

ANÁLISIS ARQUEOMÉTRICO DE DENARIOS ROMANOS DEL TESORO DE LLÍRIA (VALENCIA, ESPAÑA) MEDIANTE ESPECTROMETRÍA XRF PORTÁTIL

ARCHEOMETRIC ANALYSIS OF ROMAN DENARIOS OF THE TREASURE OF LLÍRIA (VALENCIA, SPAIN) THROUGH PORTABLE XRF SPECTROMETRY

Clodoaldo Roldán García

Instituto de Ciencia de Materiales de la Universitat de València (ICMUV).
C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980-Paterna (Valencia)

Pere Pau Ripollés Alegre

Departamento de Prehistoria y Arqueología. Universitat de València. Avda. Blasco Ibáñez, 28. 46010-Valencia

Carmen Delegido Morant

Departamento de Prehistoria y Arqueología. Universitat de València. Avda. Blasco Ibáñez, 28. 46010-Valencia

RESUMEN

El Tesoro de Lliria (Valencia, España) constituye probablemente, por el número de monedas que lo integran, el tesoro de denarios más importante de España y uno de los más importantes de Europa. En el conjunto de monedas están representadas las emisiones de diversos emperadores altoimperiales, que en su mayor porcentaje corresponden al s. II d.C. Este trabajo se centra en los denarios acuñados bajo el reinado del emperador Adriano (117-138 d.C.) y uno de sus objetivos es la caracterización elemental de la aleación en superficie y el estudio de la variación porcentual de la plata en los denarios emitidos durante ese periodo. Con este propósito, se han analizado, mediante fluorescencia de rayos-X (XRF), 50 denarios de plata seleccionados entre los emitidos durante el reinado de Adriano. Los análisis no destructivos realizados aportan información sobre las aleaciones y sugieren un enriquecimiento superficial en plata. Junto a la plata, elemento mayoritario de la aleación, se ha observado la presencia de cobre, plomo, oro y otros elementos traza. Las concentraciones de plata obtenidas varían entre el 89% y el 97% e indican una cierta uniformidad en las aleaciones, acorde con el periodo de estabilidad económica y política del reinado de Adriano.

Palabras clave: Tesoro de Lliria; denarios de plata; EDXRF.

ABSTRACT

The Treasury of Lliria (Valencia, Spain) is probably the largest treasury of denarii in Spain and one of the most important in Europe. In this set of coins are represented the emissions of various emperors, mainly from 2nd century AD. This work focuses on the denarii coined under the reign of the Emperor Hadrian (AD 117-138) and one of its objectives is the characterization of the surface alloy and the study of the percentage variation of silver in the denarii emitted during that period. For this purpose, we analyze through X-ray fluorescence (XRF) 50 silver denarii selected from those issued during the reign of Hadrian. The nondestructive analyzes carried out provided information on the alloys and suggest a superficial enrichment in silver. Along with silver, the majority of the alloy, copper, lead, gold and other trace elements have been observed. The silver concentrations obtained vary between 89% and 97% and indicate a certain uniformity in the alloys, according to the period of economic and political stability of Hadrian's reign.

Key words: Treasury of Lliria; Silver Denarii; EDXRF

* Una primera versión preliminar de este trabajo fue presentada en ASMOSIA X (Roma, 2012) (Vidal & García-Entero, 2015). Sumamos ahora los resultados de los análisis de Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS) entonces ausentes.

