

UNA *OFFICINA FERRARIA* EN LA *MANSIO* DE
ARRIACA (MARCHAMALO, GUADALAJARA)
A officina ferraria at the mansio of
Arriaca (Marchamalo, Guadalajara)

JUAN AURELIO PÉREZ MACÍAS
Universidad de Huelva
orcid.org/0000-0002-0330-9578

Recibido: 10/01/2022
Revisado: 16/03/2022

Aceptado: 25/05/2022
Publicado: 03/10/2022

RESUMEN

En este trabajo se presentan los análisis de los materiales metalúrgicos del asentamiento de El Tesoro (Marchamalo, Guadalajara). Estos materiales revelan que en este sitio existió una importante producción de hierro, de la que quedan como mejor reflejo las escorias planoconvexas de refinado de forja. Este trabajo siderúrgico se relaciona con los yacimientos minerales próximos del Sistema ibérico y la existencia de una importante vía de comunicación, de la que el propio yacimiento forma parte como una mansio que se ha identificado con Arriaca.

PALABRAS CLAVE

Roma; Guadalajara; Hierro; Forja; Camino.

ABSTRACT

This paper presents the analysis of metallurgical materials from the El Tesoro settlement (Marchamalo, Guadalajara). These materials reveal that on this site there was an important production of iron, of which the plano-convex slags from forge refining are the best reflection. This iron work is related to the nearby mineral deposits of the Iberian System and the existence of an important communication route of which the site was a mansio that has been identified with Arriaca.

KEY WORDS

Rome; Guadalajara; Iron; Forging; Road.

El yacimiento arqueológico de El Tesoro en Marchamalo (Guadalajara) es conocido de antiguo (Fita, 1900, 502-503; Gamo Pazo, 2013b) y ha aportado un interesante conjunto de materiales de hierro y hueso (Abascal Palazón, 1991). Por su situación Fidel Fita ya lo identificó con la *mansio* de *Arriaca* (Fita, 1900, 502), en la vía que comunicaba la ciudad de *Complutum* con *Caesaraugusta* (Gamo Pozo, 2013a; Caballero Casado, 2016). El análisis de los distintos elementos metalúrgicos exhumados en este asentamiento permite presentar que en esta *mansio* existía un taller para la elaboración de útiles de hierro (*officina ferraria*), que se instaló aquí debido a la proximidad a otros centros siderúrgicos con los que mantenía relación y al calor de las posibilidades comerciales que abrigaba esta vía de comunicación (figura 1).

La ampliación del Polígono Industrial del Henares para la construcción de la Ciudad del Transporte (290 hectáreas), un centro logístico multimodal del centro de la Península Ibérica, ha motivado excavaciones arqueológicas preventivas. Estas intervenciones han documentado en el sitio de El Tesoro una ocupación desde épocas prerromana (carpetanos), romano republicana, alto imperial y tardorromana. De época tardorromana se han exhumado cerca de 2 toneladas de escorias metalúrgicas y muchas evidencias de elementos de huesos semielaborados o desechados, lo que nos evidencia la existencia de talleres metalúrgicos y de hueso. Esto nos lleva a reconsiderar que los objetos metálicos y de hueso que se recogieron en superficie anteriormente sean una muestra de estas actividades y no los restos de una necrópolis.



Figura 1. Situación del asentamiento de El Tesoro (Marchamalo, Guadalajara)

LA METALURGIA DEL HIERRO EN *ARRIACA*.

Los elementos metalúrgicos de *Arriaca* pueden clasificarse en dos categorías, las escorias de forja de fondo convexo, y los útiles de hierro, clavos, anillas y hojas de cuchillo fundamentalmente. Son elementos que se asocian a un proceso de forja y herrería, y no están presentes los residuos de la reducción del mineral, las escorias de sangrado. Se ha realizado una selección para su analítica mediante Microsonda de Electrones (EMPA) en los Servicios Generales de Investigación de la Universidad de Huelva (EM-PAG). La rutina de trabajo ha consistido en un barrido general de cada una de las muestras y barridos puntuales de cada una de las fases mineralúrgicas y metalúrgicas presentes en ellas.

De las escorias de refino en forja se han analizado tres ejemplares. Todas estas escorias proceden de C-68 (UE 520) y C-71 (UE 630 y 639). Su aspecto físico es el de una escoria de bajo peso, pero muy rica en óxidos de hierro, de tonalidades rojizo-anaranjadas (figura 2). Están fuertemente remineralizadas en su superficie externa, por lo que en principio se interpretaron como posibles fragmentos de esponja de hierro. Sin embargo, su analítica no lo ha confirmado. Son de pequeño tamaño (tabla 1) y su composición responde a una escoria siderúrgica, con fases de fayalita y wüstita.



Figura 2. Escorias de forja de fondo convexo

Arriaca 1

La primera muestra examinada tiene fases de fayalita ricas en calcio: 32,73% Si O₂, 28,89% Ca O, 1,74% Mn O, 0,96% Al₂ O₃ y 33,33% Fe O (tabla 2; figuras 3, 4 y 5). Destaca la alta proporción de

	Longitud	Anchura	Grosor
C.68/UE 520	12 cm	11 cm	5 cm
C.71/UE 630	12 cm	10 cm	6 cm
C.71/UE 630	12 cm	10 cm	6 cm
C.71/UE 630	10 cm	9 cm	4 cm
C.71/UE 639	11,5 cm	10 cm	6 cm
C.71/UE 639	12 cm	8 cm	5 cm
C.71/UE 639	12 cm	10 cm	8 cm
C.71/UE 639	13 cm	12 cm	7 cm

Tabla 1. Medidas de las muestras de escorias de forja de fondo convexo.

calcio, que debe originarse por la utilización de fundentes calizos en la reducción. No tiene representación porcentual de otros metales distintos al hierro, por lo que hay que descartar totalmente que se deban a procesos de tratamiento de minerales de cobre, plata o plomo, en cuyo caso quedarían algunas drusas de esos materiales entre las fases de fayalita. Las fases más abundantes en la muestra son las de wüstita, que aparecen tanto en fases dendríticas de tonalidad blanquecina como en otras más apagadas. En los dos casos se destaca la proporción del hierro, y la baja representación del sílice y calcio que abundan en las fases de olivino: 0,006% Si O₂, 0,12% Ca O, 0,026% Mn O, 0,01% Al₂ O₃ y 99,00% Fe O; y 0,03% Si O₂, 0,09% Ca O, 1,59% Mn O, 1,43% Mg O, 0,44% Al₂ O₃ y 95,39% Fe O. Hay que subrayar la aparición de algunas partículas de color blanco brillante de hierro metálico (ferrita).

Arriaca 1	Fayalita	Wüstita	Wüstita	Hierro
SiO ₂	32,73	0,006	0,037	-
CaO	28,897	0,124	0,095	0,107
MnO	1,746	0,026	1,59	0,065
MgO	2,161	0,018	1,43	0,022
Al ₂ O ₃	0,963	0,015	0,44	0,012
Ag ₂ O	-	0,011	-	-
FeO	33,334	100,694	95,392	100,006
PbO	-	0,05	0,002	0,054
CuO	0,007	-	0,1	-
K ₂ O	-	-	-	-

Tabla 2. Fases metalúrgicas de Arriaca 1.

Arriaca 2.

La segunda muestra 2 contiene las mismas fases metalúrgicas ya comenta en la muestra anterior, es decir, son muy uniformes desde el punto de vista



Figura 3. Escoria de refino Arriaca 1.

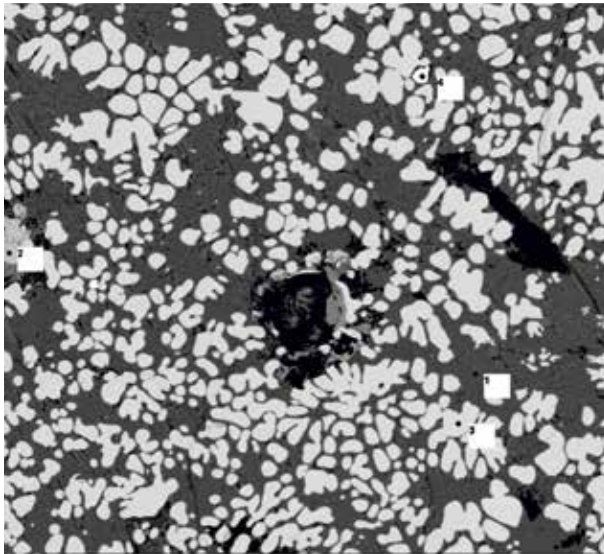


Figura 4. Espectro microscópico de la muestra de Arriaca 1.

analítico (tabla 3; figura 6, 7 y 8). No se presentan evidencias minerales o metalúrgicas en las que estén presentes espectros de minerales de cobre, plomo o plata. Estas representadas las fases grisáceas de silicatos de hierro, con 35% Si O₂, 34,33% Ca O, 1,95% Mn O, 0,06% Al₂ O₃ y 33,37% Fe O. Son también predominantes las fases de wüstita con: 0,09% Si O₂, 0,18% Ca O, 0,03% Mn O y 82,7% Fe O; y 0,16% Ca O, 2,40% Mn O, 1,16% Mg O, 0,39% Al₂ O₃ y 95,79 % Fe O. Las drusas de hierro metálico alcanzan un enriquecimiento de 99,97% en hierro y 0,22% Ca O.

