

Arqueología del agua en la minería aurífera romana: los canales de abastecimiento

Archeology of water in roman gold mining: the supply canals

Roberto Matías

Instituto de Estudios Cabreireses (IEC)

Castrillo de Cabrera, León, España

matiasr.roberto@gmail.com

 ORCID: 0000-0003-4836-2185

Información del artículo

Recibido: 19/04/2023

Revisado: 07/08/2023

Aceptado: 16/12/2023

Online: 10/05/2024

Publicado: 10/01/2025

ISSN 2340-8472

ISSNe 2340-7743

DOI 10.17561/at.25.7934

 CC-BY

© Universidad de Jaén (España).
Seminario Permanente Agua, Territorio y Medio Ambiente (CSIC)

RESUMEN

A principios de nuestra era Roma conquista el territorio del NO ibérico y pone en explotación cientos de yacimientos de oro, en lo que fue la primera gran “fiebre del oro” de la humanidad. Para ello necesitó del suministro de grandes cantidades de agua, imprescindibles para la recuperación del oro.

El abastecimiento se consiguió mediante el audaz trazado de extensas redes de canales, especialmente relevantes en zonas como el entorno de Las Médulas y la sierra del Teleno, en León (España), donde se construyeron más de 1500 km de canales.

En este artículo se resumen los resultados de años de investigación sobre los canales de la minería aurífero-romana, realizados mediante la aplicación de nuevas técnicas cartográficas, algunas tan recientes como los Modelos Digitales del Terreno (MDT), que han proporcionado datos muy relevantes sobre el alcance y la evolución de la minería hidráulica romana.

PALABRAS CLAVE: Minería romana, Canales, Las Médulas, Minería hidráulica, Oro.

ABSTRACT

At the beginning of our era, Rome conquered the territory of NW Iberia and mined hundreds of gold deposits, in what was the first great “gold rush” of mankind. This required the supply of large quantities of water, essential for the recovery of the gold.

The supply was achieved through the daring layout of extensive canal networks, especially relevant in areas such as the surrounding of Las Médulas and the Sierra del Teleno, in León (Spain), where more than 1,500 km of canals were built.

This article summarizes the results of years of research on Roman gold mining canals, carried out by applying new cartographic techniques, some as recent as Digital Terrain Models (DTM), which have provided very relevant data on the scope and evolution of Roman hydraulic mining.

KEYWORDS: Roman mining, Canals, Las Médulas, Hydraulic mining, Gold.

Arqueologia da água na mineração do ouro romano: os canais de abastecimento

RESUMO

No início da nossa era, Roma conquistou o território do NW Ibérico e explorou centenas de jazidas de ouro, naquela que foi a primeira grande “corrida do ouro” da Humanidade. Nesta actividade mineira, destaca-se a necessidade de grandes quantidades de água, o que é absolutamente essencial para efectuar o processamento de materiais auríferos.

O abastecimento de água foi conseguido através da construção de um cuidadoso sistema de canais que configurou uma paisagem cultural única e irrepetível da mineração de ouro romana, especialmente relevante em áreas como os arredores de Las Médulas e a Sierra del Teleno, na província de León (Espanha), onde foram construídos mais de 1.500 km de canais.

O estudo dos canais de abastecimento fornece dados muito valiosos sobre a evolução da actividade mineradora. A sua investigação desenvolve-se com recurso a diversas técnicas cartográficas, às quais acaba de ser incorporado o Modelo Digital de Terreno (MDT).

PALAVRAS-CHAVE: Mineração romana, Canais, Las Médulas, Mineração hidráulica, Ouro.

Archéologie de l'eau dans l'exploitation d'or romaine: les canaux d'approvisionnement

RESUME

Au début de notre ère, Rome a conquis le territoire du nord-ouest de la péninsule ibérique et exploité des centaines de gisements d'or, dans ce qui fut la première grande “ruée vers l'or” de l'Humanité. Dans cette activité minière il y a besoin de grandes quantités d'eau pour mener à bien le traitement des matériaux aurifères.

L'approvisionnement en eau a été réalisé grâce à la construction d'un système de canaux soigné qui a configuré un paysage culturel unique et incomparable de l'extraction

de l'or romaine, particulièrement pertinent dans des zones telles que les environs de Las Médulas et la Sierra del Teleno, dans la province de León (Espagne), où plus de 1.500 km de canaux ont été construits.

L'étude des filières d'approvisionnement fournit des données très précieuses sur l'étendue de l'activité minière. Ses recherches sont menées à l'aide de diverses techniques cartographiques, avec l'incorporation des Modèles Numériques du Terrain (MNT).

MOTS-CLES: Exploitation minière romaine, Canaux, Las Médulas, Exploitation minière hydraulique, L'or.

Arcehologia dell'acqua nell'estrazione dell'oro romana: canali di approvvigionamento

SOMMARIO

All'inizio della nostra era, Roma conquistò il territorio dell'Iberia nordoccidentale e sfruttò centinaia di giacimenti d'oro, in quella che fu la prima grande “corsa all'oro” dell'Umanità. In questa attività estrattiva spicca la necessità di grandi quantità di acqua, assolutamente indispensabile per effettuare la lavorazione dei materiali auriferi.

L'approvvigionamento idrico è stato ottenuto attraverso la costruzione di un attento sistema di canali che, insieme agli sfruttamenti, ha configurato un paesaggio culturale unico e irripetibile dell'estrazione dell'oro romano, particolarmente rilevante in aree come i dintorni di Las Médulas e la Sierra del Teleno, nella provincia di León (Spagna), dove sono stati realizzati oltre 1.500 km di canali.

Lo studio dei canali di approvvigionamento fornisce dati molto preziosi sulla portata e sull'evoluzione dell'attività mineraria. La sua ricerca si svolge utilizzando varie tecniche cartografiche, alle quali sono stati appena incorporati i Modelli Digitali del Terreno (MDT).

PAROLE CHIAVE: Miniere romane, Canali, Las Médulas, Miniere idrauliche, Oro.

Introducción

La esencialidad del agua para la vida en todos los ámbitos alcanza una nueva dimensión en la minería aurífera, donde el líquido elemento ha sido desde hace milenios el medio fundamental, y casi imprescindible, mediante el cual es posible la concentración de los pequeños fragmentos de oro que se encuentran dispersos en diferentes mineralizaciones, bien en la roca (yacimientos primarios), bien en materiales sueltos por la meteorización natural de estos (yacimientos secundarios).

El oro, el “rey de los metales”, se caracteriza frente a todos los demás por su inalterabilidad e intenso color amarillo, además de encontrarse generalmente libre en estado metálico en la naturaleza. Uno de los yacimientos de oro más extendidos y conocidos son los aluviales, relacionados con los ríos, que forman las acumulaciones de partículas de oro conocidas como “placeres”, intensamente buscados para recuperar las pepitas de oro que encierran (Figura 1). Salvo excepciones, estas pepitas son prácticamente inapreciables a simple vista entre la masa de materiales rocosos, donde apenas alcanzan, por regla general, una proporción de uno entre un millón. Y es precisamente el agua, por su abundancia y características, el medio que permite la recuperación

de las codiciadas partículas de oro, produciéndose el “milagro” de conseguir separar este metal de la enorme masa de materiales estériles que lo contienen, gracias a su elevada densidad.

El binomio agua–oro ha sido conocido y utilizado por la humanidad desde el inicio de los tiempos, cuando probablemente se empezaron a recoger brillantes y llamativas pepitas de oro en los márgenes de algunos ríos. A pesar de ser ya una actividad de aprovechamiento de recursos minerales, minería como tal, se trataba, no obstante, de pequeñas producciones destinadas a reunir algunas cantidades de una interesante sustancia amarilla y pesada, inservible a efectos prácticos frente a otros metales como el cobre o el hierro, pero que se podía moldear por golpeo, conservaba su cálido color y era muy apreciada como símbolo de distinción por las élites, generalmente relacionada con el culto al disco solar. A lo largo de miles de años la situación no cambió.

Es durante el apogeo del Imperio romano (siglos I y II d.C.) cuando se registran los más importantes avances tecnológicos en la minería del oro, desarrollándose especialmente la minería hidráulica, mediante la cual se podían llegar a procesar en una misma explotación cientos de millones de metros cúbicos de materiales auríferos. El oro se utilizó tanto para la expansión del

Figura 1. Pepitas de oro procedentes del lavado de arenas del río Duerna, en la vertiente norte del Teleno



Fuente: Foto del autor.

Figura 2. Aureo de Augusto y arracada. Museo de Astorga



Fuente: Foto de IMAGEN MAS.

Imperio como para la fabricación de joyas (Figura 2). Estas innovaciones alcanzaron una cota tan elevada que habrían de pasar muchos siglos para verse superadas en el volumen de materiales removidos, ya con la introducción de los explosivos y la maquinaria de vapor en las explotaciones mineras a lo largo del siglo XIX y siguientes.

Simplemente mediante la utilización del agua, en un proceso que replica la actividad de diversos fenómenos naturales, los romanos fueron capaces de conseguir llegar a procesar industrialmente de manera eficaz grandes volúmenes de materiales rocosos para extraer el oro que contenían, en un alarde de ingenio y sentido práctico.

Una vez localizados los yacimientos, los romanos se enfrentaron con éxito al problema del abastecimiento de agua en sus trabajos de minería hidráulica construyendo canales de gran capacidad, que llegaron a superar en ocasiones el centenar de kilómetros, realizaron trasvases de cuencas hidrográficas y aprovecharon hasta el límite las posibilidades hídricas del territorio del noroeste ibérico, la principal área de actividad de la minería hidráulica romana, donde se encuentran sus ejemplos más representativos, cuyo máximo exponente, Las Médulas, fue declarado Patrimonio de la Humanidad en diciembre de 1997 (Figura 3).