INTRODUCCIÓN

Los análisis físico-químicos constituyen una potente herramienta en la investigación numismática que aportan, entre otros aspectos, información precisa sobre la aleación, cronología, procedencia y autenticidad de los objetos estudiados. Por otra parte, el desarrollo de técnicas analíticas no destructivas como la fluorescencia de rayos-X dispersiva en energía (EDXRF), implementada en equipos portátiles que permiten análisis in situ (Ferrero et al., 1999; Ferretti, 2000; Cesareo et al., 2008), han favorecido el estudio analítico rápido y preciso de grandes colecciones numismáticas con un amplio rango de concentraciones y sin necesidad de una preparación previa de las monedas (Schweizer, 1972; Gigante et al., 2005; Ponting, 2012; Gorghinian et al., 2013; Del Hoyo-Meléndez et al., 2015). No obstante, la precisión y exactitud de los análisis pueden estar influenciadas por diversos factores como la inhomogeneidad, la existencia de capas de corrosión y el enriquecimiento o empobrecimiento superficial de determinados elementos de la aleación (Klockenkamper et al., 1999; Beck et al., 2004; Kantarelou et al., 2011; Ager et al., 2013). En este trabajo, presentamos los resultados obtenidos en el análisis mediante EDXRF de 50 denarios emitidos durante el reinado de Adriano (117-138 d.C.) y que forman parte del *Tesoro de Lliria*. Los datos obtenidos constituyen una importante ayuda para responder a las cuestiones antes planteadas y a otras más específicas como la variación de la aleación de las monedas a lo largo del reinado de Adriano (Walker, 1976, 1977; Butcher y Ponting, 2011).

MATERIAL Y MÉTODOS

El *municipium* de *Edeta* (Lliria, Valencia), situado en la *Hispania Tarraconensis*, ha proporcionado importantes restos arqueológicos de época romana. Destaca especialmente el *Tesoro de Lliria*, descubierto durante una intervención arqueológica realizada en 1999. Se trata de un conjunto numismático compuesto por 5.990 monedas de plata (entre las que se contabilizan 5.983 denarios



Figura 1- Anverso y reverso algunos denarios del Tesoro de Lliria analizados mediante EDXRF (Ver Tabla 1 para identificar el año de acuñación).

oficiales, 6 piezas forradas y una dracma provincial oriental), de las cuales más del 95% son denarios del siglo II d.C. pertenecientes a la dinastía de los Antoninos (Escrivá et al., 2005; Delegido, 2011). Por su envergadura, es el tesoro de denarios más importante de la península Ibérica y probablemente uno de los más importantes de Europa (Gozalbes et al., 2003). Actualmente, el Tesoro de Lliria está depositado, y parte de él está exhibido, entre el Museo de Prehistoria de Valencia y el Museo Arqueológico de Lliria.

Los análisis EDXRF se han focalizado en 50 denarios emitidos durante el mandato de Adriano, que abarcan la totalidad de su reinado (117-138 d.C.) e incluyen piezas acuñadas tanto a nombre del emperador Adriano como de la emperatriz Sabina, Aelio César y Antonino Pio (Figura 1). La procedencia original de todos los denarios analizados corresponde a la ceca de Roma en la cual fueron acuñados. Se han elegido acuñaciones realizadas en este periodo porque, al ser considerado de estabilidad económica y política, es un periodo poco estudiado desde el punto de vista analítico de las aleaciones asociadas a las diferentes

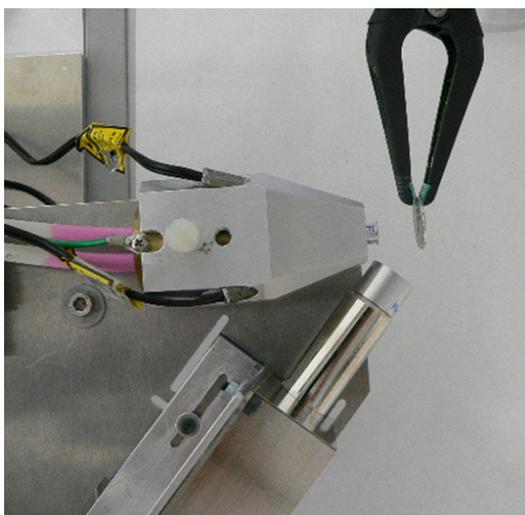


Figura 2- Detalle del espectrómetro EDXRF utilizado en los análisis.

emisiones monetarias. En la Tabla 1 se indican, la fecha de acuñación, el código de referencia y la masa de los denarios analizados, que varía entre 2.44 g y 3.63 g con un valor promedio de 3.18 ± 0.17 g.