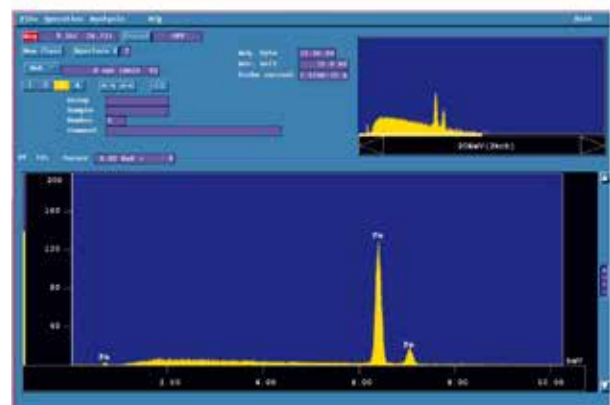
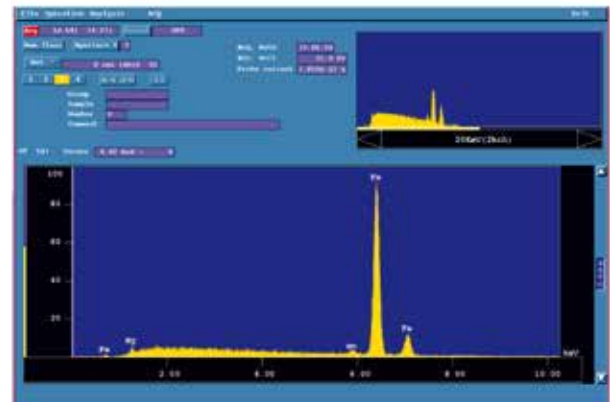
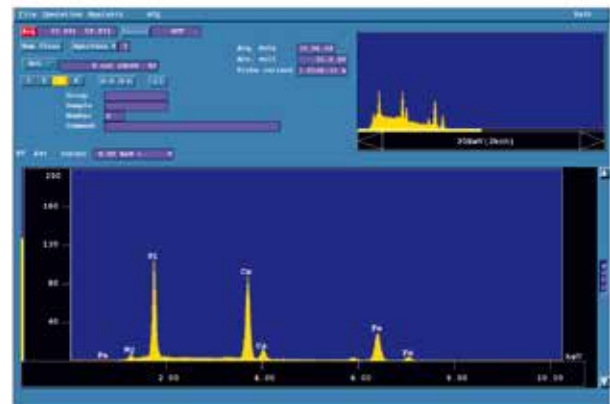


Figura 5. Espectogramas de Arriaca 1.

Arriaca 2	Fayalita	Wüstita	Wüstita	Hierro
SiO ₂	34,331	0,184	0,169	0,037
CaO	1,951	0,039	2,403	0,014
MnO	1,309	-	1,169	0,004
MgO	0,065	-	0,398	-
Al ₂ O ₃	-	0,007	-	-
Ag ₂ O	-	-	-	-
FeO	30,373	82,7	95,792	99,971
PbO	-	0,048	-	-
CuO	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-

Tabla 3. Fases metalúrgicas de Arriaca 2.



Figura 6. Escoria de refino Arriaca 2.

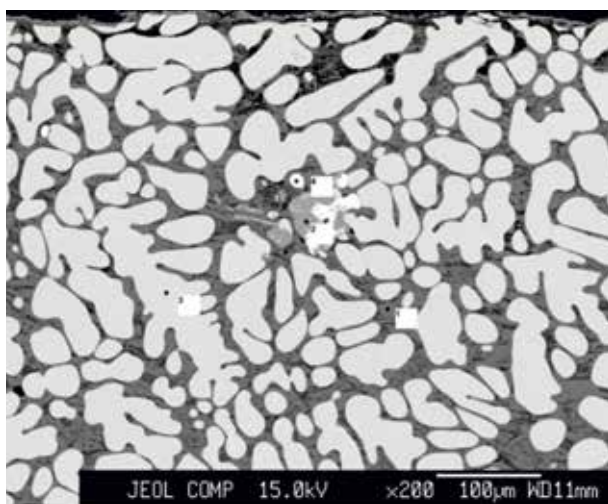


Figura 7. Espectro microscópico de Arriaca 2.

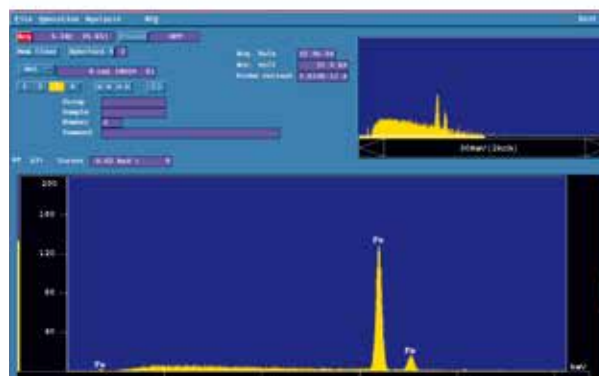
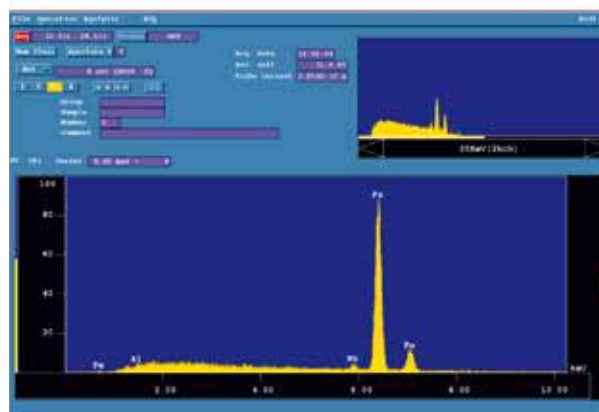
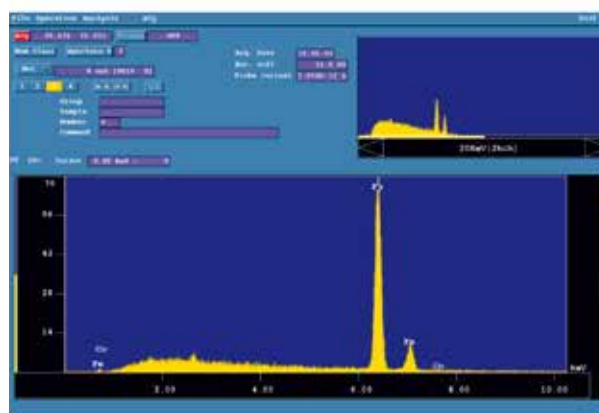
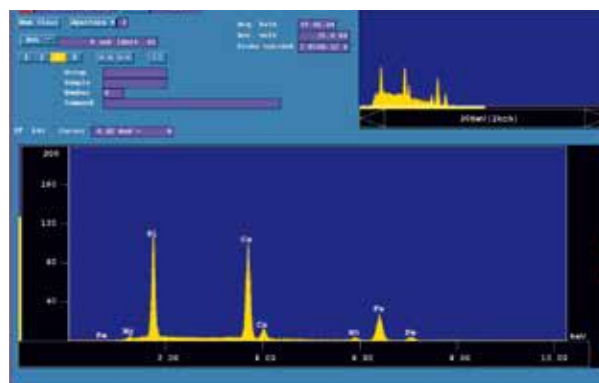


Figura 8. Espectogramas de Arriaca 2.

Arriaca 3.

La tercera de las muestras viene a confirmar la composición típica de estas escorias de forja (tabla 4; figuras 9, 10 y 11). Tampoco se encuentran fases minerales o metalúrgicas con valores reseñables de cobre, plomo o plata, por lo que no cabe relacionarlas con esas metalurgias, tal como muestran sus espectrogramas (figura 6). Contiene fases metalúrgicas de silicatos de hierro enriquecidos en calcio: 36,79% Si O₂, 17,00% Ca O, 0,25% Mn O, 1,09% Mg O, 7,49% Al₂ O₃ y 32,87% Fe O. Estas fayalitas tienen un enriquecimiento destacado en aluminio debido a que la sonda analizó una zona de huecos formados por las burbujas de oxígeno, donde ha actuado más la oxidación superficial. Las muestras de wüstita son asimismo muy ricas en hierro y bastante limpias de impurezas: 1,69% Si O₂, 2,23% Ca O, 0,11% Mg O, 0,04% Al₂ O₃ y 81,19% Fe O; y 0,11% Si O₂, 0,13% Ca O, 0,22% Mn O, 0,85% Mg O y 95,97% Fe O. Como en las muestras anteriores también se encuentran partículas de hierro metálico con una riqueza de 99,66 en hierro.