A pesar de su extensión y huellas sobre el paisaje, el conocimiento preciso de los canales de abastecimiento se remonta a hace apenas dos décadas, cuando mediante el uso conjunto por primera vez de tecnología GPS, cartografía digital y ortoimágenes

georreferenciadas se reconstruyeron con precisión topográfica los primeros grandes conjuntos de canales de minería hidráulica romana¹. Posteriormente se han ido introduciendo nuevos avances, entre los que destaca el uso particularizado de los Modelos Digitales del Terreno (MDT), obtenidos a partir de los datos LIDAR, especialmente útiles en la localización y estudio de las explotaciones.

El binomio agua-oro

La relación agua-oro es una realidad en la minería aurífera de todos los tiempos. Plinio el Viejo en su *Naturalis Historia* hace una sutil descripción del abastecimiento de agua para la minería de oro romana donde expresa con mucha claridad esta circunstancia y las dificultades de la construcción de los canales PLIN.Nat.33.74-75²:

74. Hay otro trabajo similar o incluso de mayor coste: a la vez condujeron desde las cimas de las montañas, generalmente desde una distancia de cien millas, corrientes de agua para lavar este derrubio. Se llaman *corrugos*, proveniente de *conrivatio*, a mi parecer. También aquí los trabajos son muy diversos: conviene que la nivelación esté en pendiente para que (sc. el agua) corra apresuradamente mejor que fluya; así

¹ Matías, 2004, 2006a.

² Traducción de Pérez; Matías, 2008a.

Figura 3. Las Médulas, Patrimonio de la Humanidad desde 1997. Vista desde el interior de La Cueva, cavidad producida por el hundimiento incompleto de un macizo



Fuente: Foto del autor.

pues, se trae de zonas muy altas. Las gargantas y crestas se unen con canales apoyados sobre cimientos. En otros lugares se cortan las rocas inaccesibles y se las dispone para proporcionar asiento a troncos *colocados en huecos*.

75. Quienes hacen los cortes están colgados con cuerdas, de modo que a quien observa de lejos ni siquiera le parecen animales salvajes, sino pájaros. Suspendingos en el aire, nivelan y trazan las líneas del recorrido en su mayor parte, y se canalizan las aguas por donde no hay lugar para las pisadas del hombre. Surge una dificultad en el proceso de lavado, si la corriente de agua produce barro; este tipo de terreno se llama *urio*. En consecuencia, la conducen por rocas y piedras y evitan el *urio*. En la parte más alta desde la que se vierte el agua, en las crestas de los montes, se cavan estanques de doscientos pies por cada lado y diez de profundidad. En ellos se dejan cinco desagüaderos de unos tres pies cuadrados a fin de que, lleno el estanque, una vez retirados los cierres el torrente irrumpa con tanta fuerza que arrastre las rocas.

El agua es el elemento primordial para proceder a la concentración gravimétrica y separación de las partículas de oro de los materiales rocosos que las puedan contener en los aluviones: cantos, gravas, arenas y arcillas. Al margen de la existencia de pepitas de tamaño centimétrico, el porcentaje principal de oro se encuentra en la mayoría de los yacimientos secundarios en una proporción generalmente menor de 1:1.000.000, que corresponde con 1 g/tm, por lo que el símil de “buscar una aguja en un pajar” sería muy apropiado en este caso. Si añadimos que el tamaño habitual del oro en la mayoría de sus yacimientos es milimétrico o submilimétrico se entiende rápidamente que la recuperación manual es inviable o poco práctica, aun por el sencillo procedimiento de la batea, mediante el cual solo es posible procesar apenas unos 10 kg en cada carga.

La elevada densidad del oro frente a los materiales que lo acompañan permite que un proceso continuo de concentración gravimétrica alcance unos rendimientos adecuados, incluso para casos de apenas unas decenas de miligramos por tonelada. Para que la separación y recuperación del oro tenga lugar es necesario convertir

todo el material en una suspensión acuosa de barro y rocas que se hace circular por un dispositivo adecuado (canal de lavado), equipado con unos sencillos mecanismos de retención (lechos de piedras, ramas, incluso pieles de animales, de donde viene la leyenda del “Vello de Oro”), situado siempre a favor de la pendiente para que los lodos fluyan adecuadamente. De este modo tiene lugar la concentración gravimétrica de las partículas de oro y otros minerales pesados, que quedan sistemáticamente retenidos en el fondo. Este material de color oscuro se recuperaba posteriormente, una vez interrumpido el flujo, para ser procesado ahora utilizando el método ancestral de la batea. Técnicamente, la longitud del canal de lavado tiene que diseñarse en proporción al tamaño de las partículas, para obtener la máxima recuperación. Como regla general³, se necesitan unos pocos metros para yacimientos con mayoría de pepitas grandes ≥ 1 mm y decenas de metros para yacimientos con tamaños de pepitas pequeños < 1 mm.

Los más grandes yacimientos de oro explotados por los romanos fueron de tipo “secundario”, es decir, procedentes de la denudación natural de los filones de cuarzo aurífero (yacimientos primarios) y su posterior arrastre y acumulación sobre el terreno debida a la meteorización natural y a la actuación de los agentes geológicos externos. Los volúmenes de materiales auríferos de estos depósitos pueden alcanzar órdenes de varios cientos de millones de metros cúbicos. Sobre los yacimientos primarios también se realizaron grandes trabajos mineros, tanto en las zonas alteradas (en ese caso por minería hidráulica) como directamente sobre los filones de cuarzo aurífero, llegando incluso a la ejecución de extensos trabajos subterráneos, donde a veces fue necesario el uso del fuego para poder progresar en este duro material, desmenuzándolo posteriormente con objeto de liberar las partículas de oro⁴.

Canales de abastecimiento

En la minería hidráulica romana los canales abiertos de sección rectangular fueron la solución elegida sistemáticamente por los ingenieros romanos para garantizar la disponibilidad de agua en el proceso de recuperación del oro en los yacimientos secundarios. El conocimiento que tenemos actualmente de los canales de abastecimiento a las minas romanas está basado en el análisis

cartográfico y la reconstrucción topográfica de más de 1.500 km de redes de canales realizadas para minas importantes como Las Médulas, Llamas de Cabrera, Teleno y otras⁵. La principal concentración de minería aurífera romana se produce en la parte oriental de la provincia de León, especialmente en el sector Médulas-Teleno, donde se encuentra el mayor conjunto mundial de minería aurífera romana⁶ (Figura. 4).

La reconstrucción topográfica de un canal permite obtener importantes datos como la cota de trabajo en la mina, distancia de trazado y su pendiente, así como la variación de esta por diferentes condicionantes del relieve o la intencionalidad de sus constructores. De este modo, con estos valores ya estamos en condiciones de analizar el volumen de abastecimiento posible y la operatividad de la red hidráulica dentro de la explotación minera, donde hay que tener siempre en cuenta que, casi sin excepción, los trabajos se realizan desde las cotas inferiores hacia las superiores, condicionado esto por la evacuación de los escombros.

Diseño: los canales de minería fueron concebidos como estructuras lineales de conducción de agua de sección rectangular, destinadas en general a la captación de las principales fuentes de abastecimiento —ríos— que garantizaran un suministro continuo y regular de agua en cualquier época del año (Figura 5).

A lo largo de estos años de investigación hemos podido apreciar que tanto la pendiente de trazado como las anchuras de excavación se mantienen dentro de unos parámetros predeterminados y específicos. Así, las grandes minas disponen de canalizaciones de hasta 1,20-1,35 m de anchura media, mientras que, bajando un orden de magnitud, los canales se construyen ya de 0,90 m, llegando hasta los de 0,40 m y menos en el caso de los de corto recorrido o abastecimiento nival⁷. No obstante, la medición exacta de la anchura de un canal es una ardua tarea que puede resultar infructuosa si no se encuentran tramos cortados directamente en la roca y en un estado adecuado.

La pendiente media de los canales de minería hidráulica romana se mantiene generalmente constante, independiente por lo general de la anchura de caja, con valores medios que oscilan entre el 0,2 y el 0,3 %. Estos datos se han podido medir con precisión en los canales de Las Médulas gracias a su largo recorrido⁸. Actualmente ya es posible realizar mediciones muy precisas

⁵ Matías, 2021.

⁶ Domergue, 1972.

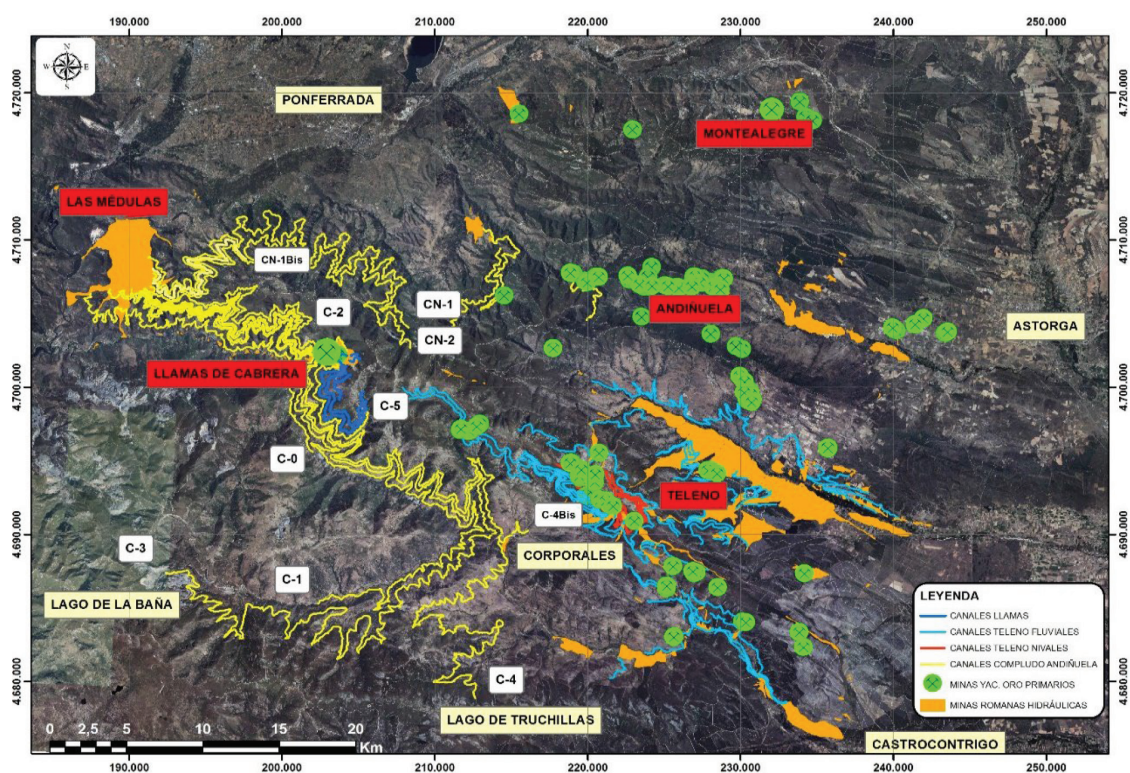
⁷ Matías, 2006a, 240.

