

## ASPECTOS GEOLÓGICOS Y METALOGÉNICOS DE LOS YACIMIENTOS DE MERCURIO DEL DISTRITO DE ALMADÉN (CIUDAD REAL)

Fernando J. Palero Fernández

fjpalero.soyminero@ono.com

### RESUMEN

El distrito minero de Almadén ha sido el mayor centro de producción de Hg en el mundo, destacando en él la Mina de Almadén, que ha sido un claro ejemplo de yacimiento gigante conteniendo una concentración sin parangón de un metal escaso a nivel cortical. Los yacimientos de Almadén aparecen muy restringidos a un sinclinal hercínico en el que aflora una serie muy completa de rocas sedimentarias paleozoicas que comprenden desde el Ordovícico Inferior al Devónico Superior. Esta serie es esencialmente siliciclástica y se formó en un ambiente de plataforma somera. En ella aparecen cuatro unidades litoestratigráficas de ortocuarcitas entre las que destaca la denominada "Cuarcita del Criadero" (Hirnantense-Llandoveriense), por ser en la que encajan principalmente las mineralizaciones. Una peculiaridad de la serie del sinclinal de Almadén es la de contener abundantes rocas volcánicas básicas con términos ultrabásicos. Estas rocas aparecen entre los materiales silúricos y devónicos y se presentan como sills, diques, materiales volcanosedimentarios y diatremas explosivos. Estas últimas están rellenas por unas brechas muy características que se la denomina "Roca Fraileasca". Las rocas volcánicas aparecen en general alteradas por carbonatación y sericitización, que es especialmente fuerte en el caso de las brechas de las diatremas. Desde el punto de vista metalogénico, los yacimientos de Almadén responden a dos tipologías que son: yacimientos estratiformes en la Cuarcita del Criadero; y stockworks a modo de cuerpos irregulares de relleno y reemplazamiento en rocas volcánicas principalmente. La mineralización estratiforme está formada esencialmente por una impregnación y relleno fisural de cinabrio en unos niveles muy concretos de ortocuarcitas situados a muro y techo de la Cuarcita del Criadero. En los stockworks la mineralización está formada por cinabrio y pirita junto con filosilicatos que aparecen relleno de grietas, fisuras y brechas en rocas detríticas y volcánicas, generando también en estas últimas espectaculares reemplazamientos. Los criterios estructurales permiten establecer que los yacimientos estratiformes son precinemáticos, mientras que los stockworks son tardi-cinemáticos respecto a las deformaciones hercínicas. Sobre la formación de estos yacimientos, se establece un modelo por el que los yacimientos estratiformes se habrían formado a favor de importantes accidentes de zócalo que habrían rejugado en varios momentos de la historia geológica de la región de Almadén. Probablemente durante la sedimentación devónica, un accidente que condiciona la forma y geometría del flanco sur del Sinclinal, facilitó el ascenso y circulación de fluidos y volátiles mercuriosos que impregnaron unos horizontes muy concretos de la Cuarcita del Criadero, cuando ésta aun no había sufrido una litificación importante. A favor de estos mismos accidentes se emplazarían posteriormente las diatremas de "Roca Fraileasca". La reactivación de los accidentes de zócalo ante un acortamiento E-O al final de las deformaciones hercínicas, produciría la removilización de los yacimientos estratiformes y la formación de los stockworks en rocas reactivas como serían los materiales volcánicos carbonatizados y afectados por estas deformaciones. El origen de esta cantidad tan descomunal de un metal escaso en un lugar tan concreto como Almadén, es un problema que aún no tiene una explicación satisfactoria. Como complemento en este artículo se realiza una descripción de los cuatro principales yacimientos que han sido explotados en el distrito minero, que son la Mina de Almadén, El Entredicho, Las Cuevas y La Nueva Concepción.

**PALABRAS CLAVE:** Almadén, mercurio, cinabrio, yacimientos gigantes, diatremas, volcanismo Paleozoico.

### ABSTRACT

The Almadén mining district has been the largest Hg production centre in the world, especially the Almadén Mine that has been a clear example of a giant deposit containing an enormous concentration of a scarce metal without comparison at crustal levels. The Hg deposits of Almadén appear restricted to a hercynian syncline, which has a very complete Palaeozoic sedimentary sequence from the Lower Ordovician to Upper Devonian age. This sequence is essentially siliceous-clastic that formed in shallow shelf conditions. There are four litho-stratigraphic units formed by ortho-quartzites, among which we can stress the so-called "Cuarcita del Criadero" (Hirnantian-Llandoverian) as the main host rocks of a mineralization process. A peculiarity of the Almadén syncline sequence is that