Arriaca 3	Fayalita	Wüstita	Wüstita	Hierro
SiO ₂	36,79	1,69	0,11	0,01
CaO	17,00	0,23	0,13	0,07
MnO	0,25	-	0,22	0,02
MgO	1,09	0,11	0,85	-
Al ₂ O ₃	7,49	0,04	0,31	0,008
Ag ₂ O	-	-	0,013	-
FeO	32,87	81,19	95,97	99,66
PbO	0,043	0,01	0,03	0,01
CuO	0,001	-	0,05	0,008
K ₂ O	3,32	-	-	-

Tabla 4. Fases metalúrgicas de Arriaca 3.

Este tipo de escorias plano-convexas sitúan el tratamiento siderúrgico llevado a cabo en *Arriaca* en un punto preciso la cadena productiva de la elaboración de instrumentos de hierro.

Los análisis de los objetos de hierro constaban que su composición no supera el 0,1 % de carbono. Es una proporción baja, pero suficiente para darle dureza el hierro (figura 7).

La metalurgia del hierro fue la más tardía en dominarse debido a la alta temperatura de fusión de este metal, que se alcanza a los 1538° C, mientras el cobre metálico en estado líquido se forma a



Figura 9. Escoria de refino Arriaca 3.

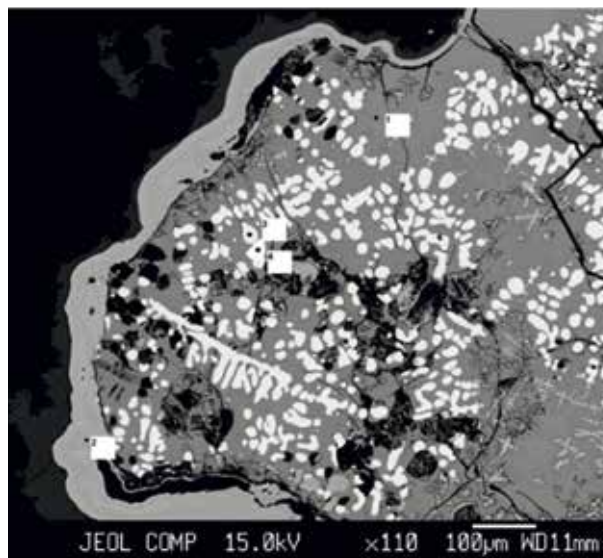


Figura 10. Espectro microscópico de Arriaca 3.

los 1083°C. Por ello todo el hierro antiguo es hierro forjado, el formado antes del punto de fusión.

El hierro colado, el formado a partir de la temperatura de fusión, se descubrió en China en el siglo IV a.C. (Tycolette, 1984), pero no se conoció en Europa hasta la Edad Media, cuando se consiguió obtener por primera vez una colada de hierro fundido (Pleinier, 2000). Su uso no se extendería hasta el siglo XV, después de regularizarse el comercio con China. A lo largo de la Edad Media se incorporarían a la siderurgia las novedades que aportaron la energía hidráulica y el alto horno. El alto horno, que incorporaba como novedades su mayor capaci-

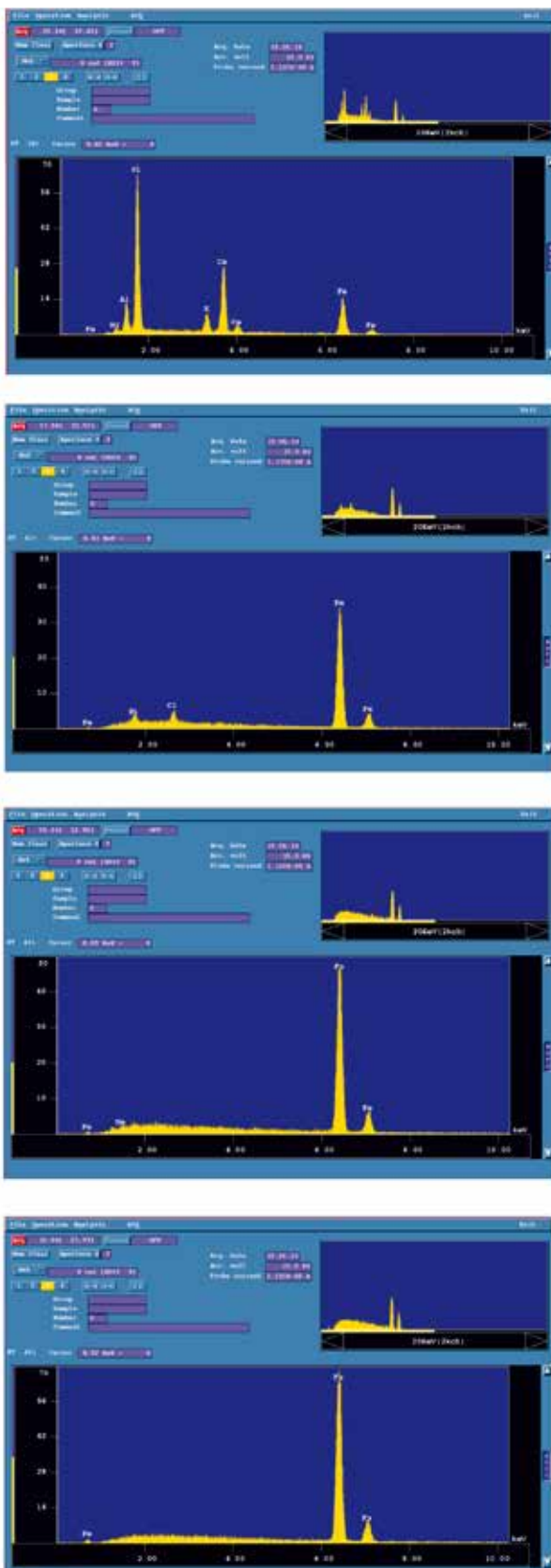


Figura 11. Espectrogramas de Arriaca 3.



Figura 12. Útiles de hierro de Arriaca.

dad, permitía un tiempo de reducción más amplio y mejores condiciones de oxigenación por la combinación de toberas grandes con fuelles conectados a medios hidráulicos. Con ello aumentaron las posibilidades de rendimiento del mineral, y el martillado activado por los mecanismos hidráulicos conseguía una dureza especial en los hieiros de acuerdo con su destino (armas, herramientas agrícolas, etc.).

Los productos arqueometalúrgicos de la siderurgia pueden ser de varios tipos, relacionados con los distintos pasos del tratamiento del hierro, la reducción (smelting), la forja (forging) y la herrería (smithing).

Los minerales más empleados para la reducción han sido los óxidos, entre ellos por sus cualidades siderúrgicas la magnetita (Fe_3O_4), aunque también ofrecían buenos resultados otros óxidos, como la hematita (Fe_2O_3), e hidróxidos como la goethita ($FeO(OH)$), y carbonatos como la siderita ($FeCO_3$). Un tratamiento más complicado era necesario con los minerales de hierro combinados con sulfuros, como la pirita, que necesitaban de sofisticados métodos de calcinación para transformarlos en óxidos que pudieran reducirse directamente.

Estos óxidos de hierro podían reducirse con carbón vegetal, que favorece la formación de monóxido de carbono (CO), que puede combinarse con el oxígeno y liberar el hierro (Tylecote *et al.*, 1971; Pleiner, 1993). El carbono es soluble en el hierro y a medida que avanza la reducción del óxido de hierro con el carbón se produce la disolución de un poco de este elemento en el hierro. Ante un exceso de monóxido de carbono el óxido de hierro podía ser casi totalmente reducido alrededor de los 900° C, pero dado que el punto de fusión del hierro es más alto, el hierro se encuentra en estado sólido,

mezclado con la escoria y otros elementos (esponja de hierro). El aire para la combustión entra por las toberas y cerca del fondo se encuentra un orificio para sangrar la escoria al exterior, hacia un hoyo excavado delante del horno (hoyo de las escorias). El horno se mantiene lleno con cargas alternantes de mineral finamente triturado, fundente y carbón, y la granulometría de la carga debe ser uniforme, para que puedan ascender los gases. El fundente puede ser de dos tipos, o bien sílice, que reacciona con el óxido de hierro para formar la escoria (silicato de hierro, fayalita) o cal, que forma una escoria en forma de silicato de hierro y calcio. La escoria retiene la ganga del mineral y puede extraerse en forma líquida del horno (escoria de sangrado). Los hornos pueden sangrarse varias veces antes de su destrucción para extraer la esponja de hierro, y la composición de la esponja de hierro puede regularse aumentando la temperatura en la zona de las toberas incorporando más o menos combustible. El control de la carga de mineral y combustible es así un factor importante para lograr una buena esponja de hierro más o menos rica en hierro.

