

## DETERMINACIÓN MEDIANTE pXRF DE LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE ALGUNAS PIEZAS METÁLICAS DEL MUSEO DE HUESCA<sup>1</sup>

María José ARBUÉS GRACIA\*

María ALONSO LESCÚN\*\*

Silvia ABAD VILLARROYA\*\*\*

Pablo MARTÍN RAMOS\*\*\*\*

José Antonio CUCHÍ OTERINO\*\*\*\*

**RESUMEN** El presente artículo muestra los resultados de la aplicación de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X a una miscelánea de objetos metálicos depositados en el Museo de Huesca. Los resultados reflejan la heterogeneidad de las piezas, ofrecen información sobre su composición, responden a alguna pregunta y abren otras.

---

\* Conservación preventiva y restauración. Museo de Huesca. mjarbues@aragon.es

\*\* Departamento de Documentación. Museo Arqueológico Nacional. maria.alonsolescun@cultura.gob.es

\*\*\* Conservación e investigación. Departamento de Arqueología del Museo de Huesca. sabadv@aragon.es

\*\*\*\* Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural de la Universidad de Zaragoza. pmr@unizar.es, cuchí@unizar.es

<sup>1</sup> Se agradece el permiso de la dirección del Museo de Huesca para la realización del estudio, así como la buena disposición del Museo Diocesano de Huesca para el análisis de una amatista episcopal. Las fotografías son del archivo del Museo de Huesca. El equipo XRF empleado fue financiado con una de las Becas Leonardo a Investigadores y Creadores Culturales 2019 de la Fundación BBVA, si bien esta no se responsabiliza de las opiniones, los comentarios y los contenidos vertidos en este artículo, los cuales son total y absoluta responsabilidad de sus autores.

**PALABRAS CLAVE** Piezas arqueológicas. Composición elemental. pXRF. Metales. Museo de Huesca.

**ABSTRACT** This paper presents the results of the characterization through portable X-ray fluorescence spectroscopy of a miscellany of metallic objects deposited in the Museum of Huesca. The results reflect the heterogeneity of the pieces, offer information on their composition, answer some questions, and open others.

**KEYWORDS** Archeological objects. Elemental composition. pXRF. Metals. Museum of Huesca.

Desde finales del siglo XVIII se ha aplicado el análisis químico para caracterizar la naturaleza de los hallazgos arqueológicos. La evolución de la química analítica y de la fisicoquímica ha permitido obtener interesantes resultados, aunque en una primera fase se requería la destrucción, al menos parcial, de las piezas estudiadas, con los más que razonables reparos y las objeciones de la comunidad museística. Sin embargo, el desarrollo de técnicas no destructivas de diversos tipos ha generado interesantes avances en la caracterización de piezas arqueológicas. Además, desde 1990 los procesos de informatización y miniaturización han hecho posible la obtención de equipos portátiles para llevar a cabo los estudios sin necesidad de realizar desplazamientos de piezas delicadas, voluminosas o muy valiosas hasta laboratorios situados fuera de los museos.

La técnica consiste en la identificación de rayos X secundarios (o fluorescentes) emitidos por un material cuyos átomos han sido excitados por rayos X de alta energía. Este método, que proporciona resultados sobre la composición elemental de la superficie de los objetos, en especial de los metales, se basa en los descubrimientos realizados por Röntgen, Barkla y Moseley en el primer tercio del siglo XX. Hacia 1940 comienza a utilizarse de forma práctica para el análisis elemental y en las décadas siguientes se comercializan los primeros espectrómetros. Los sucesivos avances en electrónica e informática y el desarrollo de detectores más sofisticados han propiciado su utilización en numerosos campos de la industria, la investigación y la conservación de patrimonio. El desarrollo de los equipos portátiles ha favorecido su uso, y son numerosos los trabajos científicos que han empleado esta técnica en piezas arqueológicas (Guerra, 1998; Janssens *et alii*, 2000; Frahm y Doonan, 2013; Ferretti *et alii*, 2007; Smith *et alii*, 2011; Fernandes, Os y Huisman, 2013).

El presente artículo se centra en el uso de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (pXRF) en diversas piezas metálicas del Museo de Huesca con el fin de

incrementar la información disponible sobre ellas. Una parte de estas, de plomo, ya han sido objeto de un estudio isotópico publicado en Martín Ramos *et alii* (2020). El objetivo perseguido en este trabajo es mejorar en lo posible el conocimiento de su naturaleza, teniendo en cuenta las limitaciones de la técnica.

## MÉTODOS ANALÍTICOS

La composición multielemental de las piezas fue obtenida *in situ* mediante un espectrómetro de rayos X portátil, modelo Niton XL3t Gold+, de ThermoFisher (Waltham, Massachusetts, Estados Unidos), empleando, en la mayoría de los casos, el modo de medida *mining*, con tiempos de detección superiores a los 60 segundos y una apertura del colimador de 3 milímetros. Alguna pieza no metálica (piedra del anillo NIG 08216) se ha analizado en modo *suelo*. El equipo es capaz de determinar la presencia de elementos con número atómico por encima del magnesio (inclusive). Los elementos por debajo de este (como carbono, oxígeno, flúor o sodio) aparecen englobados como *bal*. No se obtienen resultados de combinaciones de elementos. Por ejemplo, el equipo da el contenido total de azufre, pero no diferencia entre el existente en forma de sulfato y el que aparece en forma de sulfuro.

Los resultados se presentan en tantos por ciento para cada elemento analizable, tal como los proporciona el equipo y sin hacer transformación alguna. Esto supone que los contenidos de elementos metálicos son inferiores a los que se obtendrían de cálculos llevados a cabo prescindiendo de los elementos alcalinotérreos de las especies térreas acompañantes. Tales cálculos, que afectan a numerosos informes y publicaciones por su fácil realización mediante simples reglas de tres, ofrecen contenidos gratificados para los elementos metálicos, conllevan una pérdida sustancial de información, dado que no se puede efectuar el proceso inverso sin conocer el contenido porcentual de los eliminados, y dificultan la realización de comparativas con otros trabajos. En relación con este último aspecto, el de la comparación de resultados, es preciso tener en cuenta las diferencias introducidas por diversas causas de error, como son la heterogeneidad original de los fundidos metálicos utilizados para una misma pieza mediante métodos artesanales o los efectos derivados de la corrosión y de algunos tipos de restauraciones. Por último, las comparaciones también se complican cuando los resultados se obtienen por diferentes técnicas analíticas.

### PIEZAS ANALIZADAS

Se ha analizado un conjunto heterogéneo de piezas metálicas procedentes de los fondos del Museo de Huesca. Pueden verse detalles sobre ellas en Alonso *et alii* (2020) y en la tabla 1. La información es variable, dado que algunas proceden de excavaciones recientes, mientras que otras son hallazgos antiguos y donaciones. Algunas han sido objeto de procesos de conservación y restauración.

<i>NIG</i>	<i>Imagen</i>	<i>Origen</i>	<i>Otra información</i>
11290	 Figura 1.1	Pza. Universidad, Huesca Julia Justes	Grapa de plomo formada por dos láminas con terminaciones curvas unidas en sus extremos.
04087	 Figura 1.2	Solar de la Diputación Provincial de Huesca Carlos Esco, Josefa Murillo	Grapa romana realizada en lámina de plomo de forma irregular doblada por uno de sus extremos.
12412	 Figura 1.3	Solar de la Diputación Provincial de Huesca Carlos Esco, Josefa Murillo	Dos piezas de plomo romano: una ficha circular (12412 a) y una lámina de forma irregular doblada por la mitad y remachada (12412 b).
8961	 Figura 1.4	C/ Aínsa, 14-16, y c/ Ricafort, Huesca Julia Justes	Aparejo romano de plomo, seccionado en dos, con ambos extremos terminados en punta: pieza en anzuelo (08961 a) y pieza en punta (08961 b).
11626	 Figura 1.5	La Filada, Lanaja Francisco Pérez Guil	Dos fragmentos de forma irregular realizados en plomo romano: pieza redonda gruesa (11626 a) y pieza plana (11626 b).
12413	 Figura 1.6	C/ Santiago – c/ Boyrie, Huesca Nieves Juste	Pieza de plomo, posiblemente un <i>pondus</i> romano.

NIG	Imagen	Origen	Otra información
12410	 Figura 1.7	Labilolosa, La Puebla de Castro María Ángeles Magallón	Placas de plomo romano de forma cuadrangular con perforación central circular que formaban parte del sistema de calefacción de las termas de Labitolosa: pieza en L (12410 a), pieza en C (12410 b) y pieza en O (12410 c).
04135	 Figura 1.8	Huesca	Fragmento de tubería o <i>fistulae plumbeae</i> romana de sección circular. Plancha de plomo enrollada. En corte fresco.
04100	 Figura 1.9	Labilolosa, La Puebla de Castro María Ángeles Magallón, Pierre Sillières	Aro macizo realizado en plomo que se apoya sobre tres pequeñas patas de sección circular dispuestas equidistantes entre sí. Sala del <i>frigidarium</i> de las termas.
06985	 Figura 1.10	Puyalcalá, Alcubierre	Lámina de plomo recortada en forma de palma de mano abierta. Ca. siglo II a. C. Cultura íbera.
01066	 Figura 1.11	Catedral, Huesca Donación de la Comisión Provincial de Monumentos de Huesca	Fragmento romano de brazo derecho de dimensiones monumentales realizado en bronce. Hallado en 1884, durante las labores de cimentación de la nueva parroquia del Salvador, en el patio del claustro de la catedral de Huesca.
07785	 Figura 1.12	Avda. Martínez de Velasco, Huesca Nieves Juste	Hebilla. Ajuar del enterramiento <i>El niño guerrero</i> . Ca. mediados del siglo V a. C. Fase tardía de la Primera Edad del Hierro. Cultura de los campos de urnas. Varios análisis.
13096	 Figura 1.13	Rocaspana, Castillonroy Donación	Figura zoomorfa (tendente a la esquematización) realizada a molde. Cultura íberica.