⁸ Matías, 2008a.

³ Longridge, 1910.

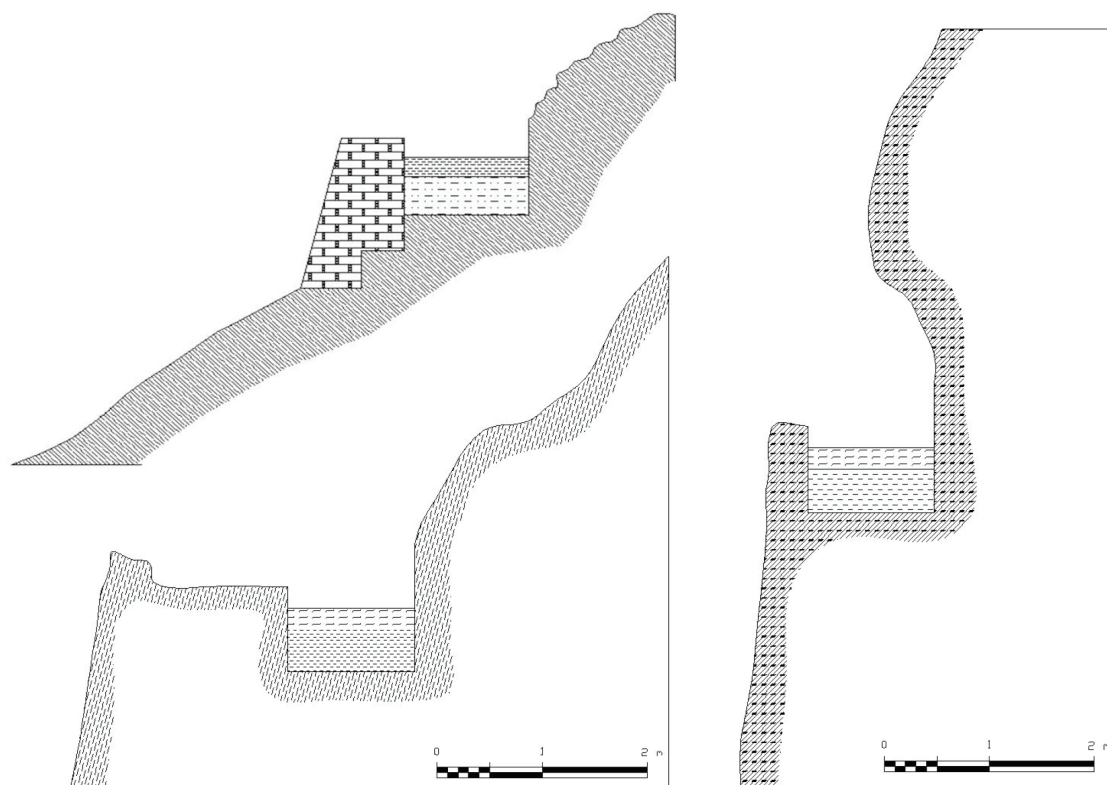
⁴ Matías, 2010.

Figura 4. Plano general de la minería aurífera romana del sector Médulas-Telno



Fuente: Matías, 2021.

Figura 5. Sección tipo de un canal de minería —arriba— y secciones cortadas en la roca



Fuente: Matías, 2008a.

Figura 6. Muro de sostenimiento de un canal completamente oculto por la vegetación. Canal C-3 de Las Médulas en Río Cabo. Saceda-Castrillo de Cabrera (León)



Fuente: Foto del autor.

de la pendiente en tramos cortos utilizando los modelos digitales del terreno (MDT) obtenidos a partir de los datos LIDAR⁹.

Construcción: aunque la vista más espectacular de los canales de minería hidráulica romana es la de los cortes producidos en el terreno cuando se tienen que atravesar farallones rocosos, la mayor parte del trazado se realiza excavando parcialmente la caja en la ladera de la pendiente y preparando un muro de cierre exterior, firmemente asentado en el terreno mediante sendos escalones, tallados a ser posible en la roca firme (Figura 6). Este muro de cierre sirve a la vez como de corredor de servicio para permitir eventuales reparaciones y un correcto mantenimiento. El muro se realiza de mampostería en piedra, aprovechando en todo momento los diversos materiales del terreno circundante. En el estado actual de las investigaciones no se han encontrado evidencias de haber utilizado un revestimiento impermeabilizante, si bien se ha constatado en

algunos puntos que la cara interior del muro del canal en contacto con el agua tiene las juntas realizadas con tierra del entorno inmediato como agente de impermeabilización.

Por las huellas de los picos dejadas en el terreno se aprecia que la excavación de la caja del canal fue realizada en varias fases (hasta tres se han podido constatar) de tal forma que podemos asegurar que hubo un trazado inicial nivelado que precisó de un desbroce del terreno sobre el que excavar posteriormente, seguido de una primera fase de nivelación gruesa que precede a una nivelación más precisa que da al canal su acabado final. Las técnicas topográficas empleadas¹⁰ resultaron muy efectivas y sorprenden, hoy en día, por los resultados conseguidos al enfrentarse a nivelaciones tan precisas en terrenos tan difíciles.

Capacidad de transporte: la combinación del dato de la pendiente y la geometría constructiva de un canal permite ya un cálculo aproximado de la velocidad del

⁹ Matías; Llamas, 2018, 2021.

¹⁰ Moreno, 2004.

agua y, por tanto, conocer la capacidad de suministro. Su cuantificación teórica exacta es un problema aún por resolver para la moderna ingeniería hidráulica debido a las específicas condiciones del flujo del fluido que dificultan el cálculo de la velocidad real, ya que no se trata de un flujo laminar puro, sino que este se realiza en condiciones de turbulencia. Sin embargo, los resultados empíricos de múltiples experiencias realizadas desde mediados del siglo XIX han permitido un cálculo teórico bastante preciso de los caudales en función de las características del canal, teniendo en cuenta para ello los parámetros más importantes: dimensiones, pendiente y naturaleza de las paredes y fondo de la conducción.

La combinación del peso propio del agua con la inclinación del fondo del canal hace que el agua fluya hacia los puntos de cota inferior, convirtiéndose la energía potencial de la masa de agua en energía cinética. Al tratarse de conductos abiertos de pendiente sensiblemente constante y geometría homogénea, la velocidad del flujo es uniforme y está condicionada a las fuerzas de oposición que surgen del rozamiento con el fondo y las paredes del canal. A efectos de cálculos hidráulicos, la presión atmosférica es sensiblemente constante, por lo que no es necesario introducirla en los desarrollos matemáticos.

Dentro del propio canal la velocidad del agua no es la misma en toda su masa, pues el roce con las paredes laterales y el fondo hace que allí sea apreciablemente más lenta, tanto más cuanto mayor sea la rugosidad de los materiales. La relación entre las velocidades que se pueden medir en las distintas secciones y la velocidad media efectiva se establece experimentalmente, aunque siempre existen ciertos márgenes de error. En todo caso, la proporcionalidad entre la profundidad de la lámina de agua para una misma sección y el caudal de flujo no es una magnitud lineal, disminuyendo notablemente el caudal a medida que se va haciendo menor la lámina de agua por causa del predominio en mayor medida de las fuerzas de rozamiento sobre la masa de fluido.

Cuando el agua está en movimiento uniforme en un canal, las fuerzas de rozamiento se encuentran en equilibrio y se establece una velocidad media de flujo V , cuyo cálculo teórico nos permitirá determinar el caudal Q en función de la sección S , según la expresión:

$$Q = V \cdot S$$

El cálculo de la velocidad real de flujo en canales abiertos es una cuestión ya abordada desde hace mucho

tiempo y cuya resolución parcial fue conseguida experimentalmente para el caso del agua en el año 1775 mediante la fórmula sugerida por el ingeniero francés A. Chezy:

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot I}$$

V , velocidad

C , coeficiente de Chezy

R , radio hidráulico: cociente entre la sección S y el perímetro mojado P

I , pendiente del canal

En un primer momento, debido a lo limitado de los datos disponibles, Chezy pensó que el coeficiente C , obtenido experimentalmente con mediciones de la velocidad, era una magnitud constante. Investigadores posteriores hallaron que C es función de tres factores: I , R y n . El valor de n como coeficiente de aspereza de las paredes del canal fue estimado experimentalmente en 12 categorías¹¹:

$n = 0,009$ para madera bien cepillada

$n = 0,010$ para cemento puro

$n = 0,011$ para mortero de cemento con 1/3 de arena

$n = 0,012$ para madera sin cepillar

$n = 0,013$ para sillería y obra de ladrillo bien colocado

$n = 0,015$ para obra basta de ladrillo

$n = 0,017$ para mampostería concertada

$n = 0,020$ para canales hechos en grava firme

$n = 0,025$ para canales y ríos en buenas condiciones

$n = 0,030$ para canales y ríos con piedras y hierbas

$n = 0,035$ para canales y ríos en malas condiciones

- Fórmula de Manning, 1890:

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[n]{R}$$

$$Q = V \cdot S \quad V = C \cdot \sqrt{R \cdot I} \quad \text{Fórmula de Chezy.}$$

C es un coeficiente que depende de las características dimensionales y constructivas del canal y su cálculo se realiza mediante la fórmula de Manning:

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[n]{R}$$

¹¹ King y Brater, 1962, 253.

n = coeficiente de rugosidad de las paredes del canal.