Desde el punto de vista de la temperatura, a lo largo de la reducción se producen distintas reacciones que forman tres zonas en el horno (Wynne y Tylecote, 1958; Pleiner, 1989). La zona más próxima a las toberas es donde se alcanza mayor temperatura y es por tanto donde se va a ir formando mayor cantidad de hierro metálico. Fuera de esa zona la temperatura es menor, pero es suficiente para que se vaya formando escoria. La escoria se extiende hacia el fondo del horno y sobre la esponja de hierro. A menor temperatura se encuentra el mineral de hierro triturado y el carbón, que van descendiendo a medida que baja la escoria y va tomando más cuerpo la esponja de hierro.

El mineral se va reduciendo por etapas, primero de Fe_2O_3 a Fe_3O_4 y finalmente hacia Fe_3O y Fe O , hasta terminar como metal (Pleiner, 1993). Es decir, óxido de hierro, óxido ferroso y hierro metálico, fases que aparecen caracterizadas en los espectros microscópicos de las escorias. Durante la reducción se llevan a cabo los siguientes procesos: remoción del oxígeno del mineral de hierro por la reacción química con el carbón, que produce monóxido de carbono, dióxido de carbono y hierro, y la separación del metal de la ganga, que queda retenida en la escoria, que va al fondo del horno. El proceso de reducción comienza en torno a los

600-700° C, y a los 1100°C empieza a formarse la fayalita (escoria) y una mata de hierro (esponja de hierro) en la línea de las toberas, rica en hierro metálico, que incluía todavía cierta cantidad de escoria, que se sangra al exterior del horno mediante el agujero practicado en la base del horno, hacia donde se escurre por gravimetría. A partir de los 700 ° C el óxido de hierro puede ir reduciéndose a una esponja de hierro, y el fundente si es calizo va descomponiéndose gradualmente a partir de los 800° C para formar la escoria. A la par, aunque el monóxido de carbono y el dióxido de carbono se encuentran equilibrados en el horno entre los 300° C y 1000° C, con el incremento de la temperatura se favorece la formación de más monóxido de carbono a expensas de dióxido de carbono. Al alcanzar los 1000° C se completa la reacción y todo el carbono se convierte en monóxido de carbono, que actúa como agente reductor. Cuando el horno está bien saturado de carbono se favorece la formación de hierro metálico a menor temperatura, a partir de los 1200° C, mientras la escoria se va formando a los 1100° C. Se produce con ello más cantidad de hierro metálico por la saturación de hierro con el aumento de monóxido de carbono, que baja la temperatura de formación del hierro. El hierro disuelve parte del carbono, sílice, manganeso y potasio del mineral, y la escoria retiene calcio, sílice, magnesio y manganeso.

Son tres pues los productos metalúrgicos que se obtienen de la reducción, la escoria de sangrado (tap slag), la escoria de horno (furnace slag) y la esponja de hierro dulce. La esponja de hierro se forma en la zona más próxima a la entrada de aire por las toberas, y la escoria, silicatos de hierro o ferrosilicatos con algo de wüstita se hacen salir del horno por el agujero de sangrado. Las escorias de horno son la parte de fayalita que queda adherida a las paredes de horno o en las áreas próximas a la esponja de hierro y no se distinguen químicamente de las escorias de sangrado. La escoria de sangrado es una escoria de textura pastosa, de coloración grisácea a negra, con la superficie exterior formada por la estructura de colada que se forma al salir por el agujero de sangrado. Las escorias de horno corresponden a la parte de la escorificación que permanece en el interior del horno, y no tiene por ello esas coladas características del sangrado; pueden contener también partes de las paredes del horno, carbón e incluso partículas de hierro metálico, y por lo general son más pesadas

que las escorias de sangrado. A diferencia de las escorias de sangrado, las escorias de horno no presentan la forma de vertido de las escorias de sangrado y son mucho más densas. En las escorias de sangrado la cantidad de hierro no supera el 50-60% Fe, mientras en las escorias de horno puede alcanzar hasta el 80-90% Fe. Ambas escorias suelen ser de tonalidad gris o negra brillante, y están muy vitrificadas.

En las escorias la wüstita es un elemento determinante para clasificar las escorias siderúrgicas, y se forman cuando el óxido de hierro reacciona con el carbono para acabar convirtiéndose en óxido ferroso (Bachmann, 1982, 30-33). Aunque la wüstita puede aparecer en otro tipo de metalurgia en presencia de óxidos de hierro, generalmente solo aparecen en las escorias de las fundiciones de hierro (Keesmann, 1989). En las escorias de sangrado la wüstita es un componente minoritario frente a la fayalita. Su porcentaje aumenta en las escorias de horno.

Al final del sangrado de la escoria y de la reducción no se obtenía un lingote o masa de hierro, sino una mata de hierro (esponja de hierro), pues no se podían limpiar totalmente las impurezas de escoria y carbón. Las esponjas de hierro son casi siempre muy densas, aunque la porosidad puede alcanzar un grado cercano al 10-50%. La esponja de hierro contiene todavía cierta cantidad de wüstita y fayalita. La wüstita comienza a formarse a una temperatura de 600-700° C y a 1000° C reacciona con el carbono para formar hierro metálico. A esa temperatura el hierro aparece mezclado con escoria, pero a partir de los 1117° C la escoria (fayalita) alcanza su punto de fusión y se desprende del hierro en su mayor parte. Alguna parte de escoria queda adherida al hierro metálico en forma de fayalita y wüstita. El hierro metálico aparece en drusas o filamentos, y está asociado a escoria en una proporción que puede variar mucho (10-80%). En ocasiones los fragmentos de carbón pueden ser muy frecuentes, es decir, es un producto formado por partes metálicas y obras que no lo son (Serneels, 1993, 46). Por tanto, el primer producto de estas fundiciones antiguas de minerales de hierro no era pues un lingote, sino una mata de hierro (esponja de hierro), formada por escoria y hierro, que se había ido formando a partir de los 1200° C. Este producto era menos resistente que el bronce y se corroe fácilmente, tarda poco en remineralizarse. La siguiente operación sería el refinado

y tratamiento mecánico de la esponja de hierro en la forja.

A partir de este momento comienza la segunda fase del proceso metalúrgico del hierro, el tratamiento en forja para refinar la esponja de hierro. Al ser una mezcla de hierro con partes no metálicas, escoria y carbón, había que tratarla para limpiarla lo más posible esas impurezas. Se realizaba por medio de otra operación en horno con una temperatura superior a los 900°C., temperatura a la se podía eliminar parte de la escoria adherida y concentrar las partículas de metal. El refinado de la esponja de hierro se realizaba en hornos en la forja (reheating hearths), sencillos hornos de refinado que pueden ser simplemente un hoyo, en el que por la acción del calor la escorificación se licúa. Después la esponja se martillea para soldar las partículas de hierro, y en sucesivas fases de calentamiento y martillado se va obteniendo un mejor producto metálico. En el horno la esponja de hierro expulsaba cierta cantidad de fayalita y wüstita que todavía retenía, que iban al fondo del horno. En esta segunda operación en horno para refinar la esponja de hierro se producen las escorias de forja, dentro de las que destacan las llamadas escorias plano-convexas (plano convex bottom slag), que rellenan el fondo del horno y reproducen su perfil convexo. Se forman por la acumulación de la parte escorificada en el fondo del horno de refinado. Pueden contener todavía pequeñas drusas de mineral, manganeso, magnesio, titanio, pero predomina también la wüstita sobre la fayalita. Son distintas a las escorias de sangrado, están formadas en su mayor parte por wüstita, son menos vítreas, se oxidan fácilmente, por lo que suelen presentar superficies de tonos rojizos o anaranjados, y en ocasiones contienen abundantes drusas de hierro metálico. Los factores que contribuyen a la formación de estas escorias de fondo convexo son la presencia de carbón, las paredes de horno y la fayalita presente en la esponja de hierro, y pueden contener fases de silicatos de aluminio, formados al contacto con las paredes del horno. También son muy limpias en otros elementos metálicos, como el plomo o zinc, que se volatilizan o se licúan y no entran a formar parte de la masa metálica, pero pueden aparecer otros minerales de origen siderolítico, como el manganeso. Del tratamiento de la esponja de hierro en forja se obtenía un hierro dulce (bloom iron), con escasa cantidad de carbono.