La composición elemental superficial de todos los denarios fue determinado en modo no destructivo mediante un espectrómetro EDXRF portátil integrado por un tubo de rayos-X de baja potencia caracterizado por un ánodo de plata de transmisión que opera a 35 kV y 0.012 mA y un detector SDD (espesor: 0.5 mm; superficie: 25 mm²; ventana de Be: 0.0125 mm) con una resolución de 135 eV (FWHM @ 5.9 keV) y refrigeración termoeléctrica. El tubo y el detector tienen una configuración geométrica de 30° y están montados sobre un dispositivo mecánico con tres grados de libertad (Figura 2). El haz emergente del tubo incide perpendicularmente a la muestra, está colimado a 1 mm de diámetro y es filtrado por una lámina de aluminio de 0.2 mm de espesor. El tiempo de medida ha sido de 240 s en cada uno de los análisis realizados. La calibración del equipo se ha realizado a partir de patrones de referencia de aleaciones Ag-Cu cuyas concentraciones varían

entre 55 % y 91 % para la plata y entre 45 % y 9 % para el cobre. Los espectros EDXRF correspondientes a las monedas analizadas han sido procesados y sus aleaciones cuantificadas mediante el método de parámetros fundamentales implementado en el software WinAxil. Todos los análisis se realizaron exponiendo directamente la superficie de los denarios al haz de rayos-X sin que esta haya sido alterada, pulida o modificada.

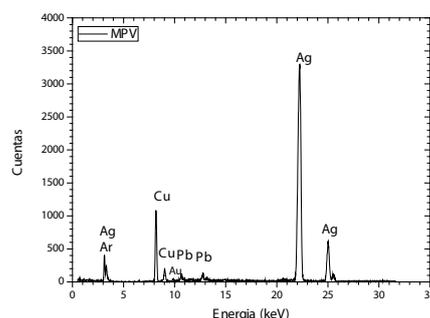


Figura 3- Espectro EDXRF de un denario tipo. El elemento Ar es consecuencia de la excitación del gas presente en el aire que hay entre muestra y detector.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los espectros EDXRF característicos de los denarios muestran la presencia dominante de las líneas de fluorescencia de la plata y del cobre y la de elementos minoritarios/traza entre los que cabe destacar el plomo (Figura 3). El análisis de las aleaciones de los 50 denarios acuñados durante el mandato de Adriano revela una aleación de plata y cobre con porcentajes que oscilan entre el 88 y el 98% en peso de plata y entre el 2% y el 11% en peso de cobre. Adicionalmente se ha detectado la presencia de Pb como elemento minoritario y de Bi, Tl y Au como elementos traza, que en conjunto son inferiores al 1% en peso. La presencia de plomo es evidente en todas las monedas analizadas y es consistente con la hipótesis de que dicho elemento se asocia al proceso de copelación seguido para el refinado de la plata (Scott, 1991;

Ingo et al., 2004). Las concentraciones de plata, cobre y plomo obtenidas en los denarios analizados se muestran en la Tabla 1. La Figura 4 muestra la relación entre las concentraciones de Ag y Cu en los denarios analizados. La correlación negativa entre Cu y Ag es un indicio de que el cobre podría haber sido añadido intencionadamente a la plata durante el proceso de copelación (Rodrigues et al., 2011). Por el contrario, las concentraciones de Ag y Pb no están correlacionadas, lo que indica que la presencia de plomo no ha sido añadida intencionadamente (Del Hoyo-Meléndez et al., 2015).