Sustituyendo C en la fórmula de Chezy:

$$V = \frac{1}{n} \sqrt[3]{R^2} \cdot \sqrt{I}$$

expresión más habitual de la fórmula de Manning.

Analizaremos a continuación los principales parámetros que intervienen en el cálculo:

Anchura L : considerada constante en todo el recorrido. Depende de cada canal.

Rugosidad n : coeficiente $n=0,030$, correspondiente a un material de las paredes del canal con un carácter mixto, intermedio entre la roca excavada y la construcción del asiento y pared exterior con lajas de piedra. El cambio de materiales en las paredes y fondo del canal afecta notablemente a la velocidad del agua, pero como es una constante constructiva para todos los tramos del trazado de la red hidráulica, se ha elegido también en este caso el coeficiente de rugosidad más desfavorable.

Pendiente I : pendiente media calculada de cada canal. Es importante tener en cuenta que, para este valor, cada incremento de 0,5 metros por kilómetro o 0,05 % supone un aumento de caudal del 7 %, de ahí la importancia de una medición precisa.

Lámina de agua h : en el estudio realizado sobre el caudal de los canales de Las Médulas se ha establecido para los cálculos hidráulicos un intervalo de funcionamiento del canal con 0,40–0,60 m de lámina de agua como nivel de trabajo habitual para canales de 1,20 m. La variación de la lámina de agua respecto a una altura máxima es de 0,60 m; cada 10 cm menos de altura de agua se registra una variación de caudal del 22,5 %, cifra realmente significativa ya que a 0,40 m de lámina de agua el caudal se llega a reducir casi a la mitad. Queda claro que la altura de lámina de agua es el factor más crítico sobre el que es necesario incidir para garantizar el suministro de caudal adecuado a las características constructivas de los canales, lo que justificaría y obligaría a un cuidado mantenimiento de las redes hidráulicas en todo su trazado para evitar las pérdidas de caudal producidas por una posible obstrucción, reboses por una sedimentación excesiva o, incluso, la eventual rotura de las paredes del canal.

Algunos autores han llegado a proponer una lámina de agua sorprendentemente reducida de apenas 10 cm

para canales de gran anchura como los de Las Médulas¹², basándose únicamente en el pulimento observado sobre el fondo del canal, sin tener en cuenta ningún otro tipo de consideración.

Para resolver definitivamente esta importante cuestión ha sido necesario recurrir a las muchas evidencias que se han conservado en algunos puntos de las alturas del muro de cierre tallado en la roca y también a los voladizos dejados en la roca cortada para permitir el paso del agua (semitúneles), evitando así la realización de un trabajo innecesario. Un análisis pormenorizado de estas estructuras nos permite apreciar con total claridad que la lámina de agua estaba limitada constructivamente a un máximo de 0,70–0,80 m, por lo que se podría considerar como lámina de agua de funcionamiento óptimo, en su máxima capacidad, los 0,60 m, para unas condiciones adecuadas de mantenimiento del canal en todo su recorrido. Sin embargo, han de tenerse en cuenta las grandes longitudes de trazado y las características hidrogeológicas de la zona, con una abundante escorrentía superficial y fuertes pendientes, que dificultarían en gran medida este mantenimiento debido a los frecuentes arrastres del terreno, caída de restos vegetales o paso de animales, etc. De este modo, un dato en principio más realista sobre la altura efectiva de la lámina de agua sería el de 0,40 m, aunque las dimensiones constructivas permitan índices claramente superiores.

Debido a la pureza del agua, que circula en su mayor parte por terrenos de naturaleza silíceas, el nivel de llenado de los canales no puede ser determinado por la huella dejada en las paredes, ya que no se depositan incrustaciones calcáreas. Sin embargo, a este respecto, con posterioridad a la determinación inicial y empírica de la lámina de agua, hemos conocido el caso de un canal de abastecimiento tallado en la roca calcárea, donde sí es posible apreciar con claridad la huella del nivel de llenado del canal. Se trata del túnel “Cueva” de la Gerijuela, en las inmediaciones de la localidad de Velilla del Río Carrión¹³, perteneciente al trazado del canal romano de 21,5 km conocido como Camino de Los Moros. El dato de altura de lámina de agua es de 0,40–0,45 m, concordante con lo que se había observado anteriormente en el terreno con otros criterios en lugares diferentes (Figura 7).

¹² Sánchez-Palencia; Pérez, 2000, 200. Sánchez-Palencia; Sastre, 2002, 245. Pérez-García, 2001, 50.

¹³ Matías, 2012, 29.

Figura 7. Excavación en semitúnel que limita la altura máxima de la lámina de agua (izquierda) y marca dejada por el agua en las calizas de la “cueva de la Gerijuela” perteneciente al canal Camino de Los Moros de Velilla del Río Carrión-Palencia (derecha)



Fuente: Fotos del autor.

Otro factor importante a contemplar para el cálculo final de los caudales son las pérdidas por infiltración y evaporación. En la construcción de los canales no se han observado hasta ahora revestimientos de mortero u otros materiales para garantizar una mayor impermeabilización. Estas pérdidas por infiltración tuvieron que ser significativas en la mayor parte del recorrido, dados los materiales utilizados en la construcción y las grandes longitudes de trazado, a lo que hay que añadir la escasa velocidad del agua. Por ejemplo, el agua del canal C-3 de Las Médulas, de casi 150 km, tardaría 2,6 días en recorrer la distancia existente entre la captación y el yacimiento. A modo de ejemplo, sin poderse precisar por ahora el grado de infiltración, el mismo canal C-3, en los 150 km de recorrido, presenta una superficie mojada susceptible de experimentar filtraciones de 360.000 m² (36 hectáreas), constituida por los materiales rocosos compactos sobre los que se excava la caja en el terreno, pero también, en igual o mayor proporción, por los elementos sueltos empleados en la construcción de los muros de cierre.

Por otro lado, las pérdidas por evaporación en las épocas estivales, cifradas aproximadamente en 1 l/s por ha¹⁴, también pueden alcanzar cierta entidad por

iguales motivos que la infiltración: longitudes de recorrido elevadas y la velocidad escasa. Utilizando también el caso del canal C-3 como ejemplo, las pérdidas por evaporación estarían referidas a una superficie de 180.000 m² (18 hectáreas), lo que llegaría a suponer en la descarga del canal tras todo su recorrido un déficit de caudal de 18 l/s, que representaría un porcentaje del 6,21-3,67 % de su caudal efectivo, estimado en 0,29-0,49 m³/s, referido a una lámina de agua de 0,40-0,60 m, respectivamente¹⁵.

Como es lógico, para todo este volumen de pérdidas hay que tener muy en cuenta la notable abundancia de arroyos y manantiales en su trazado que, a pesar de ser un problema constante para la integridad de los canales en épocas de lluvias y deshielos, bien pudieron compensar porcentajes muy elevados de las pérdidas, contribuyendo así a garantizar el caudal efectivo a lo largo de todo el recorrido hasta los depósitos de regulación de las zonas de descarga del yacimiento.

Ya desde otro punto de vista, las variaciones estacionales influirían también tanto en el aspecto hidráulico como en el logístico, obligando a un mantenimiento mucho más exhaustivo en las épocas invernales o de fuertes lluvias, sin otros problemas para el abastecimiento

¹⁴ Liria, 2001, 24.

¹⁵ Matías, 2008a.

de agua que conseguir mantener la integridad del canal para conservar la máxima lámina de agua posible. Por el contrario, en el período estival, aun garantizando los ríos un llenado pleno del canal en su captación, deberían tenerse especialmente en cuenta las pérdidas por infiltración para compensar el menor caudal procedente de los arroyos de ladera.

Finalmente, atendiendo a las propiedades hidráulicas de estos canales de sección rectangular, resulta una coincidencia muy interesante el hecho de que, técnicamente, podemos calcular de forma teórica mediante un sencillo desarrollo matemático la sección de máximo rendimiento, aquella en la que el radio hidráulico R , cociente entre la sección S y el perímetro mojado P , sea máximo, que es la que corresponde con la del mínimo perímetro mojado¹⁶:

Radio hidráulico R : S/P

$$P = L + 2h = \frac{S}{h} + 2h \text{ de donde } \frac{dP}{dL} = -\frac{S}{h^2} + 2 = 0 \rightarrow S = 2h^2$$

Donde: P : perímetro mojado

L : anchura del canal

h : altura de lámina de agua

S : sección efectiva $L \cdot h$

Como $S = L \cdot h$

$$L \cdot h = 2h^2 \rightarrow L = 2h \text{ SECCIÓN DE MÁXIMO RENDIMIENTO}$$

El máximo rendimiento constructivo de los canales de sección rectangular se consigue con una profundidad igual a la mitad de su ancho, que es precisamente la profundidad óptima de trabajo con la que se está trabajando, en función de las evidencias del terreno. Mediante las observaciones anteriores sobre los parámetros constructivos se ha llegado a la conclusión que la anchura efectiva de los canales más grandes es de 1,20 m, con una altura de lámina de agua que podría llegar a alcanzar con cierta facilidad los 0,60 m, lo que coincide con la utilización en la construcción de los canales de minería hidráulica romana del diseño técnico de máximo rendimiento.