Estas operaciones podían realizarse tanto en los lugares de reducción como en forjas alejadas de los lugares de extracción y reducción, como paso previo al endurecimiento del hierro y a la elaboración de objetos. En el caso de que ambas operaciones se realicen en el mismo lugar, los escoriales o mantos de escorias estarán formados tanto por escorias de sangrado como por escorias de forja, pero si solo aparecen escorias de forja el refinado de la esponja de hierro se ha llevado a cabo en un lugar distinto al de reducción. En este último caso la esponja de hierro se había convertido en un primer producto de comercio para su tratamiento en otro lugar, en las forjas y herrerías, donde seguía la cadena del proceso del tratamiento metalúrgico hasta la obtención de objetos de hierro.

La tercera fase de la producción de hierro se desarrollaba en las herrerías, donde se elaboraban los instrumentos de hierro. De las operaciones en las herrerías resultan unas escorias que son en su mayor parte hierro metálico que se ha remineralizado, pasando de ferrita a hidróxido de hierro. No contienen formaciones de fayalita ni wüstita. En las herrerías y forjas también quedan pequeñas partículas metálicas de hierro (bataduras), que se producen durante el martilleado del hierro en el yunque.

Este hierro dulce es débil, quebradizo y no supera en cualidades a otros metales como el bronce. Los siguientes tratamientos a que era sometido el hierro dulce permitían superar las propiedades de esos metales. El hierro dulce hay que trabajarlo en forja para carburizarlo hasta conseguir un hierro duro mediante distintas operaciones en frío o en caliente, martilleado, templado, recocido, revenido, etc., para aportarle dureza, estirarlo, torcerlo, soldarlo y darle la forma deseada.

En los hierros dulces el porcentaje de carbono es muy bajo, no supera el 0,02% C O, Para endurecerlo hay que incorporarle carbono y esto se llevaba a cabo en la forja. El carbón en estado incandescente provoca que parte del carbono se cimente en el hierro, formando acero. Este sencillo sistema de carburización, que convertía el hierro dulce en hierro duro (cast iron), podía alcanzarse a una temperatura de 1100° C, y era suficiente para acerar espadas, cuchillos o hachas. De esta forma se superaban las propiedades del bronce. La incorporación de carbono por este método podía alcanzar hasta el 0,3% C O. En general los hierros antiguos eran simplemente martilleados en caliente y no superan una tasa de

carbono de 0,90 a 1,70% CO, que se concentraba en la superficie mediante este método de cementación artificial. El nombre de acero define siempre a un hierro con una tasa de carbono a partir de 0,05% y con 1,2% de carbono se considera un hierro duro. El nombre de acero deriva del término latino *acies*, que designaba a la parte cortante de un arma, y ésta acabó derivando en el término tardío *aciarium*, el hierro que corta (Halleux, 2007, 1302). Esto no dependía tanto de la cantidad de carbono, sino de la dureza del hierro, que se podía conseguir también con otras operaciones en forja, con el martilleado y el temple.

La forja también podía aportar otras cualidades al hierro, sobre todo dureza y ductilidad. Con el martillado se soldaban las partículas de hierro metálico y las partes de escoria que todavía tenía quedaban empaquetadas entre las bandas de hierro metálico. El templado consiste en el calentamiento rápido del metal para fisurar su estructura y sumergirlo en agua enseguida para bajar la temperatura, lo que forma la martensita, que aportaba dureza y resistencia mecánica al hierro. El recocido podía mitigar los efectos de un templado demasiado drástico y consiste en calentarlo de nuevo de forma moderada para aumentar la dureza y la ductilidad. Los tratamientos mecánicos en caliente en la forja se realizan entre los 500-550° C, a la temperatura de recristalización, que permite seccionar, ensanchar, estirar y torcer. Las soldaduras en caliente se consiguen entre los 830° C y los 900° C.

El tipo de escorias de Arriaca responden pues al tratamiento de refinado en forja de las matas de hierro obtenidas en las fundiciones. Una primera conclusión de los análisis de las escorias de refinado es que en este lugar se llevó a cabo una importante producción de hierro, pero el mineral de hierro no se reducía en el asentamiento. Vendría seguramente en forma de concentrados de hierro del tipo mata de hierro (esponja de hierro), previamente tratados en otro lugar, probablemente a pie de mina. La importación de estas matas de hierro dio lugar a un destacado tratamiento en forja para la producción de objetos de hierro que podía comercializarse a las poblaciones del entorno local y regional por medio de la vía de comunicación de la que formaba parte el asentamiento. Entre los útiles de este taller deben destacarse los cuchillos de la forma denominada "tipo Simancas", que han aparecido en abundancia en este asentamiento (Abascal Palazón, 1991,

438, figura 1), característicos de las necrópolis bajo-imperiales de la Meseta, las llamadas en un primer momento necrópolis de Duero.

Dado que no se conocen mineralizaciones de hierro en el entorno más próximo del asentamiento, una cuestión importante es averiguar de qué zona minera proceden las matas de hierro que llegaron a este lugar para su procesamiento de cara a la producción de objetos de hierro.

Las mineralizaciones más cercanas al asentamiento se encuentran en la Sierra de Guadarrama y en el Sistema Ibérico, en la zona del Moncayo y en la Sierra Menera. Algunas explotaciones siderúrgicas de época celtibérica, entre las que destaca el asentamiento de Oruña, se ha relacionado con las mineralizaciones del Moncayo (Hernández y Murillo, 1985), y el *oppidum* de *Segeda* (Rovira y Murillo, 2005).

En la Sierra de Guadarrama existen mineralizaciones, y algunos topónimos, como San Lorenzo del Escorial, aluden a antiguas explotaciones mineras, pero no hay evidencias de explotaciones en época romana (Domergue, 1990; Puche *et al.*, 2012).

Las mineralizaciones de la Cordillera Ibérica, formada en la orogenia alpina, forman islas de materiales paleozoicos rodeadas de litologías más modernas del mesozoico y cenozoico. Los minerales de hierro se fueron acumulando en una zona sumergida que formaba parte de la plataforma continental, a donde iban a parar los sedimentos de las zonas más próximas, arcillas, pizarras y calizas, que dieron lugar a cuarcitas y esquistos, que forman las rocas más duras de la zona. En el Ordovícico se produjo la sedimentación de minerales de hierro, asociados a materiales calizos, que al disolverse precipitaron su componente de hierro, y dieron lugar con el tiempo a depósitos que irían ganando potencia, hasta que fueron cubiertos por otros depósitos del Silúrico. Después de la retirada de las aguas en el Triásico y la continentalización por la orogenia alpina, se fue formando la red hidrográfica del Ebro y el Jiloca. El desmantelamiento que trajeron consigo los fenómenos atmosféricos hizo aflorar en algunos lugares los depósitos de minerales de hierro, lo que facilitó su descubrimiento y explotación.

Los depósitos originales estaban compuestos por carbonato de hierro (siderita) asociado a las calizas ordovícicas, que fue alterado hacia óxidos e hidróxidos de hierro. Las mineralizaciones consisten básicamente en grandes depósitos de óxidos e hi-

dróxidos de hierro (goethita y limonita) de factura terrosa, lo que facilitaba su extracción sin complicados métodos de arranque. Accesoriamente aparecen otros minerales de hierro, como hematites, asociados de cuarzos.

Una de las posibilidades de aprovisionamiento de mineral de hierro es de la zona de *Bilbilis*, que se encontraba en la misma vía. Cuando Plinio menciona las bondades de los hierros de la zona de Calatayud, al que otorgaban unas cualidades específicas las aguas del Jalón, se sorprendía de que en esa zona no hubiera minas de importancia, y así ha quedado registrado en la bibliografía (Salinas Frías, 1986, 127). Sin embargo, se conocen algunas minas en la comarca cercana a Calatayud. Entre ellas: la mina Peira en la Sierra del Madero, entre Olvega y Castrejón, una mina de oligisto con unas leyes de 70% Fe, explotada en época contemporánea a cielo abierto; la mina Tierga en Aranda del Moncayo, a 27 km de Calatayud, donde se extrajo mineral de hierro para su uso como pigmento por parte de la Compañía Aragonesa de Minas; y la mina Gandarilla, en las faldas de la Sierra del Tablado (Benedicto y Mateos, 2013, 47 y ss.). Pero en ninguna de estas minas se conocen registros arqueometalúrgicos de una fase de explotación antigua.