it contains abundant basic volcanic rocks with ultrabasic terms. These rocks appear between the Silurian and Devonian materials and appear as sills, dykes, volcano-sedimentary layers and explosive diatremic bodies. These are filled by very characteristic breccias named "Frailesca Rock". The volcanic rocks appear in general altered by carbonatization and sericitization, that are especially strong in the diatremic breccias. From a metallogenic point of view, the Almadén deposits respond to two types: stratiform deposits hosted in "Cuarcita del Criadero"; and stockworks as irregular bodies of landfill and replacement on volcanic rocks mainly. The stratiform mineralization is formed essentially by an impregnation and fissural infilling of cinnabar in very specific ortho-quartzites levels located at the foot and hanging wall of the "Cuarcita del Criadero". In stockworks deposits the mineralization is formed by cinnabar and pyrite and sheet silicates that appear filling up vein, fissures and breccias on detrital and volcanic rocks, and also generating spectacular volcanic replacements. The structural criteria allow us to establish that the stratiform deposits are pre-tectonic, whereas stockworks are tardi-tectonic with respect to the Hercynian deformations. Regarding the formation of these deposits, a model has been proposed by which the stratiform deposits would have been formed in relation to an important crustal accident, which would have affected the geologic history of the Almadén region on several occasions. Probably during the Devonian sedimentation, the crustal accident that would have conditioned the form and geometry of the southern flank of the syncline in the Hercynian folding, facilitated the upward thrust and circulation of mercurial fluids and volatile elements, impregnating specific beds of the "Cuarcita del Criadero", when this stratigraphic level had not yet undergone lithification. This kind of crustal accidents would later lead the diatremic bodies of "Frailesca Rock". The reactivation of the accidents in E-W shortening at the end of the Hercynian deformations, would produce the remobilization from stratiform deposits and the formation of stockworks on reactive rocks such as the volcanic carbonatized materials affected by these deformations too. The origin of such an extraordinary amount of a scarce metal in a specific site as Almadén is a problem that has not yet been explained satisfactorily. As an addition to this paper, a description of the four main deposits that have been mined in the district has been provided. These are the Almadén Mine, El Entredicho, Las Cuevas and La Nueva Concepción.

**KEY WORDS:** Almadén, mercury, quick-silver, cinnabar, giant ore deposits, diatremic bodies, Paleozoic volcanism.

Recibido: 12 de octubre, 2012 • Aceptado: 10 de noviembre, 2012

## INTRODUCCIÓN

El distrito de Almadén contiene la mayor acumulación de recursos de mercurio del mundo. En él, además de diversos indicios y de un yacimiento inexplorado, se han extraído minerales en 6 minas (Almadén, El Entredicho, Las Cuevas, La Vieja Concepción, La Nueva Concepción y Guadalperal) que han supuesto una producción del orden de 270.000 t de Hg (más de 7,5 millones de frascos). Entre ellas destaca La Mina de Almadén que ha sido sin duda un yacimiento excepcional, constituyendo un claro ejemplo de lo que en metalogenia se califica como Criadero Gigante (Giant Ore Deposits). Del total de frascos extraídos en el distrito, cerca de 7 millones han estado contenidos en esta gran mina. Es más, no resulta atrevido decir que este yacimiento será un caso irrepetible en la corteza terrestre. La excepcionalidad a escala mundial de este distrito minero, y en particular del yacimiento gigante de Almadén, radica en el enorme proceso de concentración que ha supuesto esta ingente acumulación de mercurio, cuyo contenido medio a nivel cortical es muy bajo, del orden de 0,5 ppm. Tanto es así que Almadén representa más del 35% de los recursos de Hg explotados y existentes que se conocen (21 millones de frascos), con leyes muy superiores a los de los otros grandes yacimientos del mundo (Idria, Monte Amiatta, Mc Dermitt, Huancavelica, etc.). Además los yacimientos de la comarca manchega se presentan en un contexto geológico y con unos caracteres metalogénicos muy diferentes al resto de depósitos

mercuríferos del mundo, lo que hace de ellos un caso único y que conduce a hablar del modelo Almadén.