NIG	Imagen	Origen	Otra información
13139	 <p data-bbox="272 402 379 428">Figura 1.14</p>	Rocaspana, Castillonroy	<p data-bbox="706 301 1091 548">Útil de enganche o sujeción de pieza vinculada con el mundo bélico y con el del caballo y realizado en bronce mediante la técnica de la fundición. Es de forma circular y presenta superficie hemisférica en su parte central y un apéndice que remata en una base plana circular en su reverso. Cultura ibérica.</p>
08216	 <p data-bbox="272 698 379 725">Figura 1.15</p>	Pza. San Pedro, Jaca Julia Justes	<p data-bbox="706 575 1091 725">Anillo de plata con una pieza interior violácea. Romano – Edad Media cristiana. Análisis en partes metálicas y en la pieza central.</p>
08326	 <p data-bbox="272 813 379 839">Figura 1.16</p>	Pza. San Pedro, Jaca Julia Justes	<p data-bbox="706 751 1091 936">Remate de extremo de cinturón realizado en plata sobredorada que presenta una decoración distribuida en tres campos con motivos curvilíneos afrontados. Análisis en anverso y reverso.</p>
08699	 <p data-bbox="272 1074 379 1100">Figura 1.17</p>	Pozo Gil, Selgua Jaime Peralta, Patricia Cremades	<p data-bbox="706 959 1091 1047">Cristo crucificado de lámina de bronce grabada y dorada. Edad Media cristiana.</p>
00493	 <p data-bbox="272 1250 379 1277">Figura 1.18</p>	Colección Gabriel Llabrés Museo de Huesca	<p data-bbox="706 1127 1091 1153">Isis con Horus lactante.</p>
00495	 <p data-bbox="272 1453 379 1479">Figura 1.19</p>	Colección Gabriel Llabrés Museo de Huesca	<p data-bbox="706 1303 1091 1330">Harpócrates / Horus.</p>

<i>NIG</i>	<i>Imagen</i>	<i>Origen</i>	<i>Otra información</i>
00496	 Figura 1.20	Colección Gabriel Llabrés Museo de Huesca	Osiris.
10306	 Figura 1.21	Egipto Donación de Joaquín Lizana Salafranca	Estela votiva de Osiris. Piedra calcárea.
13225	 Figura 1.22	Egipto Donación de Joaquín Lizana Salafranca	Placa ornamental con altorrelieve de figura femenina yacente.
03705	 Figura 1.23	Egipto Donación de Joaquín Lizana Salafranca	Moneda de forma ovalada de pequeñas dimensiones con inscripción en una de las caras.
07872	 Figura 1.24	Cueva Foradada, Almunia de San Juan Donación	Taza de pequeñas dimensiones y con decoración en dos hileras que combina elementos circulares con formas alargadas regulares. Imita las tazas libatorias empleadas en los ritos sacrificiales romanos.

Tabla 1. Piezas muestreadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dada la naturaleza heterogénea de las piezas, se han tratado los resultados de forma individual, salvo en los casos de las piezas de plomo y los objetos metálicos del antiguo Egipto. Como se ha señalado, todos los datos se expresan en tantos por ciento, sin hacer ningún tipo de normalización ni exclusión de contenidos alcalinotérreos que pudieran asociarse a productos de alteración o tierras. Sin embargo, en algunos casos



NIG	11290	4087	12412 a	12412 b	08961 a	08961 b	11626 a	11626 b	12413	14210 a	14210 b	14210 c	4135	4100
V	<LOD	<LOD	0,03	0,04	<LOD	<LOD	0,02	0,03	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,02
Ti	<LOD	<LOD	0,3	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0,0	<LOD	<LOD	0,1	<LOD	<LOD	<LOD
Ca	0,4	5,2	18,2	6,0	17,1	<LOD	2,1	0,3	1,2	6,5	9,3	0,7	2,4	0,4
K	<LOD	0,1	2,0	0,2	<LOD	<LOD	0,1	0,3	0,1	<LOD	0,4	<LOD	0,2	0,1
Al	0,8	0,8	5,0	1,4	0,4	0,8	1,9	2,1	1,8	0,6	1,6	0,5	1,7	0,4
P	0,8	3,3	0,1	4,6	0,9	1,0	0,8	1,2	1,2	0,5	0,6	0,3	0,7	2,6
Si	2,0	1,5	16,0	2,6	1,6	1,9	3,2	3,8	2,4	1,5	5,6	1,0	2,9	1,3
Cl	0,9	1,3	0,03	1,7	1,1	1,5	0,8	0,8	2,0	0,4	0,4	0,3	0,9	0,9
S	22,9	16,9	1,1	18,1	15,1	23,9	24,1	22,6	23,2	14,9	14,9	9,7	19,7	15,4
Mg	<LOD	2,5	<LOD	2,6	<LOD	3,6	4,1	3,3	3,8	<LOD	<LOD	<LOD	3,1	<LOD

*Tabla 2. Resultados en tantos por ciento del análisis multielemental de varias piezas romanas de plomo del Museo de Huesca mediante un equipo pXRF. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Ba, Se, Hg, Nb, Zr, Sr y Rb por debajo del límite de detección en todas las muestras.*

Casi todas las piezas y los artefactos presentan valores altos de plomo, por encima del 30 % y en algunos casos sobre el 55 %, excepto la pieza circular de NIG 12412 (8,4 %). En relación con los contenidos de estaño, mientras que la mencionada pieza (que parece recubierta de una pátina de alteración) exhibe la peculiaridad de no presentar estaño en su composición, en alguna otra (como la de NIG 11290) el contenido de este metal es cercano al 2 %, lo que induce a pensar en una aleación intencionada. Curiosamente, todas, menos la de NIG 12412, presentan contenidos significativos de azufre (del 10 al 25 %) y arsénico (en un rango del 1,5 al 5 %), sin que haya sido posible detectar diferencias entre las que isotópicamente fueron asignadas a Cartagena – Portmán y las que lo fueron a Bielsa – Mina Ana. Se trata, pues, de piezas en un plomo barato, poco refinado. En cuanto a los contenidos de hierro y titanio, solo sobresalen los relativos a la pieza de NIG 12412 (2,1 % y 0,3 %, respectivamente). La presencia de cadmio en las dos piezas de La Filada (NIG 11626) y en dos del solar de la Diputación Provincial de Huesca (NIG 04087 y NIG 12412) sugiere un origen común. Este origen es más próximo entre las muestras de la Diputación en función de sus muy altos contenidos de fósforo.

### Mano ibérica (NIG 06985)

La mano (fig. 1.10), recortada de una chapa de plomo, procede del yacimiento ibérico de Puyalcalá (Alcubierre). Por su interés, se analizaron tres puntos: (1) debajo del dedo meñique, (2) en el dobléz que hay bajo el dedo pulgar y (3) debajo de los otros dedos. Los resultados son francamente similares en los tres puntos para todos los elementos mayoritarios, como se puede ver en la tabla 3. Como era de esperar, el plomo es el elemento mayoritario, con un valor medio ligeramente inferior al 55 %. Los demás metales se encuentran en estado de trazas, salvo el estaño, que representa un 0,5 %. Arsénico (4,3 %) y azufre (23 %) sugieren un sulfoarseniuro de plomo como mineral original. Otros elementos de interés son fósforo (del orden del 0,9 %) y bismuto (0,25 %), este último no observado en los restantes plomos romanos analizados en este estudio.

	<i>Debajo del dedo meñique</i>	<i>Doblez situado bajo el dedo pulgar</i>	<i>Debajo de los otros dedos</i>
Bal.	10,6	9,6	10,0
Sn	0,5	0,5	0,6
Cd	< LOD	0,0	0,02
Pd	0,01	< LOD	0,01
Ag	0,02	0,02	0,01
Bi	0,2	0,3	0,3
As	4,4	4,4	4,4
Au	< LOD	0,1	< LOD
Pb	53,8	58,0	52,5
Cu	0,1	0,1	0,1
Ni	0,04	0,1	0,04
Co	0,03	0,03	0,04
Fe	< LOD	0,1	0,1
Mn	0,1	0,1	0,1
Ca	0,2	< LOD	0,5

	<i>Debajo del dedo meñique</i>	<i>Doblez situado bajo el dedo pulgar</i>	<i>Debajo de los otros dedos</i>
Al	0,8	0,7	0,6
P	0,8	0,9	1,1
Si	1,9	2,1	2,1
Cl	1,2	1,2	1,3
S	23,2	21,9	23,6
Mg	2,1	< LOD	2,6

*Tabla 3. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental de una mano de plomo ibérica del Museo de Huesca (NIG 6985) mediante un equipo pXRF. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Ba, Sb, Hg, Cr, Mo, Nb, V, Zr, Sr, W, Ti, Rb, Se, Zn y K por debajo del límite de detección en todas las medidas.*

### **Toro (NIG 13096)**

Figura ibérica zoomorfa (fig. 1.13) realizada a molde procedente de Rocaspana (Castillonroy). Representa un toro con formas tendentes a la esquematización. Tiene las patas y el cuerpo afinados, el cuello robusto y la cabeza proporcionada y con el hocico entreabierto. Uno de los cuernos está roto.