No se puede decir lo mismo de la zona de Sierra Menera, que se extiende entre las provincias de Teruel y Guadalajara. Se trata de una zona con importantes yacimientos de hierro, explotados ya en época romana. Discurren por la cuenca bañada por el río Jiloca, en el límite de Aragón y Castilla-La Mancha, en las localidades de Blancas, Pozal del Campo, Ojos Negros y Villar de Sanz. La explotación minera de estos depósitos de hierro está atestiguada desde época prerromana, aunque las extracciones de mayor envergadura se realizaron en época romana (Fabrè *et al.*, 2012) e islámica (Ortega y Ortega, 2008), de la que se conservan en la zona voluminosos escoriales como los localizados en las minas de Ojos Negros. Estos grandes depósitos de hierro fueron explotados industrialmente en el siglo XX, desde 1906 hasta 1987, por la Compañía Minera de Sierra Menera (Casas Ballester y Martí González, 2001), que han dejado en el paisaje una huella característica formada por los huecos y cortas al aire libre de las explotaciones mineras. En el siglo XX el mineral de Sierra Menera se transportaba por ferrocarril al puerto de Sagunto desde la zona de Ojos Negros (Girona Rubio, 1989). Estas

explotaciones a cielo abierto fueron dejando en los taludes de las cortas las pequeñas galerías de las explotaciones de la antigüedad.

Las principales zonas mineras se encuentran en Ojos Negros (Teruel), en la vertiente este de la Sierra Menera, y las minas de Setiles (Guadalajara), en la vertiente que pertenece a Castilla-La Mancha (Arribas, 1999). En la zona de Ojos Negros se denunciaron las concesiones de Isabel, Horacio, Jacinta, Isidoro, Teresa, San Pascual, Menerillo, Pilarica, Casual y Amalia. En la de Setiles las de Juanita, Santa Filomena, Complementaria, Antonio, Blanca, Zoila, San José, Carlota, San Miguel, Julián, Gracia, Leonardo, Rosario, María y Bárbara.

Aunque el mineral podía llegar a *Arriaca* de algunos de estos lugares, el volumen de explotación romana atestiguado en Sierra Menera y su mayor proximidad son dos factores que nos llevan a considerar que las matas de hierro que llegaron al asentamiento procedían de esta zona minera. De la zona del Moncayo carecemos de referentes arqueometalúrgicos de una explotación antigua.

VALORACIÓN DE LA METALURGIA DEL HIERRO EN ARRIACA.

En época romana se asistió a la industrialización de la siderurgia, y las minas de hierro más importantes se encontraban en Hispania, las Gallias, Italia, Isla de Elba, Cerdeña, Sicilia, las provincias danubianas (*Noricum*, *Pannonia* y *Dalmatia*), Illiria, Macedonia, Asia Menor y Africa (Healy, 1978). Plinio (N.H. XXXIV, 144) denominaba a las herrerías con el término *stricturae*, que se ha hecho derivar del término latino *stringere*, martillear y golpear, debido al prensado y martilleado del hierro en caliente en la herrería (Healy, 1999, 336). Según Plinio los mejores hierros (*ex mera acie*) eran los que procedían de China, seguidos de los párticos y en el ámbito romano los del *Noricum* (N.H. XXXIV, 145). El hierro de *Noricum* (*ferrum Noricum*) tenía su centro de producción en la zona minera de Hüttengerg (Cech, 2014). En las Galias sobresalen los escoriales de hierro de Les Martyrs en la Montaña Negra (Domergue, 1993), cuya producción se extendió hasta la segunda mitad del siglo III d.C. Las minas de las Gallias alcanzaron tales niveles de producción que la administración imperial se interesó por ella y en la *Gallia Lugdunensis* estaban fiscalizadas por un administrador imperial, un *procurator ferrarium* (Sabrayrolles, 1989). La

producción de hierro también estuvo muy extendida en la provincia de *Britannia* (Cleere, 1981; Sim, 2012) y en *Pannonia*, *Dalmatia* y *Dacia*, en las que se documentan administradores imperiales, *procuratores ferrarium*, y arrendatarios de las explotaciones, *conductores ferrarium*, lo que indica un sistema de explotación indirecto como en las minas de oro, plata y cobre (Pleiner, 2000, 43).

En esta época el hierro no solo era imprescindible para la fabricación de la impedimenta militar, sino para la elaboración de muchos útiles de uso cotidiano, en el ámbito doméstico y en el ámbito de trabajo en los campos (Serneels, 2004). Varrón señala que muchas *uillae* contaban con una herrería (*officina ferraria*) para la reparación de los instrumentos de hierro (R.r., 16), un dato corroborado en muchas villas rústicas de época tardía, cuando la producción estuvo menos controlada por el Estado. La crisis económica y la decadencia abocaron a la producción local de estas mercancías en lugares donde no era posible el abastecimiento de hierro. Sin embargo, mucha de esta producción local de hierro se ha detectado ya desde el siglo II d.C., lo que demuestra que la producción de hierro estuvo más liberalizada que la del cobre, plata y oro. C. Domergue ha subrayado el papel de algunas villas en la producción de hierro, entre las que destaca la de Grands-Champs (Francia) y Viverito-Spitalhof (Suiza), en las que se han contabilizado hasta cuatro toneladas de escorias. Evidentemente eran villas dedicadas a la producción de hierro (Domergue, 2004).

De las instalaciones de reducción el hierro salía en forma de lingotes, que eran manipulados en las herrerías. El comercio de lingotes de hierro no solo estaba destinado al mercado local o comarcal, en ocasiones los lingotes de hierro aparecen en pecios, que nos confirman que también se destinaban a áreas más alejadas, en especial en las zonas militarizadas de las fronteras. Los lingotes aparecidos en los pecios han servido para establecer una tipología básica, los de formas bipiramidales, las barras de extremos aguzados y las barras de sección rectangular, aunque en época imperial predominaron las formas fusiformes, cuyos pesos oscilan entre los 7 y 8 kilos (Kleemann, 1981).

Entre los pecios destacan el de Fos-Saint-Gervais I, con restos de un barco cargado de lingotes de hierro y plomo. Las barras de hierro tenían sellos del emperador Antonino Pio y el cargamento se ha fecha en torno al 140 d.C. Los estudios de estas barras

han comprobado que las zonas superficiales están enriquecidas en carbono, mientras en las interiores la cantidad de carbono es insignificante (ferrita), es decir que estas barras salían ya previamente acerasadas antes de llegar a la herrería (Mongilan, 1987).

Otros pecios con lingotes de hierro son los de Antique Bagaud 2 (Long, 1987) y los de Saintes-Maries-de-la-Mer en el delta del Ródano (Long, Rico y Domergue, 2011), donde de los 90 pecios localizados 8 contenían lingotes de hierro. Este comercio de lingotes de hierro se ha relacionado con el abastecimiento de los campamentos del *limes* renano-danubiano, en el que los *castra* contaban con una *fabrica* (Bishop, 1985), la herrería en la que se elaboraban y reparaban las armas de los soldados.

En Hispania Plinio nos comenta que entre los cántabros existía un monte de piedra de hierro (N.H., XXIV, 149), el *Mons Prealtus*, que algunos autores han identificado con el Monte Triano en Bilbao (Domergue, 1990). Plinio menciona también a las ciudades de *Bibilis* y *Turiasso* por la calidad de sus hierros (N.H., XXIV, 144). Por su parte, Estrabón (G., 3.159) cita una importante mina de hierro en Hemeroscopion.

La producción de hierro se hizo corriente en los *metalla*, en los que se necesitaban gran cantidad de herramientas de hierro. Algunas de estas herrerías se han localizado en las minas de oro de las Médulas en León, en el castro metalúrgico de Orellán, y las minas de plomo-plata de la Loba en Córdoba (Domergue, 2004). En la mina de Riotinto se han documentado niveles de escorias de hierro en los escoriales de plata y cobre (Hunt Ortiz, 1988), y la gran variedad de herramientas que han aparecido en las labores romanas es un buen reflejo de esa producción (Maddin *et al.*, 1996).

Además de la producción de hierro por el beneficio de los minerales de las monteras de hierro de los afloramientos, la investigación arqueológica ha registrado otras importantes áreas mineras de producción de hierro cuyo destino no era el consumo local o comarcal, sino la exportación. En la Península Ibérica una de las zonas con mayor desarrollo de la minería y de la producción siderúrgica es la Sierra Menera (Teruel-Guadalajara), donde se han prospectado unos 43 escoriales formados por las explotaciones de época romana. En algunos sectores se han podido sondear los escoriales, como el yacimiento de Las Soletas, en el que se han evaluado las características de la producción (Fabrè *et al.*, 2012).