Otro aspecto particular del distrito de Almadén ha sido su longeva historia. Pocas explotaciones en el planeta pueden presentar un historial de unos 2.000 años de actividad casi ininterrumpida. Esto ha hecho que en estas minas se hayan ido usando metodologías extractivas que han evolucionando junto con el avance de los conocimientos en las técnicas de laboreo. Algunas de estas técnicas han sido específicas de Almadén y han estado accesibles en distintas partes de la mina, pero desgraciadamente, tras la clausura definitiva, muchas de estas labores se han perdido para siempre. Lo que hoy en día se puede ver en el Parque Minero de Almadén y en otros restos mineros de la comarca, es una mínima e incompleta expresión de todo lo que ha representado este distrito en el ámbito minero español. Antes del cierre de las labores mineras era posible reconocer una evolución prácticamente completa de los métodos de explotación de, al menos, los últimos 300 años.

Pero los yacimientos de Almadén no sólo ofrecían los maravillosos y bien conservados ejemplos de los métodos de laboreo, sino que también mostraban una geología espectacular. Efectivamente en las galerías y cortas se exponía un verdadero tratado de geología, con elementos únicos y ejemplos excepcionales en diversas especialidades como estratigrafía, tectónica, vulcanismo y, evidentemente, metalogenia. Con este artículo se pretende dar una visión más actualizada del conoci-

miento geológico de estos yacimientos y advertir sobre la relevancia de las singularidades que estos yacimientos representan a nivel mundial.

### ENCUADRE GEOLÓGICO DEL DISTRITO MINERO DE ALMADÉN

Desde el punto de vista geológico el distrito minero de Almadén se sitúa en el Escudo Hercínico Ibérico, cerca del borde meridional de la Zona Centroibérica, de Julivert *et al.* (1972). Dentro de tan amplia zona, quedaría dentro del denominado dominio de los pliegues verticales definido por Díez Balda *et al.* (1991).

La geología regional del entorno de Almadén se caracteriza por una sucesión de grandes pliegues de plano axial subvertical de rumbo general ONO-ESE. La macroestructura general viene definida por una unidad litoestratigráfica de ortocuarcitas denominada Cuarcita Armoricana, de edad Arenigiense. Uno de los macropliegues de esta región es el llamado Sinclinal de Almadén, estructura que alberga la totalidad de indicios y mineralizaciones de Hg del distrito.

La sucesión de rocas que forman estas estructuras de plegamiento en el entorno de Almadén, así como los procesos deformativos que han sufrido, aparecen comentados en detalle en Palero y Lorenzo (2008). A grandes rasgos la secuencia sedimentaria está formada por dos grandes conjuntos sedimentarios siliciclásticos, uno de edad Precámbrico Terminal (Vendiense), y otro Paleozoico de edades Ordovícico Inferior a Carbonífero Inferior. El primero de ellos aparece en los anticlinales mientras que el segundo lo hace en los sinclinales.

La estructura geológica de la región se debe principalmente a las deformaciones hercínicas, pero además se reconocen algunos episodios tectónicos pre-ordovícicos y algunas evidencias de movimientos recientes. La tectónica pre-ordovícica se manifiesta por una discordancia intra-precámbrica y otra que pone en contacto el Paleozoico sobre el Precámbrico. La primera de estas discordancias supone una deformación por plegamiento de edad Vendiense. La segunda probablemente tiene lugar en el Cámbrico Superior, ya que parece ser que la disposición de las unidades clásicas de esa edad al Norte de Almadén, en los Montes de Toledo, estaría controlada por accidentes semejantes reconocidos en el distrito mercurífero (Ortega *et al.*, 1988).

La secuencia paleozoica se forma en condiciones de aparente tranquilidad y solo se reconocen ciertos lapsos sedimentarios en el Asghilliense Medio y, más importante, en el Devónico Medio. La sedimentación devónica se produce en dos pulsos y tiene lugar en zonas restringidas con fuerte subsidencia, que en el caso de Almadén además está acompañada de fuerte actividad volcánica. A comienzos del Carbonífero se produce una zona con gran subsidencia al sur de Almadén, acumulándose un

gran espesor de sedimentos en un corto periodo de tiempo.

Seguramente a comienzos del Westfaliense se inicia la orogénesis hercínica en la región. Se trató de una deformación en 2 fases, de las cuales la 1ª es la principal (Roiz, 1979; Ortega, 1988). La primera fase se produce por un acortamiento aproximadamente N-S que genera los pliegues y las macroestructuras principales, así como una incipiente esquistosidad (S1) de plano axial. Esta fase tiene un carácter generalizado en la zona. Probablemente en el Estefaniense tiene lugar la segunda fase, tratándose en este caso de una deformación heterogénea producida por un acortamiento E-O. Produce una tectónica de ejes cruzados, generando figuras de interferencia en domos y cubetas con los pliegues de 1ª fase. No obstante, como principales estructuras genera bandas de cizalla esencialmente frágiles, de las cuales las de rumbo NO-SE con desplazamiento levógiro predominan sobre las conjugadas dexas NE-SO. De forma local se genera una incipiente esquistosidad (S2) que es transecta a los pliegues de 1ª fase.