La pieza, cuyos resultados se presentan en la tabla 4, es una mezcla cuaternaria de metales: cobre (61,8 %), plomo (11,2 %), estaño (5,9 %) y zinc (3,2 %). Realizando un recálculo específico de los tres últimos, plomo (55 %), estaño (29 %) y zinc (15,8 %), para representarlos en un diagrama triangular (fig. 2a), siguiendo a Bayley (1991), se deduce que el metal de la pieza estaría entre un bronce emplomado y un metal de cañón (*gunmetal*) (fig. 2b). Es cierto, sin embargo, que resulta discutible (véase, por ejemplo, Nicholas y Manti, 2014), la capacidad de la técnica pXRF para analizar adecuadamente la composición de estas mezclas cuaternarias, en parte por los efectos diferenciales de la corrosión sobre cada uno de los componentes. Como siempre, el tema queda abierto a nuevos estudios.

Sorprende el contenido de zinc, cuya presencia en objetos metálicos de la península ibérica es tardía comparada con la hallada en los procedentes del Mediterráneo oriental. Por ejemplo, Roldán y Vives-Ferrándiz (2018) no detectan zinc en una serie

de estatuillas votivas egipcias. En la misma línea, Montero y Perea (2007) señalan que en la Península la pieza más antigua con presencia de zinc se encontró en una tumba fenicia en la provincia de Cádiz. La más cercana en composición a la que es objeto de consideración se sitúa en Castilmontán (Soria): datada en el siglo II, presenta un 17,6 % de zinc, un 1,2 % de estaño y un 5,2 % de plomo. También se refiere la presencia de zinc, aunque no en niveles tan altos, en el conjunto de veintiséis bronce prerromanos estudiados por Sarabia Martín Gil y Martín Gil (1996). En el yacimiento de Sant Jaume – Mas d'en Serrà (Tarragona), García i Rubert *et alii* (2005) reportan algunos objetos de bronce ternarios, pero sin zinc y con contenidos más altos de estaño y menores de plomo. Una pieza romana procedente de Canas de Senhorim (Portugal) exhibe una aleación ternaria de cobre (35,8 %), plomo (37,6 %) y 25,9 % de estaño carente de zinc (Araújo *et alii*, 2003).

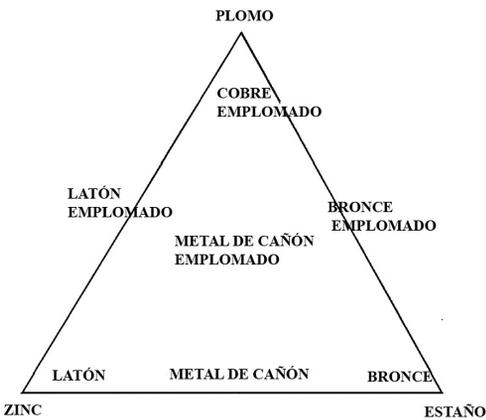


Figura 2a. Diagrama ternario de caracterización de aleaciones de cobres con plomo, zinc y estaño.

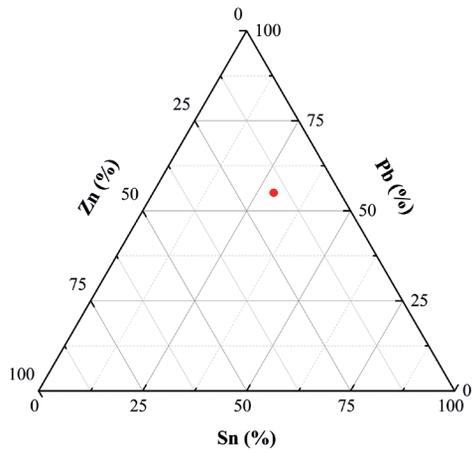


Figura 2b. Diagrama ternario de la figura de toro (NIG 13096).

NIG	Cu	As	Sn	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Zn	Ag	Sb
13096	61,8	1,0	5,9	4,8	1,1	1,6	0,2	5,0	0,9	0,2	2,4	0,3	3,2	0,1	0,04

Tabla 4. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental de una pequeña figura zoomórfica (NIG 13096) mediante un equipo pXRF. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . V, Cr, Mn, Co, Ni, Se, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pd, Cd, Ba, W, Au y Bi por debajo del límite de detección. Hg no determinado.

### Botón arroblonado (NIG 13139)

Pieza (fig. 1.14) procedente del yacimiento ibérico de Rocaspana, situado en Castillonroy. Es un útil de enganche o sujeción vinculado con el mundo bélico y con el del caballo y realizado mediante la técnica de la fundición. Tiene forma circular y presenta superficie hemisférica en la parte central y un apéndice que remata en una base plana circular en el reverso. La pieza puede asociarse a un botón central con umbo del tipo A 1b2 de Aurrecochea (1994).

Los resultados se presentan en la tabla 5. Se trata de un bronce con contenidos de cobre, estaño y plomo del 42,3 %, el 10,5 % y el 17,7 %, respectivamente. Sobre los datos normalizados de estos tres elementos se ha realizado la figura 3. Este tipo de bronce ya han sido citados en Aurrecochea (1994), quien los señala en piezas hispanas.

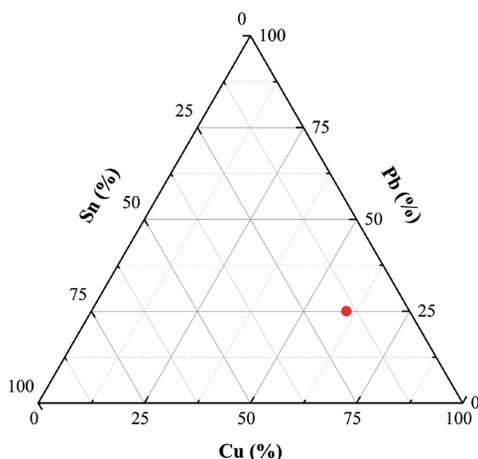


Figura 3. Diagrama ternario (cobre, estaño, plomo) de la pieza de NIG 13139.

NIG	Cu	As	Sn	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Ag	Sb	Pb
13139	42,3	1,2	10,5	4,4	6,1	0,4	10,7	2,4	0,3	1,9	0,05	0,3	0,06	0,06	17,7

Tabla 5. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental de un botón con umbo (NIG 13139) mediante un equipo pXRF. < LOD: por debajo del límite de detección. Mg, bal. (suma de elementos con  $Z \leq 11$ ), V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Se, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Pd, Cd, BA, W, Au y B por debajo del límite de detección. Hg no determinado.

### Brazo romano (NIG 01066)

El brazo romano (fig. 1.11) apareció enterrado, como se ha señalado, a finales del siglo XIX en el antiguo claustro de la catedral de Huesca. Es un resto de una estatua del periodo altoimperial romano, de los siglos I-II. Se trata de una pieza hueca de una efigie escultórica de cuerpo completo de la que se puede solo especular sobre a quién o qué representaba. El resto que ha llegado a la actualidad tiene un color verdoso característico del bronce, está alterado, concrecionado, y ha sido parcialmente restaurado. Se han analizado tres puntos de la pieza: una zona sin concreción del exterior del dedo meñique; otra del canto de la rotura de la pieza y una tercera del interior de esta, muy próxima, lógicamente, a la rotura.

Los resultados se presentan en la tabla 6. Como era de esperar, la pieza es de bronce y dominan el cobre y el estaño. Los valores máximos de cobre (70,9 % y estaño (14,7 %) y, lógicamente, el menor bal. (carbono, nitrógeno, oxígeno), se dan en el exterior limpio. En el interior hay un 55,5 % de cobre y un 6,8 % de estaño. En el canto hay un menor contenido de ambos metales de la aleación (25,7 % de cobre y 4,9 % de estaño) y aumenta el bal., atribuible a la mayor presencia de productos de alteración de tipo oxihidróxidos y carbonatos. Aquí la razón entre ambos metales es similar a la de la superficie exterior. Los contenidos de hierro y plomo son bajos y pueden ser de origen natural. En cualquier caso, el contenido de estaño en el exterior es alto, en el límite superior que algunos autores, como Giumlia-Mair (2020), señalan para los bronceos romanos. En la misma línea, en la estatua de Germánico del Museo de Amelia los contenidos de estaño no superan el 10 % y en algunas partes no llegan al 2 % (Pollini y Giumlia-Mair, 2019). El contenido de plomo del brazo oscense es del orden del 0,5 %. Los autores citados señalan que en los tiempos clásicos el plomo añadido no sobrepasaba el 3 %, pero que se incrementó en el inicio del periodo imperial romano, como se muestra en Risser, Saunders y Gisler (2015) para los bronceos de Apolo y Diana de Pompeya.

La diferente relación entre cobre y estaño en las diversas partes, especialmente el interior y el canto, puede deberse a diversas razones, como por ejemplo enriquecimiento en estaño frente al cobre por efecto de la corrosión (Vittiglio *et alii*, 1999; Fernandes, Os y Huisman, 2013; Robotti *et alii*, 2018) o reparaciones, como indican Ferretti, Miazzo y Moiola (1997) respecto al caballo capitolino. Pese a que la corrosión suele ser el efecto más invocado, en la línea de lo señalado por Ingo *et alii* (2006), nuestros resultados discrepan de los usuales en la corrosión por cuanto no se corresponden con la disminución

general del contenido metálico (especialmente en los elementos menos nobles) esperada en los exteriores. Por otra parte, el desconocimiento de los avatares de la pieza no contribuye precisamente al hallazgo de alternativas en la explicación de los resultados.