Para el caso más estudiado en este aspecto, que son Las Médulas, se estima una capacidad de suministro anual comprendida entre 50 y 90 millones de metros cúbicos¹⁷.

Túneles y semitúneles: el paso de lugares escarpados constituyó un desafío al trazado de los canales

de minería romana. La presencia en los terrenos paleozoicos de numerosos crestones de cuarcita supuso un importante inconveniente en el trazado de los canales. Debido a la dureza de este material, solo en aquellos lugares en donde era inevitable se registra la perforación de algunos túneles de corto recorrido para reducir la longitud de estos tramos de penosa excavación manual. Por las características de la cuarcita, el avance de la perforación se realizaba principalmente mediante el uso alternativo de fuego y agua para resquebrajar térmicamente la roca. Se aprecia en el interior de algunos túneles de trazado sinuoso que, de encontrar discontinuidades de menor dureza, no tenían inconveniente alguno sus constructores en seguirlos, aun a costa de hacer fuertes quiebros en el trazado para acabar cuanto antes la perforación, no habiendo en la época otro modo más efectivo de hacerlo, ya que las herramientas de hierro por sí solas son claramente insuficientes para progresar sobre este material (Figura 8).

Variaciones de la pendiente: en los canales de Las Médulas, los que más se han estudiado en detalle hasta la fecha, se han analizado algunas variaciones de la pendiente del trazado con el objetivo de evitar obstáculos significativos que dificultasen la construcción del canal o persiguiendo objetivos específicos. Los más interesantes son los siguientes:

Canal CN-2 en el Valle de Silencio: se incrementa la pendiente para evitar la zona kárstica de la Cueva de San Genadio.

Canal C-4 en Corporales: el paso del punto exacto del puerto de Peña Aguda para realizar el trasvase de las aguas del Eria y del lago de Truchillas se consiguió incrementando la pendiente del canal a partir del cruce con el río Cabo.

Canal C-5 en Llamas de Cabrera: la presencia de un imponente crestón de cuarcita, donde fue necesario trazar diversos túneles para los canales C-3 y C-4, disuadió a los ingenieros romanos de continuar atravesando el crestón y elevaron la pendiente para sortearlo por encima.

Cambios en la anchura de caja: en las primeras mediciones solo se había apreciado un cambio de la anchura de caja dentro de un mismo canal, registrado en el canal C-4 de Las Médulas en Corporales, de finalidad desconocida en ese momento. La progresión de las investigaciones en los canales de Las Médulas ha proporcionado ya los motivos de esa circunstancia, tras el hallazgo de una prolongación de 43 km del canal C-4

¹⁶ López, 1997, 335.

¹⁷ Matías, 2008b.

Figura 8. Reconstrucción gráfica del paso de un crestón de cuarcita en el canal C-1 de Las Médulas en Santalavilla-León



Fuente: Dibujo de Luis Frechilla.

hasta las inmediaciones del lago de Truchillas¹⁸. Condiciones semejantes tienen lugar en el canal C-3, que inicia su trazado con apenas 0,90 m de anchura, y alcanza ya la medida habitual de 1,20 m tras recoger las aguas del río Cabo.

Trasvases de cuencas hidrográficas: se producen cuando las condiciones de abastecimiento de una cuenca llegan a su límite topográfico o, simplemente, es necesaria esa captación de agua específica por las condiciones del terreno, como la solución más sencilla (Figura 9). Hoy en día se conoce en la península ibérica un único caso de trasvase de cuenca hidrográfica de época romana para uso doméstico-industrial¹⁹. El resto de conducciones romanas conocidas de esta tipología está vinculado a la minería aurífera romana del entorno de la sierra del Teleno, en número de 5:

Trasvase Eria-Cabrera: canal C-4BIS de Las Médulas.

Trasvase Truchillas-Cabrera: canal C-4 de Las Médulas (Fig. 9).

Doble Trasvase Río Cabo-Teleno: canales TS-4 y TS-5 de la vertiente sur del Teleno.

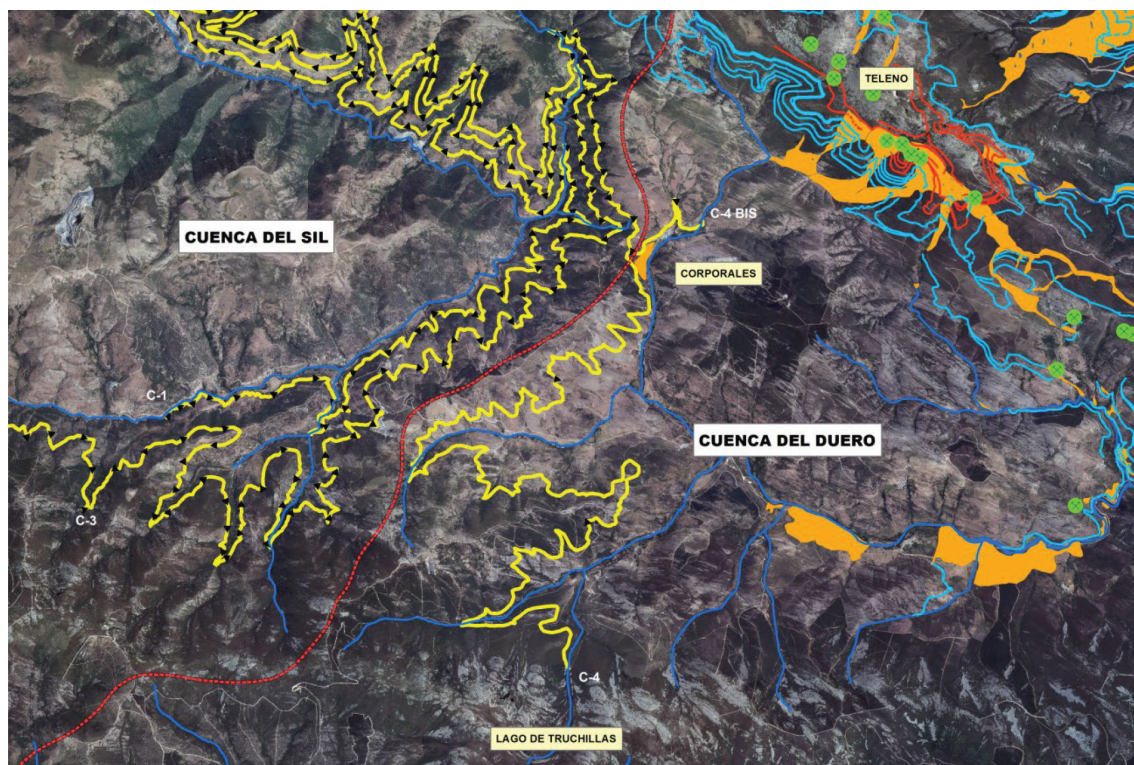
Trasvase Meruelo-Prada de la Sierra: canal de abastecimiento de la mina de Fuenllabrada.

Canales nivales: cuando las minas de oro se sitúan a una altitud elevada, superior a los 1800 m, las condiciones hidrológicas cambian drásticamente por la meteorología y se impone un sistema de abastecimiento diferente que consiste en la captación de aguas de deshielo mediante depósitos de acumulación de nieve estratégicamente situados, aprovechando las condiciones del terreno. Cuando se produce el deshielo primaveral, el agua discurre por los canales hasta los depósitos de regulación-distribución. En ocasiones, los propios canales sirven también de elementos de captación del

¹⁸ Matías, 2017.

¹⁹ Acueducto romano de Albarracín a Cella. Moreno, 2015.

Figura 9. Esquema de los principales trasvases de agua entre cuencas para el abastecimiento de la minería aurífera romana del sector Médulas-Telero



Fuente: elaboración propia. Ortoimagen: PNOA 2017 cedida por el IGN.

deshielo. Este hecho es especialmente patente en las minas del Teleno y se ha constatado también en las del área Salientes-Villablino y Los Ancares²⁰. El denominador común de este tipo de captaciones es la ausencia, a partir de una cierta altitud, de cursos de agua estables, por lo que la única fuente de abastecimiento es la producida por el deshielo de las nieves acumuladas durante la estación invernal. La anchura de estos canales es sensiblemente inferior. Donde se han podido medir secciones, esta varía de 0,40 m a 0,60 m. Se da la circunstancia de que algunos de los más grandes depósitos de agua conocidos de la minería hidráulica romana, situados a 1.900 m de altitud en la sierra del Teleno, estaban exclusivamente alimentados por el agua de deshielo (Figura 10).

Depósitos de regulación-distribución: habitualmente el destino final de un canal romano de abastecimiento para la minería hidráulica es un estanque donde acumular el agua para obtener así una regulación controlada de la descarga. Los depósitos se emplazan directamente en la explotación o bien se

encuentran en las inmediaciones para disponer de una reserva de agua que se dirige luego a otros depósitos. En el primer caso se puede dar la circunstancia de que el depósito puede llegar a ser total o parcialmente destruido por el avance de los trabajos mineros, lo que aporta datos significativos sobre la evolución de la mina. Los canales que comunican depósitos o vierten agua a los frentes de trabajo tienen ya unas dimensiones y técnicas constructivas muy diferentes y, sobre todo, no conservan la suave pendiente de los canales de alimentación, presentando por lo general valores muy superiores y variables.

Los canales de Las Médulas: ejemplo de la mayor red hidráulica de la minería romana

A lo largo de los tiempos ha destacado siempre entre todas las explotaciones de oro romanas la mina de Las Médulas, situada en el oeste de la provincia de León, entre las comarcas del Bierzo y La Cabrera. De hecho, una parte importante del escueto testimonio del naturalista y geógrafo Plinio el Viejo sobre la minería

²⁰ Matías, 2006b, 2013, 2023.