La composición de la aleación de los denarios en el periodo estudiado (117-138 d.C.) se mantuvo sin grandes fluctuaciones tal y como puede observarse en la Figura 5 y como cabe esperar de un periodo de estabilidad económica y política. El promedio en peso de plata de la aleación es del 91.7% con una desviación estándar

del 1.5 %. Estos resultados concuerdan con los que aporta D. R. Walker tras analizar mediante XRF denarios de plata acuñados en el mismo periodo que los presentados en este trabajo (Walker, 1977). No obstante, el contenido porcentual de plata aportado en este trabajo y el aportado por Walker en los denarios acuñados durante el mandato de Adriano, es claramente superior al obtenido por K. Butcher y M. Ponting (Butcher y Ponting, 2011) al analizar, mediante ICP-AES (inductively-coupled plasma atomic emission spectrometry), AAS (atomic absorption spectrometry) y SEM-EDX (scanning electron microscopy with micro-analysis), denarios romanos imperiales desde el Principado de Augusto (24 a.C.-14 d.C.) hasta el de Septimio Severo (193-211 d.C.).
Tabla 1. Relación de denarios del Tesoro de Liria analizados mediante EDXRF. La referencia se corresponde con el código de inventario del Museo de Prehistoria de Valencia.

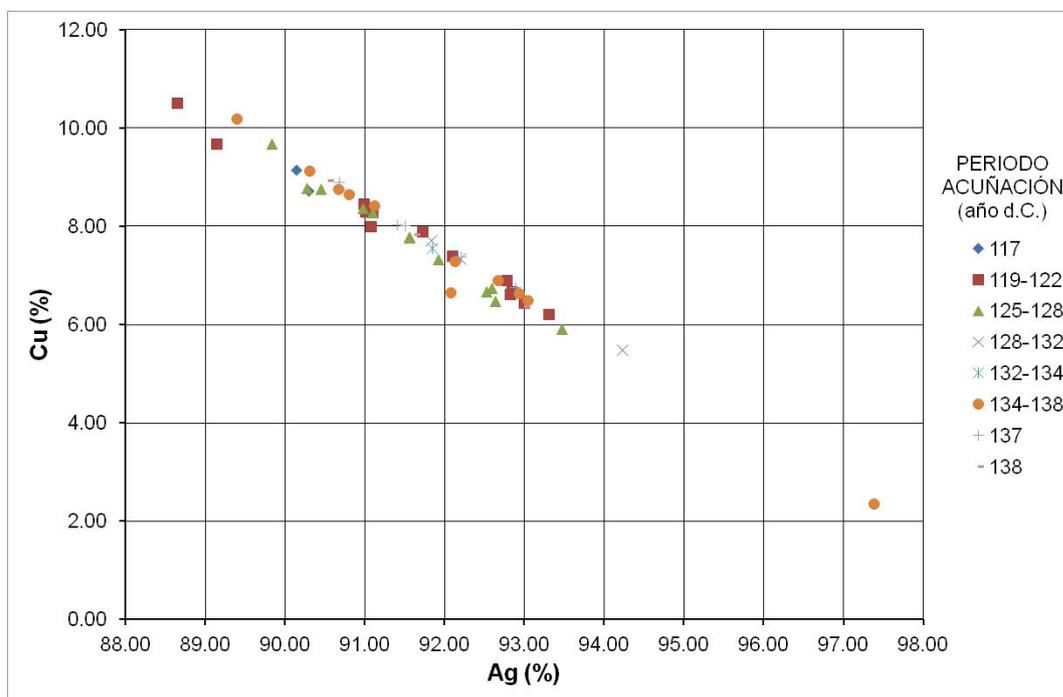


Figura 4- Correlación entre las concentraciones de cobre y plata obtenidas en los análisis EDXRF de los denarios de la Tabla 1.