	<i>Dedo limpio sin concreción</i>	<i>Canto roto de la pieza</i>	<i>Interior, parte inferior</i>
Bal.	7,5	47,6	17,9
Sb	0,1	0,02	< LOD
Sn	14,7	4,9	6,8
Ag	0,1	0,01	0,02
Zr	< LOD	0,01	< LOD
Sr	< LOD	0,04	0,02
Rb	< LOD	0,00	< LOD
As	< LOD	< LOD	0,1
Pb	0,4	0,6	0,4
W	0,1	0,03	< LOD
Cu	70,9	25,7	55,5
Fe	0,1	1,9	1,2
V	< LOD	0,02	0,01
Ti	0,1	0,3	0,2
Ca	0,5	5,6	7,8
K	0,2	0,6	0,9
Al	0,9	1,7	1,5
P	0,1	0,3	0,4
Si	1,6	5,7	3,8
Cl	1,4	1,3	1,0
S	1,3	3,6	2,5

*Tabla 6. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental del brazo de una estatua romana (NIG 01066) mediante un equipo pXRF. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Ba, Cd, Pd, Mo, Nb, Bi, Se, Hg, Au, Zn, Ni, Co, Mn, Cr y Mg por debajo del límite de detección.*

### Placa de broche de cinturón (NIG 07785)

Esta placa de broche de cinturón (fig. 1.12) se encontró durante la excavación, realizada por Nieves Juste, de una necrópolis ibérica en la avenida Martínez de Velasco. Formó parte del ajuar del enterramiento denominado *El niño guerrero*, datado en torno a mediados del siglo V a. C. y perteneciente a una fase tardía de la Primera Edad del Hierro, dentro del contexto de la cultura de los campos de urnas. Su principal característica es estar decorada con nielados de plata con motivos de círculos concéntricos. Esta técnica ornamental se ejecuta mediante la incrustación de un esmalte en ranuras o incisiones practicadas en el metal (generalmente de color negro hecho de plata y plomo fundidos con azufre). Por ello se han tomado muestras en tres zonas: en las líneas incisas de la placa, en el extremo circular y en una zona sin corrosión. Los resultados se presentan en la tabla 7.

La pieza está fabricada en bronce 5/1 (64 % cobre / 13 % estaño), aunque la parte circular sea prácticamente cobre y muestre un mayor grado de corrosión (como muestra el mayor bal.). En la zona de los círculos hay un contenido de plata del 3 %, que también aparece en la zona sin corrosión, pero no en el extremo circular. Hay algo de plomo, por debajo del 1 % en toda la pieza. El hierro es superior al plomo, sobre todo en la zona decorada. El arsénico es bajo, lo que sugiere un origen local para el cobre. El azufre presenta niveles moderados y no es posible determinar si proviene de alguno de los minerales originales o es yeso del suelo.

	<i>Placa con líneas incisas</i>	<i>Círculo inferior</i>	<i>Zona sin corrosión</i>
Ba	0,2	0,4	0,2
Sb	0,3	0,1	0,4
Sn	12,2	1,6	13,8
Ag	3,1	0,6	2,6
Bal.	10,2	32,4	10,5
Sr	0,04	0,1	0,03
As	0,1	0,1	0,1
Pb	0,9	0,7	0,8
W	< LOD	< LOD	0,1

	<i>Placa con líneas incisas</i>	<i>Círculo inferior</i>	<i>Zona sin corrosión</i>
Cu	62,1	53,3	64,9
Co	0,1	< LOD	< LOD
Fe	4,0	1,5	1,3
Cr	< LOD	0,03	< LOD
Ti	0,2	0,1	0,2
Ca	0,6	0,8	0,6
K	0,1	< LOD	< LOD
Al	< LOD	< LOD	0,5
P	0,1	0,1	0,0
Si	0,9	1,4	0,8
Cl	0,3	0,4	0,3
S	4,5	3,6	2,9
Mg	< LOD	2,5	< LOD

*Tabla 7. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental de un broche de cinturón (NIG 07785) mediante un equipo pXRF. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Cd, Pd, Mo, Nb, Zr, Rb, Bi, Se, Hg, Au, Zn, Ni, Mn y V por debajo del límite de detección.*

### **Cristo de Pozo Gil (NIG 08699)**

La pieza (fig. 1.17) procede de un yacimiento medieval del Pozo Gil (Selgua), excavado por Peralta y Cremades. Se trata de un cristo crucificado realizado en lámina de bronce grabada y dorada. Es una pieza compleja de la que se han efectuado cuatro análisis que se presentan en la tabla 8: dos en zonas doradas, uno en la zona dorada del ojo y el último en otra zona dorada del brazo izquierdo.

Los resultados sufren una fuerte variabilidad de un punto a otro. Por ejemplo, el ojo presenta un 5,2 % de estaño, elemento que cae a nivel de trazas en las restantes medidas. Lo mismo sucede con el plomo, y lo contrario con el cobre, que en esta zona solo alcanza un 13 %, mientras que supera el 75 % en las restantes. Para complicar las cosas, en uno de los otros puntos de muestreo hay oro, un 3 %, y trazas de mercurio

(0,17 %). La presencia de wolframio (un 1,3 %) (junto al relativamente alto valor de azufre) podría ser un error de interpretación del *software* interno del equipo por interferencia con el pico relativo al oro.

Sobre la naturaleza de la pieza, aparentemente se trata del estofado de una madera policromada y no de una pieza metálica dorada. El contenido de oro corresponde al pan de oro, y el alto porcentaje de cobre a un pigmento que podría ser malaquita o azurita. No obstante, la elevada cantidad de cobre supera la que puede proporcionar cualquiera de sus óxidos o sus oxisales y es más compatible con la presencia de cobre metal o de una de sus aleaciones. La presencia de restos de mercurio (0,2 %) y de una pequeña cantidad de oro (3 %) sugiere que el dorado del soporte (77 % de cobre y 0,6 % de plomo) podría haber sido obtenido por el procedimiento llamado *ormolú* (véase Martín Ramos, Martín Gil y Martín Gil, 2016).

	<i>Dorado</i>	<i>Otra zona dorada</i>	<i>Ojo</i>	<i>Brazo, izquierdo</i>
Sb	0,2	0,2	0,02	0,2
Sn	0,1	0,0	5,5	0,04
Ag	0,2	0,1	0,009	0,04
Bal.	11,0	< LOD	43,3	10,7
Sr	< LOD	< LOD	0,1	0,0
Rb	< LOD	0,0	< LOD	< LOD
Bi	0,1	0,1	< LOD	0,2
As	0,4	0,2	0,3	0,5
Se	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Hg	< LOD	0,2	< LOD	0,01
Au	0,1	3,1	< LOD	0,2
Pb	0,7	0,6	11,1	0,7
W	< LOD	1,3	< LOD	< LOD
Zn	< LOD	< LOD	0,1	< LOD
Cu	75,7	77,3	13,3	75,8
Ni	0,04	0,04	< LOD	0,02

	<i>Dorado</i>	<i>Otra zona dorada</i>	<i>Ojo</i>	<i>Brazo, izquierdo</i>
Co	< LOD	< LOD	0,03	< LOD
Fe	0,1	< LOD	0,8	0,2
Mn	< LOD	< LOD	0,2	< LOD
V	< LOD	< LOD	0,02	0,03
Ti	0,04	0,02	0,1	0,05
Ca	0,6	0,2	5,9	0,6
K	< LOD	< LOD	0,7	0,2
Al	0,9	< LOD	0,9	1,6
P	0,1	8,3	0,2	0,2
Si	1,1	2,2	12,0	5,5
Cl	7,9	0,6	1,9	2,1
S	0,8	5,1	3,3	0,7

*Tabla 8. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental del cristo de Pozo Gil (NIG 8216) mediante un equipo pXRF. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Ba, Cd, Pd, Mo, Nb, Zr, Se, Cr y Mg por debajo del límite de detección.*

### Anillo de amatista (NIG 08216)

Pieza (fig. 1.15) encontrada en la excavación del antiguo cementerio situado junto a la actual plaza de San Pedro de Jaca, realizada por Julia Justes, de la que se dan detalles en Justes y Royo (2010). Está formada por una piedra romana, un entalle violeta con un grabado de una figura de Júpiter entronizado y un anillo de plata con chetón oval con una orla lisa de plata sobredorada en su interior y una segunda orla exterior unida al aro mediante ovas. Se considera de la Edad Media cristiana (Alonso *et alii*, 2020).