Figura 10. Depósito de acumulación de agua de deshielo en el Teleno



Fuente: Foto del autor.

de oro romana que se recoge en su *Historia Natural* (PLIN.Nat.33.66-78) es una referencia clara sobre el modo de explotación minera de este yacimiento aurífero (Figura 11).

El valor histórico y espectacularidad de los restos de la mina romana de Las Médulas han merecido su catalogación por la UNESCO en diciembre de 1997 como bien cultural Patrimonio de la Humanidad. La capacidad demostrada por la tecnología minera romana para acometer a gran escala los trabajos de explotación de este gigantesco yacimiento aurífero constituye un importante hito en la historia de la minería mundial que presenta, aún hoy, importantes cuestiones por esclarecer.

Para poder llevar a cabo la explotación del yacimiento aurífero de Las Médulas²¹, fue absolutamente necesaria la construcción de unos abastecimientos de agua que garantizaran el suministro adecuado para un correcto funcionamiento de los métodos de minería hidráulica aplicados por los ingenieros romanos. La

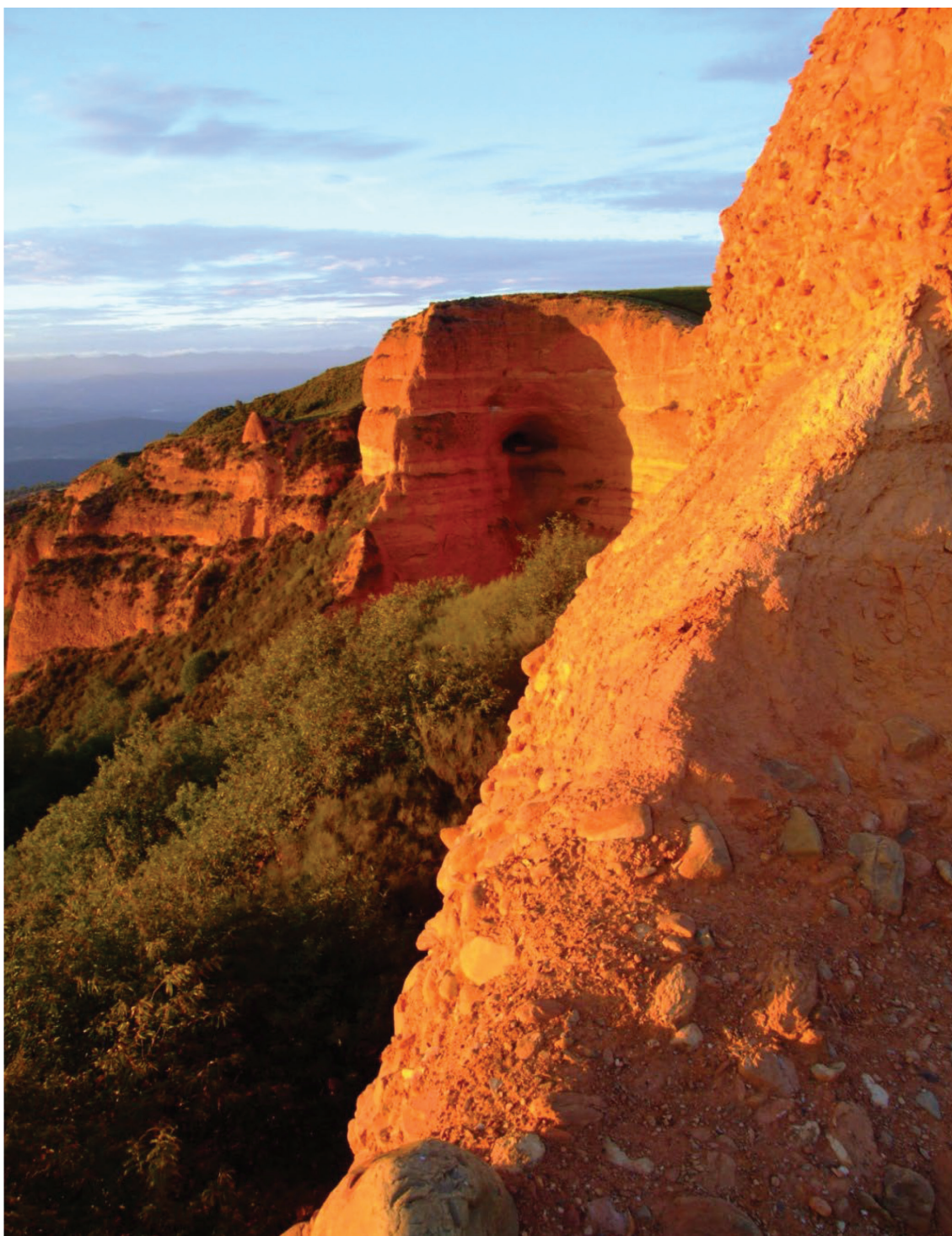
posición notablemente elevada de estos depósitos rojos auríferos respecto a los cauces fluviales más próximos obligó a resolver el problema del suministro de agua mediante la planificación y construcción de una extensa red de canales cuya extensión, trazado y estructura había sido uno de los aspectos técnicos más desconocidos de Las Médulas hasta fechas recientes, en que ya ha sido realizada una precisa reconstrucción topográfica de la totalidad de esta red hidráulica²² (Figura 12).

La red de canales de abastecimiento de agua para la explotación de Las Médulas se encuentra emplazada en las vertientes norte y sur de los montes Aquilianos, estribación montañosa que constituye la parte más occidental de la sierra del Teleno, en cuyo extremo final hacia el oeste se encuentra el yacimiento de Las Médulas. El trazado de los canales se prolonga en dos casos hacia la vertiente norte de la sierra de La Cabrera, cerca ya del nacimiento del Cabrera, con objeto de captar este río en el entorno de las localidades de La Baña y

²¹ Matías, 2016.

²² Matías, 2004, 2006a, 2008a, 2008b, 2017, 2020.

Figura 11. Restos de la última fase de explotación de Las Médulas en el entorno del mirador de Orellán



Fuente: Foto del autor.

Encinedo. Se constata en todo momento la captación preferente y específica del caudal del río Cabrera de la cuenca del Sil, principalmente, a la que le siguen en importancia la del río Eria de la cuenca del Duero y la captación del río Oza, de la cuenca del Sil, esta última ya correspondiente a la vertiente norte de los montes

Aquilianos, así como la de algunos arroyos de cierta importancia.

La red hidráulica construida por los ingenieros romanos para la explotación de Las Médulas presenta la siguiente estructura de abastecimiento y longitudes de trazado, referenciados en orden ascendente:

Figura 12. Vista en 3D del conjunto de canales de Las Médulas



Fuente: elaboración propia. Imagen base: Google Earth.

3 CANALES en la vertiente norte de los montes Aquilianos: Bierzo-red septentrional

CN-1	73,37 km captación: río Oza en Peñalba de Santiago
CN-1Bis	20,13 km captación: arroyo de Ferradillo en Villavieja
CN-2	58,11 km captación: río Oza en Peñalba de Santiago

6 CANALES en la vertiente sur de los montes Aquilianos: Cabrera-red meridional

C-0	43,03 km captación: río Cabrera en Odollo
C-1	95,60 km captación: río Cabrera en Encinedo
C-2	33,90 km captación: arroyo Valdecorrales
C-3	148,46 km captación: río Cabrera en La Baña
C-3 a	9,94 km subsidiario del C-3 desde el arroyo de Rozana-Pombriego
C-3 b	9,50 km subsidiario del C-3 desde el arroyo de Rozana-Pombriego
C-4	125,56 km captación: río Eria en Corporales y lago de Truchillas
C-4Bis	3,66 km ramal de captación del río Eria
C-5	45,30 km captación: arroyo de la sierra en Odollo

TOTAL TRAZADO: 666,56 km

La red septentrional realizaba la captación del limitado caudal del río Oza en el entorno de Peñalba de Santiago mediante dos canales principales que intervinieron tanto en el comienzo de la explotación CN-1, como en la etapa final CN-2. Existe un tercer canal en la red septentrional denominado CN-1bis, de corto recorrido (19,3 km), que captaba las aguas del arroyo de Ferradillo en Villavieja.

La red de canales meridional resulta mucho más extensa y compleja, contando con 6 canales principales que abastecían a Las Médulas desde la cuenca del río Cabrera, teniendo tres de ellos (C-0, C-1 y C-3) su captación directamente en el propio cauce de este caudaloso río.

El canal C-3, con casi 150 km de trazado, es el más largo de los que abastecían a Las Médulas. Capta el río Cabrera por debajo del lago de La Baña y mantiene durante todo su recorrido una pendiente uniforme y constante del 0,0021 (0,21%). La existencia del excepcional y extenso trazado del canal C-3 nos confirma de algún modo el dato que aporta Plinio en sus textos aludiendo a las cien millas romanas de distancia (147,8 km) para alguna de las conducciones de agua, dato que hasta hace poco no había sido posible considerar como cierto en su verdadera magnitud, poniéndolo incluso en duda y recurriendo a sumas parciales de trazados para justificar su existencia²³.

²³ Sánchez-Palencia, 1980, 220. Sánchez-Palencia; Pérez, 2000, 189.

Un cuarto canal C-4 realizaba la captación del agua del río Eria (cuenca del Duero) en las inmediaciones del actual barrio de Pedrosa de Corporales, trasvasando el agua hacia la vertiente del río Cabrera (cuenca del Sil), mediante la corrección intencionada del trazado del canal desde las proximidades del río Cabo, incrementando

su pendiente la cantidad necesaria para hacerlo pasar con exactitud por el punto topográfico más favorable del puerto de Peña Aguda a la cota 1.247 m, donde se aprecia su caja cortada por la actual carretera (Figura 13). Recientemente se ha encontrado una prolongación de este canal hasta las inmediaciones del lago de Truchillas

Figura 13. Excavación del canal C-4 en el Puerto de Peña Aguda. Corporales-León



Fuente: Foto del autor.

de 43 km de trazado, que constituye un nuevo trasvase de cuenca hidrográfica, y que dota a este canal de una longitud de 125 km²⁴. Confluye en Las Médulas con el canal CN-2 en el paraje de Campo de Braña.