	Denario Referencia	Efigie en Anverso	Año acuñación (d.C.)	Peso (g)	Ag (%)	Cu (%)	Pb (%)
1	MPV512F	Adriano	117-117	2.98	90.30	8.73	0.75
2	MPV614F	Adriano	117-117	3.32	90.14	9.15	0.49
3	MPV510F	Adriano	119-122	3.63	91.10	8.28	0.40
4	MPV539F	Adriano	119-122	3.10	93.30	6.22	0.34
5	MPV667F	Adriano	119-122	3.07	91.72	7.89	0.25
6	MPV675F	Adriano	119-122	3.14	88.65	10.51	0.67
7	MPV698F	Adriano	119-122	3.50	91.07	8.01	0.47
8	MPV701F	Adriano	119-122	3.18	91.01	8.30	0.52
9	MPV739F	Adriano	119-122	3.16	89.14	9.67	0.81
10	MPV745F	Adriano	119-122	3.31	92.85	6.67	0.34
11	MPV758F	Adriano	119-122	3.34	90.99	8.46	0.36
12	MPV776F	Adriano	119-122	3.24	93.00	6.45	0.42
13	MPV815F	Adriano	119-122	3.12	92.78	6.90	0.13
14	MPV816F	Adriano	119-122	3.28	92.82	6.62	0.41
15	MPV697F	Adriano	119-122	3.00	92.10	7.40	0.26
16	MPV486F	Adriano	125-128	3.20	91.92	7.33	0.58
17	MPV520F	Adriano	125-128	3.17	92.52	6.67	0.67
18	MPV526F	Adriano	125-128	3.23	90.98	8.37	0.47
19	MPV533F	Adriano	125-128	3.12	90.27	8.78	0.70
20	MPV538F	Adriano	125-128	3.08	93.47	5.91	0.45
21	MPV592F	Adriano	125-128	3.11	91.55	7.79	0.45
22	MPV610F	Adriano	125-128	3.20	90.44	8.75	0.63
23	MPV659F	Adriano	125-128	3.27	89.83	9.68	0.35
24	MPV662F	Adriano	125-128	3.28	92.59	6.75	0.49
25	MPV674F	Adriano	125-128	3.23	91.56	7.77	0.49
26	MPV742F	Adriano	125-128	3.17	92.63	6.48	0.54
27	MPV746F	Adriano	125-128	3.24	91.10	8.28	0.40
28	MPV841F	Sabina	128-132	3.13	92.20	7.35	0.35
29	MPV846F	Sabina	128-132	3.10	91.83	7.72	0.32
30	MPV851F	Sabina	128-132	3.07	94.23	5.48	0.15
31	MPV654F	Adriano	132-134	3.30	91.85	7.55	0.48
32	MPV626F	Adriano	134-138	3.16	90.66	8.77	0.28
33	MPV721F	Adriano	134-138	3.02	92.67	6.91	0.27
34	MPV755F	Adriano	134-138	3.33	90.30	9.13	0.32
35	MPV770F	Adriano	134-138	3.01	90.80	8.65	0.36
36	MPV771F	Adriano	134-138	3.18	92.93	6.63	0.30
37	MPV827F	Sabina	134-138	3.28	93.04	6.49	0.33
38	MPV833F	Sabina	134-138	3.25	91.12	8.42	0.31
39	MPV836F	Sabina	134-138	2.44	92.07	6.66	0.91
40	MPV843F	Sabina	134-138	3.25	89.39	10.20	0.24
41	MPV848F	Sabina	134-138	3.12	92.13	7.29	0.41
42	MPV850F	Sabina	134-138	3.20	97.38	2.36	0.12
43	MPV853F	Elio	137-137	3.45	92.88	6.76	0.24
44	MPV856F	Elio	137-137	3.29	91.41	8.04	0.26
45	MPV858F	Elio	137-137	3.26	92.20	7.38	0.30
46	MPV863F	Elio	137-137	2.96	91.51	8.01	0.28
47	MPV865F	Elio	137-137	2.98	90.68	8.91	0.27
48	MPV868F	Antonino	138-138	3.26	90.54	8.93	0.31
49	MPV870F	Antonino	138-138	3.31	93.00	6.37	0.42
50	MPV872F	Antonino	138-138	3.15	91.63	7.83	0.23