En relación con las deformaciones hercínicas tiene lugar un plutonismo que en la comarca de Almadén y alrededores tiene su reflejo en los "stocks" de Fontanosas y Garlitos, situados al Este y al Oeste respectivamente, y en el gran batolito de los Pedroches, que ocupa una amplia banda ONO-ESE al Sur de Almadén. Este magmatismo presenta dos facies de granitoides emplazadas en distintos momentos, que corresponden a granodioritas y monzogranitos. Las más antiguas son las primeras que forman la totalidad del stock de Fontanosas, gran parte del stock de Garlitos y parte del batolito de los Pedroches. Su emplazamiento tiene lugar en el periodo de interfase entre las dos fases deformativas hercínicas (Coupez *et al.*, 1988), ya que estas rocas cortan a los pliegues de F1, pero muestran una importante fracturación relacionada con el acortamiento E-O. Los monzogranitos porfídicos intruyen a las granodioritas y aparecen solamente en el batolito de los Pedroches (Donaire y Pascual, 1992). Su emplazamiento es claramente posterior a la 2ª fase hercínica.

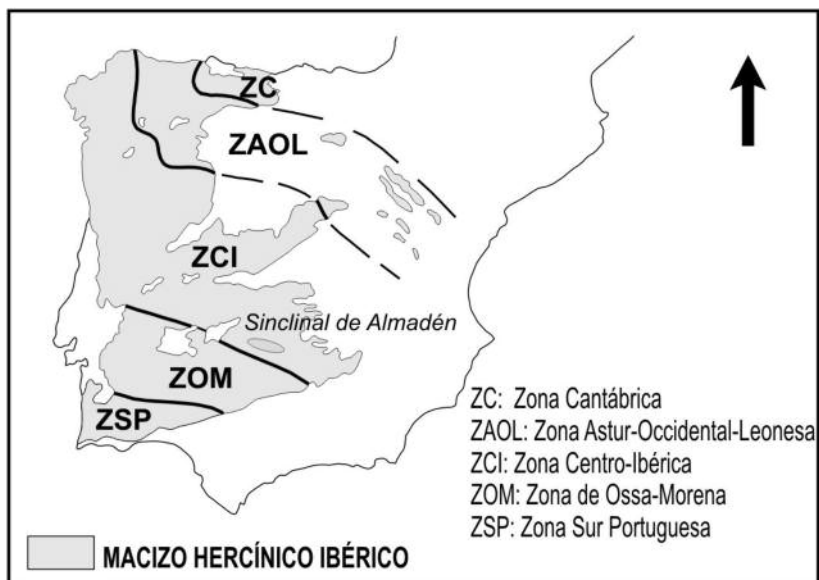


Figura 1. Situación del Sinclinal de Almadén en el macizo Hercínico Ibérico.