El complejo de minería aurífera romana del Teleno

La sierra del Teleno se encuentra al este de Las Médulas y es la continuación de las estribaciones de los montes Aquilianos. Alcanza su cota máxima en el Teleno con una altitud de 2.185 m. El drenaje de esta imponente montaña se realiza por el río Duerna al norte y el río Eria al S. La zona es aurífera y ya fue reconocida por los romanos en la totalidad de su extensión, realizando estos trabajos de minería hidráulica desde los márgenes de los ríos en depósitos aluviales, hasta la propia cumbre, en depósitos eluviales y coluviales, con diversas explotaciones en yacimientos primarios²⁵ (Figura 14).

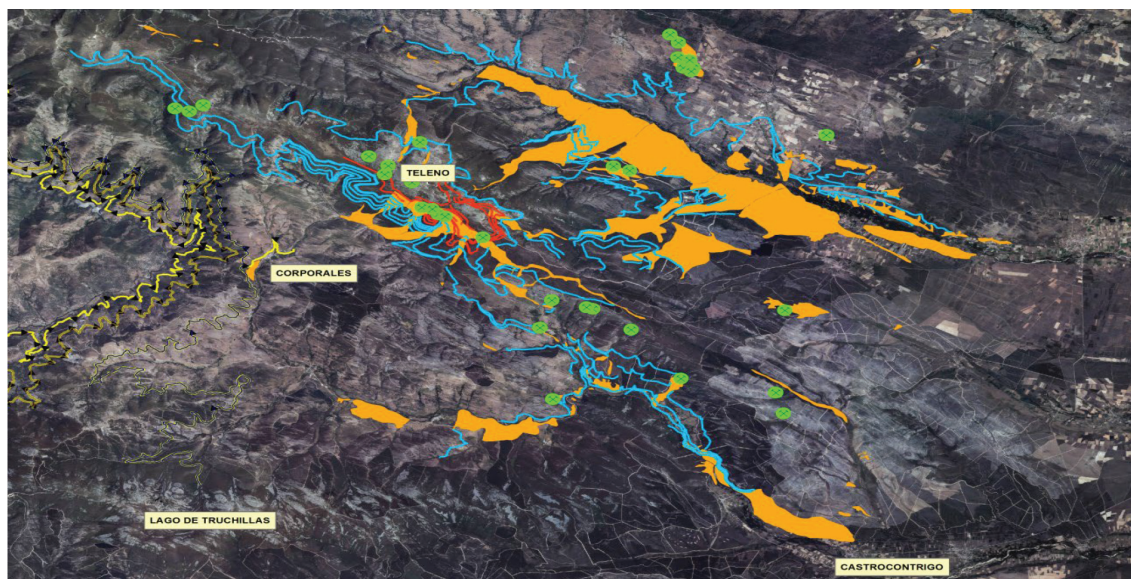
El área ha sido intensamente investigada por empresas mineras desde mediados del siglo XIX y, especialmente, en los años 70-80 del siglo XX²⁶. Domergue ha calificado la red hidráulica de las minas de oro romanas del Teleno como la más compleja que se conoce.

En el sistema hidráulico superior, por encima de la cota 1.400 m, se han cartografiado más de 135 km de canales divididos en dos redes que se han distinguido por el tipo de abastecimiento: fluvial y nival²⁷. El inventario de depósitos de regulación-distribución ha superado la centena y fueron localizados dos nuevos trasvases de cuencas hidrográficas en la vertiente sur. Actualmente se ha realizado el estudio mediante el MDT-Lidar de algunas minas de los niveles inferiores donde predominan los sedimentos cenozoicos²⁸. La característica principal de los depósitos inferiores del Teleno en su vertiente norte es la existencia de una explotación ininterrumpida a lo largo de 20 km del margen derecho del río Duerna sobre una superficie de 30 km². Se pueden clasificar los trabajos mineros romanos del Teleno como el mayor conjunto mundial de minería aurífera romana.

El agua en la minería aurífera romana subterránea

Desde el congreso internacional celebrado en León en 1970 se ha difundido con excesiva frecuencia y sin ningún tipo de rigor técnico la hipótesis de la utilización en

Figura 14. Zonas de explotación —naranja— y canales —azul y rojo— de la zona del Teleno. Con la simbología verde se indican los yacimientos primarios



Fuente: Elaboración propia. Imagen base: Google Earth.

²⁴ Matías, 2017.

²⁵ Matías; González-Nistal, 2014.

²⁶ Domergue, 1971, 1972, 1972-74, 1986, 2008, 2012. Pérez, 1977. Domergue; Hérail, 1978. Sáenz; Vélez, 1974. Sánchez-Palencia, 1980.

²⁷ Matías, 2005, 2006b.

²⁸ Matías; Llamas, 2018, 2019.

la minería subterránea de grandes cantidades de agua procedente de sistemas de abastecimiento hidráulico para enfriar bruscamente la roca de cuarzo calentada mediante el fuego y provocar así su rotura²⁹. Ejemplos de esta incongruencia los podemos encontrar en la interpretación de diversos ámbitos de minería romana: Asturias, Tresminas, El Caurel, etc. especialmente relacionados con los trabajos de musealización, algunos muy recientes como el del Centro de Interpretación de Tresminas en Vila Pouca de Aguiar (Portugal).

El procedimiento de calentar las rocas duras para facilitar su rotura, denominado “caldas”, ya fue descrito por Agathárquides y recogido por Diodoro Sículo en el 50 a.C. en su descripción de las minas de oro del Egipto Ptolemaico³⁰:

“En los confines de Egipto y también en el territorio adyacente de Arabia y Etiopía se encuentra una región que posee las más grandes minas de oro, de donde mucho oro es extraído a la superficie con gran sufrimiento y coste. Aunque la tierra es negra por naturaleza, contiene filones y venas de roca blanca distinguida por su brillo, que sobrepasa el de todas las rocas que por naturaleza brillan... Después de consumir la mayor parte de la dureza del filón aurífero con un gran fuego que lo hace friable, comienza el proceso de producción manual...”.

Plinio y Agrícola también reflejan en sus textos el uso del fuego como medio para el trabajo de los materiales más duros, compuestos esencialmente por cuarzo. Las cantidades de agua técnicamente necesarias para este procedimiento son reducidas. Incluso, se habla en algunos textos de que no es estrictamente necesario, sino que el propio material se llega a resquebrajar por la escasa conductibilidad térmica del cuarzo y las impurezas e inclusiones que le acompañan³¹.

Hasta épocas relativamente recientes no se han sentido las bases para ofrecer una explicación razonada a la coexistencia de trabajos mineros subterráneos y redes de abastecimiento hidráulico en algunas minas de oro romanas. El análisis de estas explotaciones muestra sistemáticamente dos fases de trabajo en las que se utiliza en la primera fase un sistema hidráulico para explotar los depósitos auríferos superficiales, principalmente eluviales y coluviales. Después de esta fase,

cuando ha quedado al descubierto el yacimiento primario original y el agua ya no es capaz de profundizar en el terreno por su consistencia, se procede al ataque manual directo sobre los filones en una segunda fase que se inicia a cielo abierto, pasando luego a subterránea, si la mineralización continúa siendo interesante por su riqueza³².

Conclusiones

El extraordinario papel que ha representado el agua para la minería aurífera romana queda patente en las extensas redes de canales construidas para el abastecimiento de las explotaciones mineras. Las cartografías detalladas de los canales de minería han revelado la veracidad y exactitud de algunos datos recogidos en el texto de Plinio el Viejo en el siglo I de nuestra era.

La reconstrucción topográfica de los canales permite relacionar elementos dispersos de las infraestructuras hidráulicas mineras, obtener importantes datos como la cota de trabajo en la mina, las longitudes de trazado y analizar la pendiente, sus variaciones, posibles causas e intencionalidad. Las soluciones de ingeniería puestas de manifiesto al poder conocer con precisión el trazado muestran la naturaleza de las grandes dificultades técnicas que se tuvieron que afrontar y el ingenio para resolverlas mediante túneles, variaciones de pendiente, cambios de anchura, canales de abastecimiento nival o, incluso, trasvases de cuencas.

El conjunto de estos valores proporciona una extraordinaria información sobre aspectos básicos de ingeniería, como el diseño de las explotaciones, la geometría de los yacimientos, el volumen de abastecimiento posible o el desarrollo de la operativa minera. Esto ha sido estudiado específicamente en el caso de Las Médulas, que cuentan con una extensa y cuidada red de canales que alcanza los 700 km, cuyo análisis muestra con claridad que el cese de los trabajos mineros se produjo por el agotamiento de los aluviones auríferos y no por un descenso del precio del oro, según la teoría arqueológica habitual.

Los canales de la minería hidráulica romana han dejado una profunda huella sobre el terreno, que en ocasiones ha tenido un uso secular como vías de comunicación. En la actualidad se están recuperando diversos

²⁹ Almeida, 1970.

³⁰ Historia 3, 12-13 en Del Mar, 1902.

³¹ Craddock, 1992. Weisgerber; Willies, 2000. Berg, 2004.

³² Matías, 2010, 2021.

Figura 15. Corte en la roca del canal C-1 en Llamas de Cabrera (Benuza-León), integrado dentro de una ruta de senderismo: www.canalesromanos.es



Fuente: Foto del autor.

tramos como rutas de senderismo³³ que aportan un valor añadido a su importancia arqueológica como vestigio singular de la actividad humana (Figura 15).

³³ Por ejemplo: www.canalesromanos.es. En estos momentos se están realizando dos importantes actuaciones para abrir largas rutas de senderismo por los canales de Las Médulas, desde las localidades de Peñalba de Santiago (red septentrional) y Corporales (red meridional) hasta la propia explotación.

