	nd	94	nd	nd	6	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	IIE; VIII; 1259	Punta pedúnculo y aletas	nd	nd	84	nd	nd	13	nd	2	Harrison, 2007
Moncín	IIE; X; 1806	Chatarra	nd	nd	99	0,5	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín	III; IV; 475	Punta flecha pedúnculo largo	0,15	nd	99,3	0,43	nd	nd	nd	0,08	PA 2
Moncín	IVA; X; 1865	Punta pedúnculo aletas y nervio	nd	nd	99	0,6	nd	nd	nd	nd	Harrison, 2007
Moncín Cueva	En superficie	Fr hoja cuchillo	nd	0,05	87,2	0,22	nd	12,2	nd	0,21	PA 2
Moncín Ext.	En superficie	Punzón	nd	nd	98,3	1,3	nd	nd	nd	0,41	PA 2
Moncín Ext.	En superficie	Punzón	nd	nd	98,1	1,05	0,7	nd	nd	0,15	PA 2
Siete Cabezos	39044R; Cuadro 340	Punta de flecha	nd	tr	88	1	nd	9	1	nd	Harrison et al., 1990
Valchica (Ejea)	PA5586	Hacha plana	0,041	0,057	99,37	0,373	0,016	nd	0,144	nd	PA1
Valdunchil (Sos)	PA5577	Punta palmela	nd	nd	99,7	0,263	0,011	tr	0,016	nd	PA1