Se han hecho diversos tipos de análisis: en la piedra, en modos *minería* y *suelo*; en el metal (tanto en el plateado como en el dorado), en modo *minería*. Los resultados se presentan en la tabla 9. Los relativos a la piedra muestran porcentajes de silicio del 48 % y un contenido de hierro (típico cromóforo de la amatista natural) de 160 partes

Modo de análisis	Amatista (NIG 8216)			Amatista episcopal	Anillo (NIG 8216) (muesca)		Anillo (NIG 8216) (plata)
	Minería	Suelo	Suelo	Minería	Minería	Minería	Minería
Bal.	50,757			46,244	62,146		< LOD
Ba	0,027	0,069	0,051	0,025	0,021		< LOD
Sb	< LOD	0,013	0,011	< LOD	< LOD		< LOD
Sn	< LOD	0,009	0,044	< LOD	0,009		0,612
Cd	< LOD	0,004	0,003	< LOD	< LOD		< LOD
Pd	< LOD	0,001	0,002	< LOD	< LOD		< LOD
Ag	< LOD	0,002	0,485	0,002	0,054		88,888
Mo	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD		< LOD
Nb	< LOD			< LOD	< LOD		< LOD
Zr	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD		< LOD
Sr	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD		< LOD
Rb	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD		0,019
Bi	< LOD			< LOD	< LOD		< LOD
As	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD		< LOD
Se	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD		< LOD
Hg	< LOD	< LOD	0,006	< LOD	< LOD		0,017
Au	< LOD	0,001	0,085	< LOD	0,012		1,566
Pb	< LOD	< LOD	0,001	< LOD	< LOD		0,077
W	< LOD	< LOD	0,003	< LOD	< LOD		< LOD
Zn	< LOD	0,001	0,001	< LOD	< LOD		< LOD

Modo de análisis	Amatista (NIG 8216)		Amatista episcopal	Anillo (NIG 8216) (muesca)	Anillo (NIG 8216) (plata)
	Minería	Suelo			
Cu	< LOD	0,024	< LOD	< LOD	2,223
Ni	< LOD	0,006	< LOD	< LOD	< LOD
Co	< LOD	0,002	< LOD	< LOD	< LOD
Fe	< LOD	0,021	< LOD	< LOD	0,122
Mn	< LOD	0,016	< LOD	< LOD	< LOD
Cr	< LOD	0,02	< LOD	< LOD	0,097
V	< LOD	< LOD	0,021	< LOD	0,017
Ti	< LOD	0,006	0,007	0,005	0,063
Ca	0,029	0,032	< LOD	0,069	0,394
K	< LOD	0,028	< LOD	0,037	0,235
Al	< LOD		0,144	0,363	0,985
P	< LOD		0,327	< LOD	0,806
Si	49,084		52,712	36,883	0,668
Cl	< LOD		0,032	0,032	1,736
S	0,102	0,054	< LOD	0,104	1,461
Mg	< LOD		0,505	< LOD	< LOD

Tabla 9. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental de un anillo (NIG 8216) mediante un equipo pXRF. Se presentan los 3 decimales que ofrece el equipo. Bal: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección.

Mo, Zr, Sr, Rb, As, Se y W por debajo del límite de detección en todos los análisis y modos de medición. Ambos métodos no miden los mismos elementos. Espacio en blanco: elemento no medido.

por millón (por debajo del límite de detección en alguno de los modos de análisis). Es preciso reseñar, por otro lado, los relativamente altos valores del bal. (50,8 %), que incluye los elementos no identificables de forma singular, entre los que se encuentra el sodio, que sí es un componente del vidrio fabricado.

Hay que señalar, por otro lado, la ausencia de calcio, cuya presencia es habitual en los vidrios artificiales. Aprovechando la amabilidad del Museo Diocesano, se ha podido analizar una amatista de una cruz episcopal cuyos resultados se reproducen en la misma tabla. En esta pieza se observa que el contenido de sílice es ligeramente superior en la amatista que en la pieza del museo (52,7 % frente a 48 %), mientras que sucede lo inverso con el bal. (46,2 % frente a 50,8 %). Estas diferencias son pequeñas y compatibles con que se trate de una amatista, pero serían necesario efectuar estudios gemológicos específicos para confirmarlo.

En la parte metálica, mientras que la zona plateada contiene básicamente plata (88,9 %) con algo de cobre (1,6 %) y oro (0,6 %), la dorada tiene un 9,55 % de oro y algo más de un 1 % de plata y cobre. Sin embargo, la presencia de silicio por encima del 30 % y de un bal. del 55,6 % nos lleva a conjeturar que se trate de una capa de oro sobre un vidrio.

### **Remache de cinturón de San Pedro de Jaca (NIG 08326)**

Esta pieza (fig. 1.16) fue hallado por Julia Justes en la misma excavación que la anterior. Se analizaron los remaches y la parte posterior, cerca de ellos. Los resultados se presentan en la tabla 10. El remache es básicamente plata (78 %) con algo de oro (2 %). La parte posterior tiene un mayor contenido en oro (14,5 %) y menos plata (51 %). El contenido de wolframio (4,5 %) podría ser una falsa adscripción del *software* interno equipo y debería ser añadido al de oro. El resto de las detecciones son bajas: estaño (0,6 %), mercurio (0,8 %) y plomo (0,1 %). La presencia de mercurio, mayor sobre la parte dorada, sugiere un dorado mediante amalgama.

	<i>Remache de cinturón</i>	<i>Remache de cinturón (reverso)</i>
Sb	< LOD	< LOD
Sn	0,7	0,6
Ag	78,2	51,0
Rb	0,1	0,1
Bi	0,05	0,04
Hg	0,03	1,6
Au	2,1	14,5
Pb	0,1	0,1
W	< LOD	4,5
Cu	0,9	0,5
Fe	< LOD	0,1
Mn	< LOD	< LOD
Cr	0,1	< LOD
V	0,02	< LOD
K	0,3	< LOD
Al	1,5	1,0
P	0,8	7,5
Si	0,2	1,2
Cl	13,5	8,6
S	1,4	6,7

*Tabla 10. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental mediante pXRF de una hebilla de cinturón de Jaca (08326). < LOD: por debajo del límite de detección. Bal. (suma de elementos con  $Z \leq 11$ ), Ba, Sb, Cd, Pd, Mo, Nb, Zr, Sr, As, Se, Zn, Ni, Co, Mn, Ti, Ca, Mg por debajo del límite de detección.*

**Piezas egipcias: Isis (NIG 00493), Harpócrates / Horus (NIG 00495), Osiris (NIG 00496), moneda (NIG 03705) y otras**

La colección egipcia del Museo de Huesca tiene su origen en la donación de Gabriel Llabrés Quintana (Canales, 2021) de tres piezas de pequeño tamaño y estilo egipcio que representan respectivamente a Isis (NIG 00493), Harpócrates / Horus niño (NIG 00495) y Osiris (NIG 00496). El origen de estas piezas queda abierto a conjeturas. En el texto mencionado se sugiere una relación con una peregrinación religiosa llevada a cabo a comienzo del siglo xx. Décadas más tarde la colección se enriqueció con importantes donaciones realizadas por el egiptólogo Joaquín Lizana Salafranca.

Las tres estatuillas (figs. 1.18, 1.1 y 1.20) citadas fueron probablemente obtenidas mediante el procedimiento de la cera perdida y presentan un relativo buen estado, aunque Isis está rota a la altura de las rodillas (figs. 4a y 4b), lo que ha permitido analizar el interior. Las otras dos están completas.

Dado el interés de las piezas, se realizaron dos tandas de análisis. En la primera tanda, con solo un dato por figurilla, también se analizaron varias piezas líticas, como una estela votiva de Osiris (NIG 10306) o una placa funeraria que representa una concubina (NIG 13225). La primera fue encontrada entre varias falsificaciones en una



*Figuras 4a y 4b. Detalles de la estatuilla de Isis donde se muestra la fractura de la zona inferior, en la que se observa una diferencia entre el exterior y el núcleo.  
(Archivo fotográfico del Museo de Huesca)*

tienda cairota, pero, en opinión del donante, esta parecía auténtica (Joaquín Lizana, comentario personal).

Los resultados de la primera tanda de análisis se presentan en la tabla 11. El entalle (NIG 8524) parece un material orgánico, dado su muy alto bal. y la práctica ausencia de metales, silicio y calcio. La moneda de NIG 03705 (figura 1.23) es muy sencilla y por la inscripción parece islámica. Es sabido que el Egipto faraónico clásico era pobre en plata y sus fuentes de aprovisionamiento, solo a partir de la época ptolemaica, estaban en Anatolia (Masson-Berghoff *et alii*, 2018) o incluso en Cartagena – Sierra Morena (Kantarelou *et alii*, 2011). Evidentemente, una pieza posterior puede contenerla. Como se ve en la tabla, la pieza es de plata y exhibe una ley del orden del 75 %. En su composición aparece un contenido de cobre en torno al 3 %, un porcentaje de hierro del 1 % y trazas de plomo y oro. Su pátina incorpora, aparte de los productos de alteración, restos térreos de oxicompuestos de calcio y magnesio.

Las dos placas (NIG 10306 y 13225, figs. 1.21 y 1.22) tienen una composición similar, compatible con carbonato cálcico (40 % de calcio y 60 % de bal.). Una lámina delgada de la primera mostró la presencia de microfósiles del Eoceno (María Pilar Lapuente, comentario personal). Amplias extensiones de Egipto están cubiertas de calizas de esta edad geológica, pero no se ha realizado una comparativa.

El análisis de las tres piezas metálicas muestra una aleación ternaria: son ricas en plomo (20-31 %) y cobre (19-27 %), y tienen algo de estaño (3-11 %). Hay un 13 % de azufre y un 2 % de arsénico. En los tres casos se puede considerar una aleación *hsmn*, de bronce y plomo, pobre en estaño. El oro se presenta en trazas y excluye que estemos ante un *hmti qm* ('bronce negro egipcio'), pero es posible que la figura de Isis tuviera un dorado exterior. Se detectan diferencias composicionales entre la estatuilla de Harpócrates y el resto. Osiris muestra la presencia de algo de antimonio.