Bibliografía

- Almeida, Fernando.** 1970: "Mineração Romana em Portugal", en *Minería Hispana e Iberoamericana. Contribución a su investigación histórica*. León (España), Cátedra de Estudios de San Isidoro, T-1, 195-220.
- Berg, Bjørn Ivar.** 2004: "Firesetting: breaking rock with fire at Konsberg, Norway". *De Re Metallica*, 3, 43-47.

- Craddock, Paul T.** 1992: "A Short History of Firesetting". *Endeavour*, 16(3), 145-150. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(92\)90074-Y](https://doi.org/10.1016/0160-9327(92)90074-Y)
- Del Mar, Alexander.** 1902: *A History of the Precious Metals from the Earliest Times to the Present*. New York (USA), Cambridge Encyclopedia Company.
- Domergue, Claude.** 1971: "Las minas de oro romanas de la provincia de León: razones de una excavación arqueológica". *Tierras de León*, XIV, 39-51.
- Domergue, Claude.** 1972: "La mise en valeur des gisements de alluvions aurifères de le nord-ouest de l'Espagne: une technique d'exploitation romaine", en *XII Congreso Nacional de Arqueología, Jaén 1971*. Zaragoza (España), 562-576.
- Domergue, Claude.** 1972-74: "A propos de Pline et pour illustrer sa description des mines d'or romaines d'Espagne". *Archivo Español de Arqueología*, 45-47, 499-548.
- Domergue, Claude.** 1986: "Dix huit ans de recherche (1968-1986) dans les mines d'or romaines du nord-ouest de la Péninsule Ibérique", en *Actas del I Congreso Internacional Astorga Romana*. León (España), T. II, 7-101
- Domergue, Claude.** 2008: *Les mines antiques: la production des métaux aux époques grecque et romaine*. Paris (France), Ed. Picard.
- Domergue, Claude.** 2012: "Les exploitations hydrauliques romaines dans les dépôts alluviaux aurifères du Nord-Ouest de l'Espagne: Las Médulas et le Teleno (Province de León). À propos de publications récentes", en *L'eau: usages, risques et représentations dans le Sud-Ouest de la Gaule et le Nord de Péninsule Ibérique, de la fin de l'âge du Fer à l'Antiquité tardive (I^{re} s.a.C-VI^{es}.p.C.)*. Aquitania Supplement 21. Bordeaux (France), 111-140.
- Domergue, Claude; Hérail, Gérard.** 1978: *Mines d'or romaines d'Espagne: le district de la Valduerna (province de León). Étude geomorphologique et arqueologique*. Toulouse (France), CNRS.
- King, Horace Williams; Brater, Ernest F.** 1962: *Manual de Hidráulica*. México (México), Uteha.
- Liria Montañés, José.** 2001: *Canales hidráulicos: proyecto, construcción, gestión y modernización*. Madrid (España), Colegio de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos.
- Longridge, Cecil C.** 1910: *Hydraulic Mining*. London (Great Britain), The Mining Journal.
- López, Lázaro.** 1997: *Manual de Hidráulica*. Universidad de Alicante (España), Textos Docentes.
- Matías, Roberto.** 2004: "Ingeniería minera romana: La red hidráulica de Las Médulas", en *Actas del II Simposio de Minería y Metalurgia Antiguas del Sudoeste Europeo*. Madrid (España), SEDPGYM, 279-293.
- Matías, Roberto.** 2005: "La minería aurífera romana en la sierra del Teleno (León-España): nuevos datos sobre su ingeniería y gestión", en *Actas del III Simposio sobre Minería y Metalurgia antiguas del Sudoeste Europeo*. Porto (Portugal), SEDPGYM, 211-229.
- Matías, Roberto.** 2006a: "La Red Hidráulica de Las Médulas: trazado e ingeniería". *Revista del Instituto de Estudios Bercianos*, 30-31, 5-85.
- Matías, Roberto.** 2006b: "La Minería Aurífera Romana del Noroeste de Hispania: Ingeniería minera y gestión de las explotaciones auríferas romanas en la sierra del Teleno", en *Nuevos Elementos de Ingeniería Romana. III Congreso de las Obras Públicas Romana*. Salamanca (España), Gráficas Varona, 213-263.
- Matías, Roberto.** 2008a: "La red hidráulica de Las Médulas: una excepcional obra de la ingeniería romana", en *Actas del Homenaje a Las Médulas de la Real Academia Española de la Ingeniería*. Madrid (España), Real Academia de Ingeniería, 177-213.
- Matías, Roberto.** 2008b: "El agua en la ingeniería de la explotación minera de Las Médulas (León-España)". *Lancia 7*, 17-112.
- Matías, Roberto.** 2010: "Los yacimientos auríferos primarios de la provincia de León (España): técnicas de explotación romana", en *Povoamento e Exploração dos Recursos Mineiros na Europa Atlântica Occidental*. Braga (Portugal). 155-178.
- Matías, Roberto.** 2012: "Nuevos datos para el conocimiento de las minas de oro romanas del Alto Carrión". *Colección de Historia Montaña Palentina*, 6, 15-49.
- Matías, Roberto.** 2013: "Minería aurífera romana en el área Salientes-Villablino (León-España)", en *Actas del XIV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero, Castrillón-Asturias*. Madrid (España), SEDPGYM, 631-648.
- Matías, Roberto.** 2016: "Las Médulas (León-España): revisión e incógnitas sobre la tecnología minera romana de la mayor explotación del Mundo Antiguo", en *Actas del XI International Mining History Congress (IMHC2016)*, Linares-Jaén (España), 235-244.
- Matías, Roberto.** 2017: "Cartografía de un nuevo tramo de 43 km del canal C-4 de la mina de oro romana de Las Médulas (León-España)". *Cuadernos del Museo Geominero*, 29, 327-340.
- Matías, Roberto.** 2020: "Los canales de Las Médulas (León-España): razones para su inclusión en el Patrimonio de la Humanidad". *REA Revista Euroamericana de Antropología*, (10), 131-161. <https://doi.org/10.14201/rea202010>
- Matías, Roberto.** 2021: *La Minería Aurífera Romana en el Noroeste Hispano: una visión desde la Ingeniería de Minas actual*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (España). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.69222>
- Matías, Roberto.** 2023: "Minería Hidráulica Romana en Los Ancares (León-España)", en *Mines et Metallurgies Anciennes. Mélanges en l'honneur de Béatrice Cauuet*. 187-194. <https://doi.org/10.46608/dana9.9782356135377.20>
- Matías, Roberto; González-Nistal, Santiago.** 2014: "Delimitación de un nuevo y extenso yacimiento aurífero primario en la sierra del Teleno (León-España) siguiendo las evidencias de minería romana", en *Actas del XV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero*. Logroñán-Cáceres (España), SEDPGYM, 519-542.

- Matías, Roberto; Llamas, Bernardo.** 2018: "Use of LIDAR and photointerpretation to map the water supply at the Las Murias-Los Tallares Roman gold mine (Castrocontrigo, León, Spain)". *Archaeological Prospection*. 25(1), 59-69. <https://doi.org/10.1002/arp.1581>
- Matías, Roberto; Llamas, Bernardo.** 2019: "Analysis Using LIDAR and Photointerpretation of Las Murias-Los Tallares (Castrocontrigo, León-Spain): One of the Biggest Roman Gold Mines to Use the "Peines" System". *Geoheritage*, 11, 381-397. <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0289-9>
- Matías, Roberto; Llamas, Bernardo.** 2021: "Roman Gold Mining at "Las Miédolas" (Las Omañas-León. Spain): LIDAR and photointerpretation in the analysis of "peines" system". *Geoheritage*, 13, 29. <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00555-x>
- Moreno, Isaac.** 2004: "Topografía Romana", en *Elementos de Ingeniería Romana*. Tarragona (España), 157-189.
- Moreno, Isaac.** 2015: "Análisis técnico y constructivo del acueducto romano de Albarracín a Cella", en *Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana. Actas del V Congreso Europeo de las Obras Públicas Romanas*. Córdoba (España), 225-248.
- Pérez-García, Luis Carlos.** 2001: "La mina de oro romana de Las Médulas", en *Patrimonio geológico de Castilla y León*. Madrid (España), ENRESA, 30-55.
- Pérez, Maurilio; Matías, Roberto.** 2008: "Plinio y la minería aurífera romana: nueva traducción e interpretación de Plin. Nat.33.66-78". *Cuadernos de Filología Clásica. Estudios Latinos*, 28(1), 43-58.
- Sáenz, Clemente; Vélez, José.** 1974: *Contribución al estudio de la minería primitiva del oro en el noroeste de España*. Madrid (España), Ediciones Atlas.
- Sánchez-Palencia, Francisco Javier.** 1980: "Prospecciones en las explotaciones auríferas del NO de España (cuencas de los ríos Eria y Cabrera y sierra del Teleno)". *Noticiario Arqueológico Hispánico*, 8, 214-289.
- Sánchez-Palencia, Francisco Javier; Pérez, Luis Carlos.** 2000: "La infraestructura hidráulica: canales y depósitos", en *Las Médulas (León). Un paisaje cultural en la "Asturia Augustana"*. León (España), Instituto Leonés de Cultura, 189-207. <https://doi.org/10.46608/dana9.9782356135377.20>
- Sánchez-Palencia, Francisco Javier; Sastre, Inés.** 2002: "La red hidráulica en las minas romanas de oro del noroeste hispano", en *ARTIFEX Ingeniería Romana en España*. Madrid (España), Museo Arqueológico Nacional, 251-254.
- Weisgerber, Gerd; Willies, Lynn.** 2000: "The use of fire in prehistoric and ancient mining-firesetting". *Paléorient*, 26(2), 131-149. <https://doi.org/10.3406/paleo.2000.4715>