En el País Vasco también se han identificado un buen número de yacimientos dedicados a la producción de hierro, tanto en las inmediaciones de las minas como en lugares alejados de ellas con mejores condiciones de mercado (Arteaga, 2016). Como en otros ambientes siderúrgicos, algunos yacimientos están especializados en la metalurgia de hierro, mientras en otros solo se reduce el mineral y la esponja de hierro se refina en otros sitios. Entre estas zonas destacan el distrito de Larla, el centro siderúrgico de Forua, operativo desde el siglo II al IV d.C., y la siderurgia de *Oiasso* (Irún), donde se han registrado escorias de sangrado, tortas de forja y lingotes de hierro, la cadena completa de producción.

Otro importante asentamiento dedicado a la producción de hierro es el municipio de *Munigua* (Castillo de Mulva, Villanueva del Río y Minas, Sevilla), que comenzó como un establecimiento dedicado a la minería y la metalurgia de los filones de cobre próximos a la ciudad, pero a partir de mediados del siglo I d.C. se convirtió en un importante centro siderúrgico. Los minerales se reducían en la propia ciudad, a la que llegaban las magnetitas y oligistos de El Pedroso (Sierra de la Lima y Navalázaro), y se fueron formando allí grandes escoriales con escorias de sangrado. La esponja de hierro se refinaba allí mismo, en talleres urbanos y periurbanos para la fabricación de lingotes que se comercializarían a través de *Hispalis* (Schattner *et al.*, 2005; Pérez y Schattner, 2013).

En la zona Zona Surportuguesa destacan los escoriales del valle de Mira (Odemira), en la zona de Cercal, intensamente explotada en los años 1940 a 1950. Tuvo una explotación continuada desde época prerromana y en época romana se formaron escoriales en las zonas de tratamiento, donde aparecen tanto escorias de sangrado, como escorias de forja y escorias de herrerías en unos 14 sitios de tratamiento del mineral (Vilhena y Grangé, 2011).

Voluminosos escoriales de hierro se encuentran también en la Sierra de la Culebra (Zamora), donde en algunos se alcanzan los 8 metros de potencia (Larrazabal, 1996).

Otras evidencias de minería de hierro se han estudiado en la Sierra de los Filabres (Almería), en el yacimiento de Los Callejones, en el que se han estudiado evidencias metalúrgicas del tratamiento de los minerales de hierro del entorno y del tratamiento de la esponja de hierro (Rovira *et al.*, 2005).

Como en otras zonas bajo el control de Roma, también se registra producción de hierro en algunas *villae* o pequeños *vici*. Algunas de estas villas de producción de hierro también se conocen en la Lusitania, como la excavada en São Faraústo 2 (Portel), un complejo que abarca espacios de habitación y zonas de trabajo de producción de hierro de los siglos III y IV d.C. (Rodríguez Cosme, 2011).

El caso de la producción de hierro en *Arriaca* no es un caso aislado. En el mundo romano se conocen otros sitios dedicados a la elaboración de hierro en los que solo se han detectado elementos metalúrgicos relacionados con procesos postreducción. Uno de estos sitios es el de Marsens en Suiza (Serneels, 1993, 172 ss.). No se han recogido en este lugar escorias de sangrado, aunque si son abundantes gran cantidad de restos escorificados, algunos de ellos conteniendo materiales arcillosos de las paredes de los hornos. Como en el caso de *Arriaca*, la mayoría de estos desechos metalúrgicos corresponden a escorias de refinado en forja (escorias de forja de fondo convexo), y las hay de variados tamaños, desde los 5 cm de diámetro hasta las de 20 cm de diámetro y 1,5 kg de peso. Este taller del *vicus* galo-romano de Marsens fabricaría hierro para el consumo local, pero lo importante es que se encontraba al borde de una vía romana, y se ha planteado que una parte importante de la producción estuviera destinada a la venta a los viajeros o al mantenimiento de los carros. No se descarta tampoco que esta forja se dedicara también a la elaboración de otras piezas, como bisagras y otros elementos de hierro que podían abastecer a otros talleres, como artesanos de la madera o el cuero. La materia prima, la mata de hierro, debería ser importada y se considera que el valor aportado por el trabajo del metal sería suficiente para sufragar los gastos de transporte de estos materiales desde las minas.

El paralelo más cercano a *Arriaca* es la forja de la posta de Mariturri, interpretada como una *mutatio* de la vía que enlazaba las ciudades de Astorga y Burdeos, un asentamiento formado por un pequeño *vicus* relacionado con el *cursus publicus* (Núñez y Sáez, 2005). El principal edificio de la estación caminera es una estructura de forma rectangular en la que se han diferenciado una zona de habitación y almacenaje, otra de establos y un patio central en el que se encuentra una instalación de forja. Ese patio tiene unas dimensiones de 21,50 de longitud por 18,50 m de anchura. Dentro de ese espacio de forja

se han documentado dos estructuras rectangulares en forma de bancos, una con una anchura de 1,50 y unos 12,80 m de longitud conservada, junto al que se encuentra una estructura oval, identificada como un horno de forja. Parte del suelo del patio está colmatado con elementos relacionados con la metalurgia del hierro, entre ellos escorias, desechos metalúrgicos, algunos de ellos tan pequeños que tuvieron que ser identificados mediante imán, y otros objetos. También se registró un stock de material metalúrgico para reciclar formado por elementos metálicos elaborados o semielaborados.

Son muchas las *stationes* y *mutationes* en las que se han localizado este tipo de talleres de hierro. La existencia de este tipo de instalaciones de forja y herrería en las paradas de los caminos se ha relacionado de manera directa con la vinculación de estos sitios con el *cursus publicus* y con las grandes posibilidades que ofrecían para facilitar el transporte de la materia prima y las ventajas de comercio de los productos de estos talleres a los viajeros que acudían y pasaban por este tipo de ventas (Corsi, 2000, 252). Esto supondría que estarían administradas por un encargado y administrador (*praepositus*) y su población estaría formada por funcionarios, artesanos y esclavos públicos (Chevalier, 1997).

Los testimonios en *Arriaca* de otras actividades artesanales relacionadas con el trabajo del hueso confirmarían que fue precisamente esta circunstancia la que favoreció la implantación en el lugar de estas actividades de producción, corroborado además por los útiles de hierro (cuchillos, puntas de lanza, etc.) y hueso (agujas y fichas de juego) que proceden del yacimiento (Abascal Palazón, 1991). Queda por discutir si todas estas actividades artesanales dependían de las autoridades locales, a las que correspondía el mantenimiento de las estaciones de postas, o si se debían a la iniciativa privada.

BIBLIOGRAFÍA

- Abascal Palazón, J.M. (1991), "La necrópolis tardorromana de "El Tesoro" (Marchamalo, Guadalupe)", *Arte, Sociedad, economía y religión durante el Bajo Imperio y la Antigüedad Tardía*, Antigüedad y Cristianismo, VIII, 425-451.
- Arteaga, M. (2016), "El hierro en época romana. Tradición e innovación en los territorios vascos", *Historia del hierro en Bizcaia y su entorno* (X. Orue-Etxebarria, E. Apellaniz y P.P. Gil-Crespo, Eds.), Bilbao, 77-118.