	<i>Entalle</i> (NIG 8524)	<i>Moneda</i> (NIG 03705)	<i>Isis</i> (NIG 00493)	<i>Horus</i> (NIG 00495)	<i>Osiris</i> (NIG 00496)	<i>Dama</i> (NIG 13225)	<i>Placa</i> (NIG 10306)
Bal.	97,3	< LOD	23,7	15,2	19,1	53,4	52,4
Ba	0,0	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,03	0,03
Sb	< LOD	< LOD	0,03	0,1	0,6	< LOD	< LOD
Sn	< LOD	< LOD	3,4	11,2	2,6	< LOD	< LOD

	<i>Entalle</i> (NIG 8524)	<i>Moneda</i> (NIG 03705)	<i>Isis</i> (NIG 00493)	<i>Horus</i> (NIG 00495)	<i>Osiris</i> (NIG 00496)	<i>Dama</i> (NIG 13225)	<i>Placa</i> (NIG 10306)
Ag	< LOD	74,7	0,1	0,1	0,1	< LOD	< LOD
Mo	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sr	0,01	0,01	< LOD	< LOD	< LOD	0,1	0,2
Rb	< LOD	0,01	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bi	< LOD	0,2	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
As	0,1	< LOD	1,7	2,0	2,3	< LOD	< LOD
Au	< LOD	0,1	0,2	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Pb	0,5	0,3	28,2	20,0	30,9	< LOD	< LOD
W	0,02	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zn	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,01
Cu	0,01	2,7	18,8	27,1	20,1	< LOD	< LOD
Ni	< LOD	< LOD	< LOD	0,03	0,03	< LOD	< LOD
Co	0,1	< LOD	< LOD	0,0	< LOD	< LOD	< LOD
Fe	0,6	1,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2
Cr	0,1	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ti	0,3	0,1	< LOD	0,04	< LOD	0,1	0,1
Ca	0,1	4,6	1,1	1,5	1,8	39,4	43,3
K	< LOD	0,3	0,2	0,4	0,6	0,1	0,1
Al	< LOD	2,2	1,0	1,0	1,3	0,4	0,5
P	0,02	0,1	0,4	0,5	0,5	< LOD	< LOD
Si	0,2	2,9	2,8	1,7	2,0	4,6	2,6
Cl	0,04	4,3	4,3	4,6	4,8	0,1	0,1
S	0,5	0,5	13,7	14,6	13,1	0,3	0,5
Mg	< LOD	5,5	< LOD	< LOD	< LOD	1,2	< LOD

*Tabla 11. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental mediante pXRF de varias piezas egipcias del Museo de Huesca. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . LOD: por debajo del límite de detección. Cd, Mo, Nb, Zr, Rb, Se, Mn, V y Hg por debajo del límite de detección.*

A la vista de estos resultados, se realizó una segunda tanda de medidas en la que se hicieron determinaciones en diferentes partes de cada pieza. Los puntos de muestreo y los resultados se muestran en las tablas 12a, 12b y 12c.

### *Horus / Harpócrates*

Los porcentajes obtenidos son compatibles con un bronce ternario cobre – plomo – estaño recubierto de oro. La composición superficial ha resultado ser 15 % de oro, 26 % de cobre, 26 % de plomo y 7 % de estaño (aleación de cobre, estaño y plomo 3/3/1). Los productos de alteración son óxidos y carbonatos (14,5 %) y cloruros (5 %). Elementos minoritarios y en estado de trazas son arsénico (1,6 %), calcio (1,4 %), potasio (0,4 %) y hierro (0,2 %). Los altos contenidos de magnesio en dos muestras (3 y 4 %) sugieren la utilización de talco como fundente en un proceso de fundición a la cera perdida. El relativamente alto contenido de plomo justifica que, aunque el estado de deterioro superficial de la pieza sea significativo, resulta menor que el de otras piezas.

	<i>Detrás, tocado</i>	<i>Detrás, enganche</i>	<i>Detrás, nuca</i>	<i>Detrás, lumbar</i>	<i>Detrás, gemelos</i>	<i>Detrás, base</i>	<i>Delante, tocado</i>	<i>Delante, cara</i>	<i>Delante, ombligo</i>	<i>Delante, espinilla</i>	<i>Delante, pie por arriba</i>
Sb	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	< LOD	0,03	< LOD	0,1
Sn	8,7	9,0	9,9	10,0	10,0	5,3	8,2	2,6	6,6	4,6	6,2
Ag	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,1	0,03	< LOD	0,03	0,03	0,04
Bal.	18,4	12,5	20,5	18,9	10,5	12,7	21,9	10,2	17,6	8,9	7,5
As	0,7	1,2	1,5	1,2	0,8	2,5	2,2	< LOD	2,1	1,1	3,0
Pb	18,8	34,7	20,6	19,9	25,7	28,5	23,4	25,4	26,1	38,0	33,3
W	0,2	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zn	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,04	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cu	33,1	14,6	27,5	25,5	25,4	22,3	23,0	26,0	21,3	16,8	19,9
Ni	< LOD	0,1	< LOD	< LOD	< LOD	0,04	0,03	0,1	< LOD	0,1	0,1
Fe	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1

	<i>Detrás, tocado</i>	<i>Detrás, enganche</i>	<i>Detrás, nuca</i>	<i>Detrás, lumbar</i>	<i>Detrás, gemelos</i>	<i>Detrás, base</i>	<i>Delante, tocado</i>	<i>Delante, cara</i>	<i>Delante, ombligo</i>	<i>Delante, espinilla</i>	<i>Delante, pie por arriba</i>
Mn	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,1
Ti	0,1	< LOD	0,04	0,03	< LOD	< LOD	0,03	0,1	0,04	< LOD	< LOD
Ca	1,3	0,4	1,1	1,2	1,1	< LOD	0,9	6,8	1,3	1,4	< LOD
K	0,4	0,4	0,5	0,4	0,6	0,1	0,3	0,5	0,3	0,7	< LOD
Al	1,1	< LOD	0,4	1,1	0,9	1,0	0,7	1,2	1,1	1,0	0,8
P	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Si	3,3	1,5	1,6	1,6	1,9	1,6	1,7	4,3	1,8	1,9	1,6
Cl	3,8	6,6	2,9	3,4	6,7	7,4	3,7	2,1	3,6	7,3	8,8
S	9,3	17,8	12,6	12,7	12,5	15,3	13,4	19,9	13,5	14,2	17,7
Mg	< LOD	< LOD	< LOD	3,0	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	4,1	< LOD	< LOD

*Tabla 12a. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental mediante pXRF de la pieza de NIG 00495 (Harpocrates / Horus) del Museo de Huesca.*

*Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . LOD: por debajo del límite de detección.*

*Pd, Zr, Sr, Rb, Au, Zn, Cr y V por debajo del límite de detección.*

### *Osiris*

Bronce cobre – plomo – estaño (rico en cobre) dorado. Aunque se trata de una aleación ternaria, su composición puede ser reducida a la de un bronce al plomo 1 : 1, rico. Los porcentajes obtenidos por pXRF para la superficie son 7,4 % de oro; 41,2 % de cobre, 17,6 % de plomo y 1,7 % de estaño. El grado de alteración superficial es importante: 18 % de óxidos y carbonatos y 5 % de cloruros. Elementos minoritarios son arsénico (1,6 %) y hierro (0,4 %). En una muestra se detectó un contenido en magnesio del 3,4 %, probablemente proveniente de la utilización de talco para la fundición a la cera perdida.

	<i>Detrás, gorro</i>	<i>Detrás, nuca</i>	<i>Detrás, espalda</i>	<i>Detrás, piernas</i>	<i>Detrás, pincho</i>	<i>Delante, tocado</i>	<i>Delante, cara</i>	<i>Delante, barba</i>	<i>Delante, ombligo</i>	<i>Delante, espinilla</i>	<i>Delante, pincho</i>
Sb	0,6	0,8	0,3	0,2	0,1	0,6	0,2	0,7	0,5	0,2	0,1
Sn	2,8	3,8	1,0	1,0	0,3	2,4	1,1	2,9	2,0	0,9	0,2
Ag	0,04	0,1	0,02	0,01	< LOD	0,05	0,7	0,1	0,05	0,02	< LOD
Bal.	12,5	18,9	8,6	< LOD	15,6	20,1	36,5	25,2	16,3	8,5	17,5
Sr	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,0	< LOD	0,05	< LOD	< LOD	0,01	0,01
As	2,1	1,8	< LOD	< LOD	< LOD	1,4	0,8	1,0	2,4	< LOD	< LOD
Au	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,2	< LOD	0,3	0,1	< LOD	< LOD
Pb	31,8	28,5	13,0	14,5	5,4	24,5	9,2	20,6	30,2	9,4	6,4
Cu	24,8	24,8	63,2	52,9	52,7	24,3	21,4	24,3	21,9	51,5	55,6
Ni	0,04	0,04	< LOD	0,03	< LOD	< LOD	< LOD	0,04	0,04	< LOD	< LOD
Fe	0,1	0,1	0,1	0,3	1,1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,9	0,8
Mn	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,03	< LOD	< LOD	< LOD	0,04	0,03	< LOD
V	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,04	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	0,01	0,02
Ti	< LOD	< LOD	0,03	0,04	0,2	< LOD	0,1	0,03	< LOD	0,1	0,1
Ca	0,9	1,0	2,0	14,4	4,1	1,7	15,7	3,7	1,5	13,1	3,8
K	0,5	0,7	0,9	0,7	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,8	0,7
Al	0,9	0,6	0,9	2,1	2,3	1,0	0,5	0,8	1,1	1,3	1,9
P	0,3	0,3	0,3	0,7	1,0	0,4	0,2	0,4	0,5	0,7	0,5
Si	1,1	1,2	1,5	2,3	4,2	1,6	1,7	1,5	1,9	2,7	3,3
Cl	6,7	4,9	3,0	4,1	6,6	7,5	1,4	4,3	6,6	4,7	6,7
S	11,9	12,4	5,3	3,6	2,6	11,5	9,7	13,4	14,1	2,2	2,5
Mg	< LOD	< LOD	< LOD	3,2	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

*Tabla 12b. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental mediante pXRF de la pieza de NIG 00496 (Osiris) del Museo de Huesca. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Pd, Zr, Rb, W, Zn y Cr por debajo del límite de detección.*

*Isis*

Aleación cobre – plomo – estaño recubierta de oro (13,3 %). Los resultados analíticos para la superficie, moderadamente alterada por corrosión, son 30 % de cobre, 18 % de plomo y 3 % de estaño. Aunque formalmente es una aleación de cobre, plomo y estaño 14/5/1, puede ser considerada como un bronce al plomo 3 : 1. Los productos de alteración serían un 27 % de óxidos y un 3 % de cloruros.