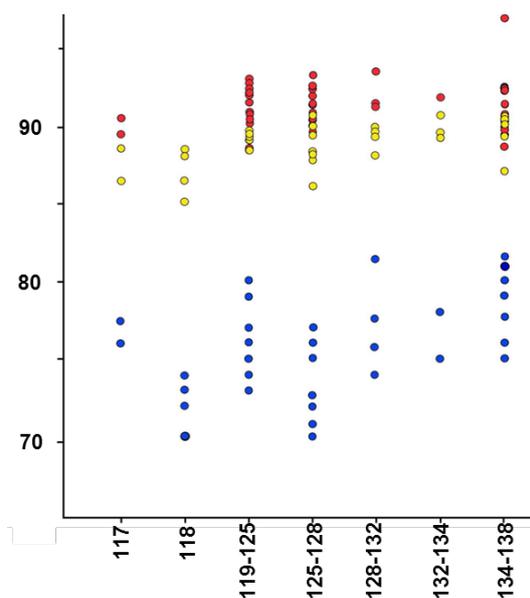


Figura 5- Comparación del contenido porcentual de plata en los denarios de Adriano analizados por distintos investigadores. Rojo: presente trabajo. Amarillo: Walker, 1977. Azul: Butcher y Ponting, 2011.

Los valores de concentración porcentual de plata aportados por Butcher y Ponting en los diferentes intervalos cronológicos, no muestran marcadas oscilaciones. Comparando sus resultados con los presentados en este trabajo se ponen de manifiesto las discrepancias en el contenido de plata, obteniendo, tal y como se ha indicado anteriormente, valores promedio inferiores a los medidos en el presente trabajo (ver Figura 4): 76.3% frente al 90.22% en el año 117 d.C.; 75.4% frente al 91.58% en el periodo 119-122 d.C.; 73.3% frente al 91.57% en los años 125-128 d.C.; 76.8% frente al 92.75% en los años 128-132 d.C.; 76.0% frente al 91.85% en el periodo 132-134 d.C.; y, finalmente, 78.9 % de plata frente a 91.90 % de plata en los años 134-138 d.C. (Butcher y Ponting, 2011).

De acuerdo con los estudios realizados hasta el momento, las devaluaciones monetarias que tuvieron lugar durante la dinastía Antonina (96-192 d.C.) siguen la siguiente pauta: Nerva (96-98 d.C.) no efectuó ninguna modificación y