- Arribas, D. (1999), *Minas de Ojos Negros. Un filón sin explotar*, Zaragoza.
- Bachmann, H.G. (1982), *The identification of slag from archaeological sites*, Institute of Archaeology, Occasional Publication, 6, London.
- Benedicto Jimeno, E. y Mateos Royo, A. (2013), *La minería aragonesa en la Cordillera Ibérica durante los siglos XVI y XVII. Evolución económica, control político y conflicto social*, Universidad de Zaragoza y Centro de Estudios del Jiloca, Colección Ciencias Sociales, 96, Zaragoza.
- Bishop, M.C. (1985), *The military fabrica and the production of arms in the principate, The production and distribution of Roman military equipment*, BAR International Series, 275, Oxford.
- Caballero Casado, C. (2016), « Vias romanas de la provincia de Guadalajara: un estado de la cuestión », *Vias de comunicación romanas en Castilla-La Mancha* (G. Carrasco Serrano, Coord.), Homenaje a Pierre Sillières, Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca, 297, 318.
- Casaus Ballester, M.J. y Martí González, J.L. (2001), *Compañía Minera de Sierra Menera. El futuro de un pasado*, Puebla de Valverde.
- Cech, B. (2014), «The production of ferreum Noricum at Hüttenberg, Austria. The results of archaeological excavations carried out from 2003 to 2007 at site Lemlach/Eisner», *Early Iron In Europe*, Instrumentum Monographies, 50, 11-20.
- Chevalier, R. (1997), *Les voies romaines*, Paris.
- Cleere, H.F. (1981), *The iron industry of Roman Britain*, London.
- Corsi, C. (2000), *Le structure di servizio del cursus publicus in Italia. Ricerche topografiche ed evidenze archeologiche*, BAR International Series, 875, Oxford.
- Domergue, C. (1990), *Les mines de la Peninsule Ibérique dans l'antiquité romaine*. Collection de l'École Française de Roma, 127. Roma.
- Domergue, C. (1993) –Dir.–, *Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noire. Le domaine des Forges (Les Martyrs, Aude)*, Revue Archéologique Narbonnaise, Suplement 27, Paris.
- Domergue, C. (2004), «Fer et société», *Le Fer*, Paris, 175-214.
- Fabré, J.M., Cutando, C., Rico, CH., Villagordo, C. y Coustures, M.P. (2012), «Minería y siderurgia antigua en Sierra Menera (Teruel-Guadalajara). Nuevos avances de la explotación del hierro en época antigua (siglos II a.C.-II d.C.)», *Minería y metalurgia antiguas. Visiones y Revisiones*, Madrid, 43-62.
- Fita, F. (1900), «Lápidas inéditas de Marchamalo, Cáceres, Palencia y Lugo», *Boletín de la Real Academia de la Historia*, XXXVI, 502-517.
- Gamo Pozos, E. (2013a), «Cuevas y alturas: reocupación de hábitats prerromanos en el Bajo Imperio en la provincia de Guadalajara», *El Espejismo del bárbaro. Ciudadanos y extranjeros al final de la Antigüedad* (D. Álvarez, R. M. Sanz y D. Hernández, Eds.), Publicaciones de la Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, 213-240.
- Gamo Pozos, E. (2013b), «Reaparición de la inscripción EE IX, 315 de Marchamalo (Guadalajara, España)», *Espacio, Tiempo y Forma, Serie II, Historia Antigua*, 26, 291-302.
- Girona Rubio, M. (1989), *Minería y Siderurgia en Sagunto*, Institutió Valenciana d'Estudis i Investigació, Valencia.
- Halleux, R. (2007), «Sur la fabrication de l'acier dans l'Antiquité et au Moyen Age», *Comptes Rendus des Sceances de l'Academie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 15, 1er anné, n° 3, 1301-1319.
- Healy, J.F. (1978), *Mining and Metallurgy in the Greek and Roman World*, London.
- Healy, J.F. (1999), *Pliny the Elder on Science and Technology*, Oxford.
- Hunt Ortiz, M. (1988), «Consideraciones sobre la metalurgia del cobre y del hierro en época romana en la provincia de Huelva, con especial referencia a las minas de Río Tinto», *Habis*, 18-19, 601-611.
- Hernández, J. y Murillo, J. (1985), «Aproximación al estudio de la siderurgia celtibérica del Moncayo», *Caesaraugusta*, 61-62, 1985, 177-190.
- Keessmann, I. (1989), «Chemische und mineralogische Detailuntersuchungen zur Interpretation eisenreicher Schlacken», *Archaeometallurgy of Iron*, Praga, 17-34.
- Kleemann, O. (1981), «Les lingots de fer bipyramidaux, courts et épais. Les lingots de fer du type Colmar», *Etudes offertes á J. J. Hatt*, Paris, 109-119.

- Labeledur, A. (1985), *Manuel de Métallurgie du Fer*, Paris.
- Larrazabal, J. (1996), «Iron Mining and Metallurgy during the Roman and Medieval Periods in Zamora (Spain)», *The importance of Iron making. Technical Innovation and Social Change, vol. II* (G. Magnusson, Ed.), Norberg, 167-175.
- Long, L. (1987), «Quelques précisions sur le conditionnement des lingots d'étain de l'épave Antique Bagaud 2 (Var)», *Les mines et la métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines*, Caesarodunum, XXII, 1987, 149-163.
- Long, L., Rico, C. y Domergue, C. (2001), «Les épaves antiques de Camargue et le commerce maritime du fer en Méditerranée nord-occidentale (1^{er} s. av. J.C./1^{er} s. apr. J.C.)», *Africa Romana*, XIV, 2001, 161-188.
- Maddin, R., Hauptmann, A. y Weisgerber, G. (1996), «Metallographische Untersuchungen an römischen Geräthe aus Rio Tinto, Spaen», *Metalla* 3/1, 27-44
- Mangin, M. -Dir.- (2004), *Le fer*, Paris.
- Mongilan, L. (1987), «Une épave romaine charge de fer et de plomb dans le Golfe de Fos-Saint-Gervais I, Les mines et la métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines», *Caesarodunum*, XXII, 1987, 171-179.
- Núñez Marcen, J. y Sáenz de Urturi, P. (2005), «Una *mutatio* de la vía *Ab Asturican Burdigalam* en Mariturri (Vitoria, Álava)», *Archivo Español de Arqueología*, 78, 189-207.
- Ortega y Ortega, J.M. (2008), «Consideraciones sobre la explotación del hierro en Sierra Menera (Teruel) durante época andalusí», *Minas y Metalurgia en al-Andalus y el Magreb occidental. Explotación y poblamiento* (A. Canto y P. Cressier, Coords.), Collection de la Casa de Velázquez, 102, Madrid, 2008, 95-122.
- Pérez Macías, J.A. y Schattner, TH. G. (2013), «Retaining and Renewing. The Roman Municipium Munigua in the Light of Technical Developments in Mining in the Hispanic Southwest», *Metal Matters: Innovative Technologies and Social Change in Prehistory and Antiquity* (S. Burmeister, S. Hansen, M. Kunst, y N. Müller-Scheefel, Eds.), Leidorf, 241-260.
- Pleiner, R. (1989), *Archaeometallurgy of Iron*, Praga.
- Pleiner, R. (1993), «The technology of iron making in the bloomery period. A brief survey of the archaeological evidence», *Archaeologia delle Attività Estrattive e Metallurgiche*, Firenze, 533-560.
- Pleiner, R. (2000), *Iron in Archaeology. The European Bloomeries Smelters*, Praga.
- Puche, O., Mazadiego, L.F., Jordá, L. y Hervás, A. M^a (2012), «Minería en Madrid. Pasado y presente de sus explotaciones», *Madrid Histórico*, 40, 32-47.
- Rodríguez Cosme, S. (2011), «A actividade metalúrgica/mineira no povoado de São Faraústo 2 (Oriola, Portel)», *Povoamento e Exploração dos recursos mineiros na Europa Atlântica Ocidental* (C.M. Braz. A.M.S. Bettencourt, J. I. Martins e J. Carvalho., Coords.), Braga, 471-482.
- Rovira, S. y Burillo, F. (2005), «Experimentos de fundición de minerales de hierro en la Ciudad-Estado de Segeda (Mara, Zaragoza)», *Avances en Arqueometría 2005* (J. Molera, J. Farias, P. Roura y T. Pradell, Eds.), VI Congreso Ibérico de Arqueometría, Gerona, 137-143.
- Rovira, S., López, M.J., Roman, M.P. y Martínez, C. (2005), «Los Callejones: a Roman Republican iron making and smelting centre in the south east of Iberian Peninsula», *Historical Metallurgy*, 38 (1), 1-9.
- Sablayrolles, R. (1989), «L'administration des mines de fer en Gaule romaine», *Minería y Metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y europeas, II*, Madrid, 157-162.
- Schattner, TH. G., Ovejero, G. y Pérez, J.A. (2005), «Avances sobre la producción metalúrgica en Munigua», *Habis*, 36, 2005, 253-276.
- Salinas Frías, M. (1986), *Conquista y romanización de la Celtiberia*, Acta Salmanticensia, Estudios Históricos y Geográficos, 50, Salamanca.
- Serneels, V. (1993), *Archéometrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie en Suisse occidentale*, Cahiers d'Archéologie Romande, 61, Lausanne.
- Serneels, V. (2004), «Réflexions sur la consommation du fer dans l'antiquité, et spécialement à l'époque romaine», *Le Fer*, Paris, 206-214.
- Sim, D. (2012), *The roman iron industry in Britain*, London.
- Torelli, M. (1996), *Historia de los etruscos*, Barcelona.
- Tycolete, R.F. (1984), *A history of metallurgy*, London.

- Tylecote, R.F., Austin, J.N. y Wraith, A.E. (1971), "The mechanism of the Bloomery process in shaft furnace", *Journal of the Iron and Steel Institute*, 209, 1971, 242-363.
- Vilhena, J. y Grangé, M. (2011), "Of slags and men. Iron mining and metallurgy in the Mira Valley (Southwest Portugal) from Iron Age to Middle Ages", *Povoamento e Exploração dos recursos mineiros na Europa Atlântica Ocidental* (C.M. Braz. A.M.S. Bettencourt, J. I. Martins e J. Carvalho., Coords.), Braga, 83-112.
- Wynne, E.J. y Tylecote, R.F. (1958)", "An experimental investigation into primitive iron smelting technique", *Journal of the Iron and Steel Institution*, 1958, 339-348.