Los resultados, que se presentan gráficamente en la figura 5, muestran diferentes composiciones dentro de cada pieza, algo que, como se puede ver en la literatura arqueométrica, es habitual por razones como una pobre agitación de las materias primas en el crisol, el uso de fundidos de varios crisoles, la diferenciación de metales en procesos de corrosión, la existencia de pátinas varias, etcétera. Por ejemplo, la estatua de Isis presenta un estado de conservación peor que el esperado, y de ahí la presencia de cloruros en los resultados. Un tema de cierto interés es la composición de la zona interior rota de la misma estatuilla. En esa parte el contenido de estaño se hace casi nulo. Puede ser un relleno de arcilla, dado el incremento de sílice, aunque los valores de calcio y aluminio son relativamente bajos.

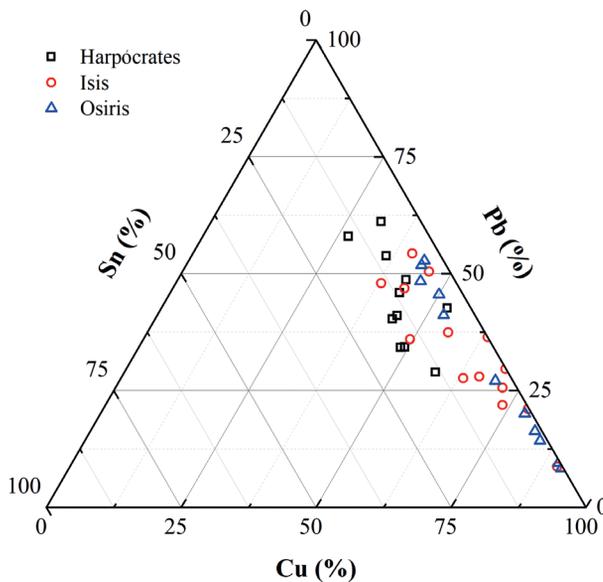


Figura 5. Diagrama ternario plomo – cobre – estaño de las piezas egipcias con NIG 00493, 00495 y 00496.



Ti	< LOD	< LOD	0,03	Detrás, lumbar	Detrás, final	Detrás, muslo	Zona rota, dentro	Zona rota, dentro (2)	Delante, moño	Delante, cara	Delante, brazo	Delante, cabeza niño	Delante, seno	Delante, muslo	Delante, pie niño
Ca	0,5	1,0	0,7	Detrás, cabeza	Detrás, final	0,4	1,4	0,3	3,2	1,4	3,3	0,9	2,5	2,1	7,0
K	0,1	0,3	0,5	Detrás, cabeza	Detrás, final	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	< LOD	< LOD	< LOD	0,2	0,1
Al	0,7	0,6	0,8	Detrás, cabeza	Detrás, final	< LOD	0,7	0,6	< LOD	0,9	< LOD	< LOD	< LOD	1,2	1,2
P	0,4	0,5	0,5	Detrás, cabeza	Detrás, final	0,4	0,2	0,2	0,2	2,6	0,1	< LOD	0,2	0,4	0,6
Si	2,2	2,5	3,1	Detrás, cabeza	Detrás, final	2,2	9,1	10,5	1,0	2,2	0,7	< LOD	2,2	2,8	2,1
Cl	5,4	3,3	6,6	Detrás, cabeza	Detrás, final	6,6	5,0	5,1	1,7	3,3	3,1	0,0	3,1	4,3	4,2
S	13,4	14,7	13,4	Detrás, cabeza	Detrás, final	17,7	9,6	8,8	7,7	7,1	4,5	< LOD	8,5	11,6	11,2
Mg	< LOD	< LOD	3,4	Detrás, cabeza	Detrás, final	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Tabla 12c. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental mediante pXRF de la pieza de NIG 00493 (Isis) del Museo de Huesca. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección.

Pd, Zr, V y Zn por debajo del límite de detección.

Evidentemente, es interesante hacer una comparativa con otras piezas similares. El antiguo Egipto produjo miles de pequeñas estatuillas votivas metálicas a la cera perdida, a las que hay que añadir abundantes falsificaciones recientes. Un importante número de ellas han sido analizadas. Su química, genéricamente definida como bronce, ha dado lugar a numerosos estudios desde los clásicos trabajos de Alfred Lucas, cuyo texto básico, *Ancient Egyptian Materials and Industries*, ha tenido hasta la actualidad varias reediciones póstumas. Evidentemente, los resultados se han multiplicado todavía más desde la aplicación de análisis XRF, no destructivos. Los resultados, en general, muestran aleaciones ternarias e incluso cuaternarias que se pueden achacar al deseo de abaratar la pieza tanto usando metales de menor precio como rebajando las temperaturas de trabajo. Como es evidente, el mayor depósito de esas piezas estaba en el sótano del antiguo Museo Egipcio de El Cairo. Se han hecho muchos análisis de ellas. Así, diez fueron analizadas mediante XRF por Gouda, Youssef y Abdel Ghany (2012) y ciento cuarenta y tres por Gouda *et alii* (2020). Ghoniem (2014) analizó una estatuilla de Osiris, probablemente de Sais, hoy conservada en el mismo museo, realizada en un bronce ternario cobre (89-82,5 %) – estaño (10,6-4,3 %) – plomo (10,6-4,3 %) y relacionó una fractura con los relativamente altos valores de plomo. Dos años más tarde estudió diez objetos de la misma proveniencia, entre ellas varios Osiris (Ghoniem, 2016). No todas las piezas están hoy en Egipto. Una que tiene certificado del Museo Egipcio, comprada en 1944 y hoy conservada en el Ditsong National Museum de Sudáfrica, presenta los siguientes valores medios: 77,5 % de cobre, 16,7 % de estaño, 5,2 % de plomo, 0,1 % de hierro y 0,1 % de plata. Se señalan variaciones dentro de la misma pieza (Smith *et alii*, 2011). Lo interesante es que su estudio muestra la existencia de masas de material arcilloso en el interior de ella. Janssens (2000), al analizar una estatuilla de Neferhotep (Museo Vleeshuis, Amberes, Bélgica), de la XXII o la XXIII dinastía, encuentra una media de 77,5 % de cobre, 16,7 % de estaño y solo 5,2 % de plomo. Según Ogden (2000), Gouda, Youssef y Abdel Ghany (2012) y Rademarkers *et alii* (2018), el uso de bronce emplomados se generalizó en Egipto a partir del final del Imperio Medio. Hay que señalar que la presencia de más de un 2 o un 3 % de cinc se considera prueba de falsificación.

A la vista de los resultados, es posible que las piezas procedan de Egipto y sean auténticas.

### Tacita de plata de Almunia de San Juan (NIG 7872)

Esta pieza (fig. 1.24) suscita alguna duda sobre su datación. En el presente estudio se han hecho dos análisis, uno sobre una parte en buen estado y otra sobre una zona gastada. Los resultados (fig. 14) muestran que la zona superficial es diferente del interior; por ejemplo, 46,8 % frente a 0,1 % de plata, 4,1 % frente a 13,7 % de cinc,

	<i>Zona en buen estado de conservación</i>	<i>Zona desgastada</i>
Bal.	19,284	< LOD
Ag	46,86	0,414
Nb	< LOD	0,006
As	< LOD	0,046
Hg	0,076	< LOD
Pb	0,181	0,264
Zn	4,139	13,698
Cu	20,95	62,869
Ni	4,523	17,279
Co	0,098	0,136
Fe	0,108	0,386
Cr	0,139	< LOD
V	0,033	0,021
Ti	0,089	0,015
Ca	0,309	0,186
K	< LOD	0,048
Si	1,227	0,903
Cl	0,451	0,089
S	0,305	0,392

*Tabla 13. Resultados, en tantos por ciento, del análisis multielemental mediante pXRF de la pieza de NIG 7872 del Museo de Huesca. Bal.: suma de elementos con  $Z \leq 11$ . < LOD: por debajo del límite de detección. Ba, Sb, Sn, Cd, Pd, Mo, Zr, Sr, Rb, Bi, Se, Au, W, Mn, Al, P y Mg por debajo del límite de detección.*

20,9 % frente a 62,9 % de cobre, 4,5 % frente a 17,3 % de níquel. Se trata de una aleación de plata, cobre, níquel y zinc conocida modernamente como *plata tibetana*:  $40 \pm 7$  % plata,  $40 \pm 20$  % cobre,  $9 \pm 4$  % níquel,  $10 \pm 6$  % cinc, 0,2 % plomo,  $0,2 \pm 0,1$  % hierro, 0,1 % cobalto. A juzgar por la presencia de ese último elemento, y por lo que parece un recubrimiento por galvanotecnia, estaríamos muy posiblemente ante una pieza moderna.