continuó las emisiones monetarias de denarios con un 90 % de plata. Su sucesor, Trajano (98-117 d.C.), mantuvo el estándar de Domiciano (90 % de plata) durante los dos primeros años de reinado, pero en el año 100 d.C. lo redujo hasta el 80 % (Butcher et al., 2009). Las emisiones de Adriano presentaban contenidos porcentuales de plata que oscilaban entre el primer estándar neroniano (80 %) y valores inferiores, por encima del 70 %, con reducciones e incrementos porcentuales de plata que, durante su mandato, se mantuvieron entre estos márgenes (Butcher y Ponting, 2011). Las discrepancias entre las concentraciones porcentuales de plata aportadas en este trabajo, los análisis de D. R. Walker (Walker, 1977) y los análisis de K. Butcher y M. Ponting (Butcher y Ponting, 2011), radican en el tipo de análisis efectuado. Mientras que el presente trabajo y el análisis de Walker está basado en un análisis no destructivo mediante XRF que queda circunscrito a capas superficiales de los denarios, el análisis de Butcher y Ponting es un análisis agresivo que aporta información de la aleación más allá de la superficie del denario, alcanzando el núcleo o parte central de la moneda. Por tanto, los resultados de los análisis no destructivos mediante XRF serían compatibles con un enriquecimiento superficial de plata, mientras que los análisis de Butcher y Ponting mediante ICP y AAS aportan información de la aleación en el núcleo del denario que no está afectada por un supuesto (intencionado o no) enriquecimiento superficial. Este hecho se pone de manifiesto en el análisis realizado sobre un denario de plata emitido durante el mandato de Adriano y adquirido en un comercio numismático. En este denario se ha practicado un corte en sección transversal y se ha analizado mediante SEM-EDX la composición porcentual de plata en el núcleo y en la superficie. Los resultados obtenidos aportan una concentración de plata del 71.10% en el núcleo del denario que se incrementa hasta un 90.50 % en capas superficiales.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se concluye que los análisis no destructivos mediante EDXRF en los 50 denarios pertenecientes al Tesoro de Llíria emitidos por la ceca de Roma durante el mandato de Adriano, aportan información de la aleación en capas superficiales con porcentajes de plata elevados en relación con los datos aportados por otros autores mediante técnicas destructivas. Apuntamos la posibilidad de que estas discrepancias estén asociadas a un probable enriquecimiento superficial de plata que por diversos métodos provocarían un gradiente de concentración de plata inferior en el núcleo de la moneda y que se incrementa en las capas superficiales. Por tanto, y dado que el material numismático arqueológico con aleación plata-cobre, presenta a menudo enriquecimientos superficiales de plata (intencionados o no), las técnicas analíticas no destructivas como la XRF, cuyo poder de penetración no excede de unas pocas decenas de micras, solo aportan datos referentes a la aleación en capas superficiales. En estos casos, y siempre que los responsables de la conservación de las piezas lo autoricen, sería necesario combinar diferentes técnicas analíticas (XRF, particle induced X ray emission-PIXE, Rutherford backscattering spectrometry-RBS, gamma ray transmission-GRT, activación neutrónica-NAA, ...) para obtener información de la composición global de la aleación con que fueron manufacturadas las monedas. En lo que respecta al periodo de emisión de los denarios analizados, no se han observado devaluaciones en la ley de la aleación en superficie, manteniéndose, sin variaciones significativas, en un valor promedio de $91.7 \pm 1.5\%$ en peso, lo que es compatible con el periodo de estabilidad política y económica del mandato de Adriano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Museo de Prehistoria de Valencia las facilidades prestadas para realizar los análisis EDXRF de los denarios del Tesoro de Llíria

BIBLIOGRAFIA

- Ager, F. J., Moreno-Suárez, A. I., Scrivano, S., Ortega-Feliu, I., Gómez-Tubío, B. & Respaldiza, M. A. 2013. "Silver surface enrichment in ancient coins studied by micro-PIXE", *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 306, 241–244.
- Beck, L., Bossonnet, S., Réveillon, S., Eliot, D. & Pilon, F., 2004. "Silver surface enrichment of silver-copper alloys: a limitation for the analysis of ancient silver coins by surface techniques", *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 226, 153–162.
- Butcher, K., Ponting, M. & Muona, J. 2009. "The denarii of Otho: a stylistical and compositional study", *Rivista Italiana di Numismatica* 110: 297-316.
- Butcher, K. & Ponting, M. 2011. "The Denarius in the First Century", en Holmes, I. (ed). *Proceedings of the XIV International Numismatic Congress, Glasgow 2009*.
- Cesareo, R., Ridolfi, E.; Marabelli, M., Castellano, A., Buccolieri, G., Donativi, M., Gigante, G., Brunetti, A. & Rosales, M. 2008. "Portable systems for energy dispersive X-ray fluorescence analysis of works of art", en Ph. J. Potts y M. West (eds.), *Portable X-ray fluorescence spectrometry. Capabilities for in situ analysis*. RSC Publishing, Cambridge.
- Del Hoyo-Meléndez, M., Swit, P., Matosz M., Wozniak, M., Klisinska-Kopacz, A. & Bratasz, L. 2015. "Micro-XRF analysis of silver coins from medieval Poland". *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 349, 6–16.
- Delegido, C. 2011. "El Tesoro de Llíria". XIV Congreso Nacional de Numismática, Nules-Valencia, 25-27 de octubre de 2010.
- Escrivá, V., Gozalbes, M. & Vidal, X. 2005. "Llíria III. Un gran tesoro de comienzos del siglo III", en A. Ribera; y P.P. Ripollès (eds.), *Tesoros Monetarios de Valencia y su entorno*. Ayuntamiento de Valencia, Valencia.
- Ferrero, J.L., Roldán C., Navarro E., Ardid M., Marzal M., Almirante J., Ineba P., Vergara J. & Mata C. 1999. "Applications of the X-ray fluorescence analysis to the cultural patrimony of the Comunidad Valenciana (Spain): painting, metal and paper", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 240, nº 2: 523-528.
- Ferretti, M. 2000. "X-ray fluorescence applications for the study and conservation of cultural heritage", en: D. A. Creagh y D. C. Bradley (eds.), *Radiation in art and archaeometry*. Elsevier, Amsterdam.
- Gigante, G., Ridolfi, S., Ricciardi, P. & Colapietro, M. 2005 Quantitative analysis of ancient metal artefacts by means of portable energy dispersive X-ray fluorescence spectrometers: a critical review, in: R. Van Grieken, K. Janssens (eds.), *Cultural Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non-destructive Testing and Micro-analysis*, Balkema Publishers, London.
- Gorghinian, A., Esposito, A., Ferretti, M. & Catalli, F. 2013. "XRF analysis of Roman Imperial coins".

- Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* 309, 268–271.
- Gozalbes, M., Ripollés, P.P., Escrivà, V. & Vidal, X. 2003. "El tesoro de denarios imperiales de Lliria III (Valencia)". *Actas del XIII Congreso Internacional de Numismática*. Madrid, 15-19 septiembre, 2003. Ministerio de Cultura. Madrid
- Ingo, G. M., Angelini, E., de Caro, T. & Bultrini, G. 2004. "Combined use of surface and micro-analytical techniques for the study of ancient coins". *Appl. Phys. A* 79 (2), 171–176.
- Kantarelou, V., Ager, F. J., Eugenidou, D., Chaves, F., Andreou, A., Kontou, E., Katsikosta, N., Respaldiza, M. A., Serafin, P., Sokaras, D., Zarkadas, C., Polikreti, K. & Karydas, A. 2011 "X-ray fluorescence analytical criteria to assess the fineness of ancient silver coins: application on Ptolemaic coinage", *Spectrochim. Acta B* 66, 681–690.
- Klockenkamper, R., Bubert, H. & Hasler, K. 1999. "Detection of near-surface silver enrichment on roman imperial silver coins by X-ray spectral analysis". *Archaeometry* 41, 2, 311–320.
- Ponting, M. 2012. "The Substance of Coinage: the role of scientific analysis in Ancient Numismatics", en W. Metcalf (ed.), *The Oxford Handbook of Greek and Roman Coinage*, Oxford University Press, Oxford.
- Rodrigues, M., Cappa, F., Schreiner, M., Ferloni, P., Radtke, M., Reinholz, U., Woyteke, B. & Alramef, M. 2011. Further metallurgical analyses on silver coins of Trajan (AD 98–117), *J. Anal. At. Spectrom.* 26, 984–991.
- Schweizer, F. 1972. "Analysis of ancient coins using a point source linear X-ray spectrometer: a critical review", in: E.T. Hall, D.M. Metcalf (eds.), *Methods of Chemical and Metallurgical Investigation of Ancient Coinage*, Royal Numismatics Society, No. 8, 1972.
- Scott, D. A. 1991. *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- Walker, D.R. 1976. *The Metrology of the Roman Silver Coinage, part I: from Augustus to Domitian*, Oxford, BAR International Series.
- Walker, D.R. 1977. *The Metrology of the Roman Silver Coinage, part II: from Nerva to Commodus*, Oxford, BAR International Series.