## CONCLUSIONES

El estudio ofrece información elemental sobre las piezas estudiadas, desde objetos de plomo poco elaborados hasta joyas de cierta calidad e incluso objetos exóticos. Los resultados han puesto en evidencia la heterogeneidad existente entre ellas, así como posibles diferencias de composición dentro de una misma pieza que pueden ser atribuidas a diversos factores, entre los que, sin duda, destaca la corrosión.

Se pone de manifiesto la utilidad del equipo XRF portátil, dado que ofrece información sobre la composición elemental de la superficie de las piezas sin tener que desplazarlos a otras instalaciones fuera del museo.

Evidentemente y, como tantas veces, se ha respondido a alguna pregunta y se han abierto otras. Para contestar a alguna de ellas haría falta acudir a otras técnicas. En este sentido, es necesario destacar que sería bueno disponer de un equipo portátil de espectroscopia Raman, que permitiría profundizar en la especiación y discriminar los elementos más ligeros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO LESCÚN, María, *et alii* (2020), *Guía del Museo de Huesca*, Huesca, Gobierno de Aragón.
- ARAÚJO, María Fátima, *et alii* (2003), "Analysis of a Roman centaurus from Canas de Senhorim (Portugal): comparative study using EDXRF and SXRF", *Journal de Physique*, IV, 104 (marzo), pp. 523-526.
- AURRECOECHA FERNÁNDEZ, Joaquín (1994), "Los botones de bronce en la Hispania romana", *Archivo Español de Arqueología*, 67 (169-170), pp. 157-178.
- BAYLEY, Justine (1991), "Alloy nomenclature", en Geoff EGAN y Frances PRITCHARD (1991), *Dress Accessories c. 1150 – c. 1450, 3: Medieval Finds from Excavations in London*, Londres, HMSO, pp. 13-17.
- CANALES MESA, Paula (2021), *La colección egipcia del Museo de Huesca*, Huesca, Gobierno de Aragón.

- FERNANDES, Ricardo, Bertil J. H. van Os y Hans D. J. HUISMAN (2013), “The use of hand-held XRF for investigating the composition and corrosion of Roman copper-alloyed artefacts”, *Heritage Science*, 1 (1), pp. 1-7.
- FERRETTI, Marco, Lucia MIAZZO y Pietro MOIOLI (1997), “The application of a non-destructive XRF method to identify different alloys in the bronze statue of the Capitoline Horse”, *Studies in Conservation*, 42 (4), pp. 241-246.
- *et alii* (2007), “In situ study of the Porticello Bronzes by portable X-ray fluorescence and laser-induced breakdown spectroscopy”, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62 (12), pp. 1512-1518.
- FRAHM, Ellery, y Roger C. P. DOONAN (2013), “The technological versus methodological revolution of portable XRF in archaeology”, *Journal of Archaeological Science*, 40 (2), pp. 1425-1434.
- GARCÍA I RUBERT, David, *et alii* (2005), «Estudio de composición mediante ED-XRF de materiales metálicos del asentamiento protohistórico de Sant Jaume – Mas D'en Serrà (Alcanar, Montsià, Tarragona)», en *Actas del IV Congreso Ibérico de Arqueometría*, Gerona, Universitat de Girona, pp. 145-152.
- GHONIEM, Mohamed A. (2014), “A bronze Osiris statuette from the Egyptian Museum in Cairo: microstructural characterization and conservation”, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14 (1), pp. 37-49.
- (2016), “Characterization and scientific conservation of a group of archaeological bronze Egyptian statues”, *International Journal of Conservation Science*, 7 (2), pp. 459-476.
- GIUMLIA-MAIR, Alessandra (2020), “Fragments of large roman statuary in the Museum of Catania, Sicily. Review of Stefaniua Pafumi’s (2020) *Disiecta membra: frammenti di statuaria bronzea di età romana del Museo Civico di Catania*”, *Advances in Archaeomaterials*, 1, pp. 105-108.
- GOUDA, Venice Kamel, Gehan I. YOUSSEF y Nabil A. ABDEL GHANY (2012), “Characterization of Egyptian bronze archaeological artifacts”, *Surface and Interface Analysis*, 44 (10), pp. 1338-1345.
- *et alii* (2020), “Survey of copper base alloys used in ancient Egypt”, en *Eurocorr 2019: The Annual Event of the European Federation of Corrosion (Seville, Spain, September 9-13 2019)*, pp. 1-10.
- GRAVETT, Venus Felicia (2011), *A Critical Analysis of Selected Egyptian Bronze Artefacts in the National Cultural History Museum (NCHM)*, tesis doctoral, University of South Africa.
- GUERRA, Maria Filomena (1998), “Analysis of archaeological metals: the place of XRF and PIXE in the determination of technology and provenance”, *X-Ray Spectrometry: An International Journal*, 27 (2), pp. 73-80.
- JANSSENS, Koen, *et alii* (2000), “Use of microscopic XRF for non-destructive analysis in art and archaeometry”, *X-Ray Spectrometry: An International Journal*, 29 (1), pp. 73-91.
- JUSTES FLORÍA, Julia, y José Ignacio ROYO GUILLÉN (2010), “La ocupación tardorromana e hispanovisigoda de Jaca: los inicios del cambio”, en Philippe SÉNAC (ed.), *Villa 3. Histoire et archéologie des sociétés de la vallée de l'Èbre (VIIe-XIe siècles)*, Toulouse, Presses universitaires du Midi, pp. 17-66.

- INGO, Gabriel M., *et alii* (2006), “Large scale investigation of chemical composition, structure and corrosion mechanism of bronze archeological artefacts from Mediterranean basin”, *Applied Physics A*, 83 (4), pp. 513-520.
- KANTARELOU, Vasiliki, *et alii* (2011), “X-ray fluorescence analytical criteria to assess the fineness of ancient silver coins: application on Ptolemaic coinage”, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 66 (9-10), pp. 681-690.
- MARTÍN RAMOS, Pablo, Jesús MARTÍN GIL y Francisco Javier MARTÍN GIL (2016), “El dorado a fuego con amalgama: evidencia de su aplicación a un pinjante bajomedieval hallado en el Alcazarejo de Valladolid”, *Estudios del Patrimonio Cultural*, 15, pp. 6-13.
- *et alii* (2020), “Asignación de la mineralización-origen a piezas de plomo de época romana depositadas en el Museo de Huesca”, *Lucas Mallada*, 22, pp. 99-113.
- MASSON-BERGHOFF, Aurélie, *et alii* (2018), “(Re)sources: origins of metals in Late Period Egypt”, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 21, pp. 318-339.
- MONTERO RUIZ, Ignacio, y Alicia PEREA CAVEDA (2007), “Brasses in the early metallurgy of the Iberian Peninsula”, en Susan LA NIECE, Duncan HOOK y Paul T. CRADDOCK (eds), *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*, Londres, Archetype Publications, pp. 136-139.
- NICHOLAS, Matthew, y Panagiota MANTI (2014), “Testing the applicability of handheld portable XRF to the characterization of archaeological copper alloys”, en Janet BRIDGLAND (ed.), *ICOM-CC 17<sup>th</sup> Triennial Conference Preprints, Melbourne, 15-19 September 2014*, Paris, International Council of Museums, pp. 1-13.
- OGDEN, Jack (2000), “Metals”, en Paul T. NICHOLSON e Ian SHAW, *Ancient Egyptian Materials and Technology*, Cambridge, Cambridge UP, pp. 148-176.
- PAFUMI, Stefania (2020), *Disiecta membra: frammenti di statuaría bronzea di età romana del Museo Civico di Catania*, Roma, L’Erma di Bretschneider.
- POLLINI, John, y Alessandra GIUMLIA-MAIR (2019), “The statue of Germanicus from Amelia: new discoveries”, *American Journal of Archaeology*, 123 (4), pp. 675-686.
- RADEMAKERS, Frederik W., *et alii* (2018), “Copper for the afterlife in Predynastic to Old Kingdom Egypt: provenance characterization by chemical and lead isotope analysis (RMAH collection, Belgium)”, *Journal of Archaeological Science*, 96, pp. 175-190.
- RISSER, Erik, David SAUNDERS y Jean-Robert GISLER (2015), “The bronze Apollo and Diana from Pompeii”, *Antike Kunst*, 58, pp. 78-96.
- ROBOTTI, Simone, *et alii* (2018), “Reliability of portable X-ray fluorescence for the chemical characterization of ancient corroded copper-tin alloys”, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 146, pp. 41-49.
- ROLDÁN GARCÍA, Clodoaldo, y Jaime VIVES-FERRÁNDIZ SÁNCHEZ (2018), “Compositional analysis by energy dispersive X-ray fluorescence of Iberian copper-alloy votive figurines from southern Spain (fourth-third centuries BC)”, *X-Ray Spectrometry*, 47, pp. 441-449.
- RUBIO BARBERÁ, Sonia, *et alii* (2019), “Analysis of Sagunto Ibero-Roman votive bronze statuettes by portable X-ray fluorescence”, *Radiation Physics and Chemistry*, 159, pp. 17-24.

- SARABIA HERRERO, Francisco Javier, Jesús MARTÍN GIL y Francisco Javier MARTÍN GIL (1996), "Metallography of ancient bronzes: study of pre-Roman metal technology in the Iberian Peninsula", *Materials Characterization*, 36 (4-5), pp. 335-347.
- SMITH, A., *et alii* (2011), "The examination, analysis and conservation of a bronze Egyptian Horus statuette", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 651 (1), pp. 221-228.
- VITTIGLIO, Guido, *et alii* (1999), "A compact small-beam XRF instrument for in-situ analysis of objects of historical and/or artistic value", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 54 (12), pp. 1697-1710.