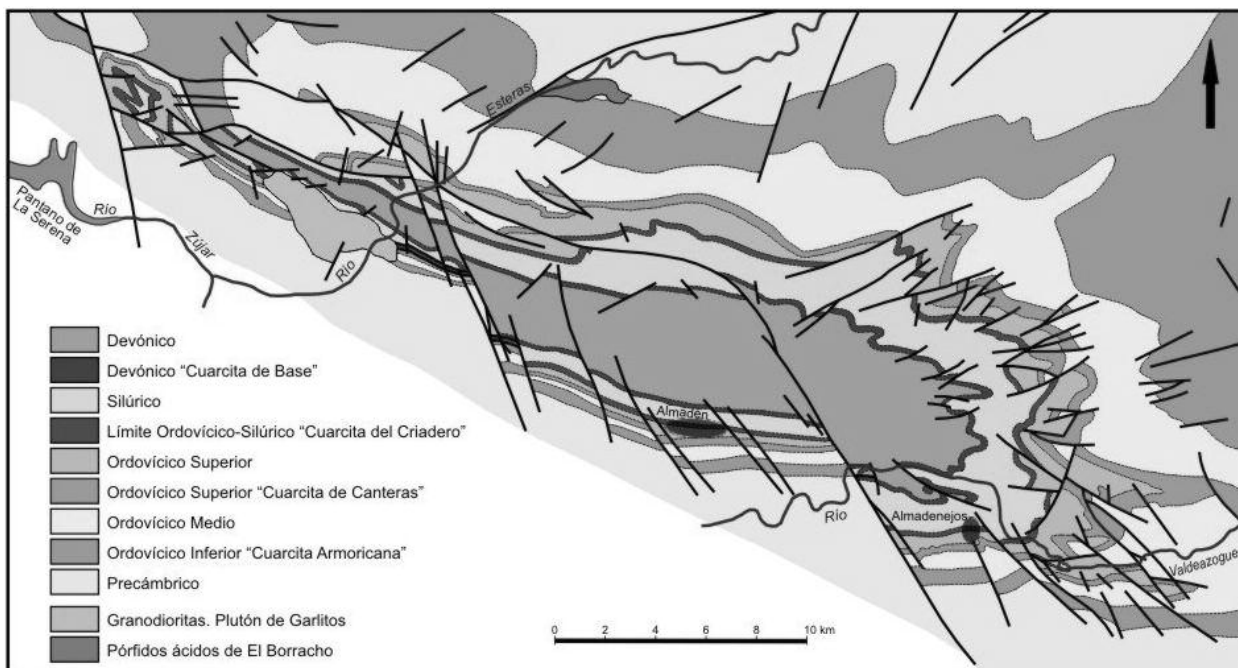


Figura 2. Esquema geológico del sinclinal de Almadén. Síntesis basada en García San Segundo *et al.* (1987a), Lorenzo Álvarez *et al.* (2005), García San Segundo *et al.* (1987b) y Molina Cámara *et al.* (1987).

Después de las deformaciones hercínicas se reconocen algunas estructuras, principalmente fracturas y reactivaciones de fallas ya generadas, con movimientos hasta en tiempos recientes. Prueba de ello es la actividad volcánica basáltica plioceno-cuaternaria del Campo de Calatrava (Gallardo *et al.*, 1998), con numerosas manifestaciones a pocos kilómetros al Este del distrito minero, rejuegos que no deben quedar ajenos a la comarca de Almadén.

### GEOLOGÍA DEL SINCLINAL DE ALMADÉN

El Sinclinal de Almadén es una macroestructura alargada orientada ONO-ESE, con unos 25 Km. de largo y 10 Km. de anchura máxima (Fig. 2). Tiene forma de cubeta alargada asimétrica, con el flanco sur verticalizado mientras que el norte presenta suaves buzamientos. Este es un hecho llamativo y peculiar de este macropliegue, pues la estructuración regional muestra una ligera vergencia al Sur.

Las rocas que aparecen en el sinclinal son esencialmente detríticas y pertenecen al Paleozoico Inferior, presentando una de las secuencias más completas de la serie Ordovícico Inferior-Devónico Superior que se puedan encontrar en la Zona Centroibérica. Las estructuras sedimentarias y los caracteres de la secuencia muestran un medio sedimentario de plataforma siliciclástica con variaciones del nivel de mar. Estos cambios se hacen notar en los diferentes tipos de aportes sedimentarios, pudiéndose diferenciar una serie de unidades litoestratigráficas en función del predominio de algunos de los tres términos litológicos comunes, que son las ortocuarcitas, las areniscas y las pizarras negras. A este respecto destacan 4 unidades de ortocuarcitas que tienen una gran continuidad y que sirven de referencia para establecer la estructura geológica general del sinclinal (Almela *et al.*, 1962; García Sansegundo *et al.*, 1987). Estos niveles son, de muro a techo, los siguientes (Fig. 3): Cuarcita Armoricana (Arenigiense), Cuarcita de Can-

teras (Caradociense), Cuarcita del Criadero (Hirnantien-se-Llandoveryense) y Cuarcita de Base (Gediniense-Siegeniense).

Entre estas unidades litoestratigráficas aparecen alternancias arenoso-pizarrosas y también abundantes materiales volcánicos y subvolcánicos, especialmente en la secuencia sedimentaria por encima de la Cuarcita del Criadero. Estos materiales ígneos son mayoritariamente de composición básica (basaltos alcalinos), pero también se encuentran términos ultrabásicos, intermedios y ácidos. Estas rocas se encuentran formando bien cuerpos intrusivos, tanto en diques como "sills"; bien en cuerpos diatrémicos, principalmente tobas explosivas; o bien como capas volcano-sedimentarias bien estratificadas. De forma general se puede decir que en la secuencia silúrica predominan los materiales de carácter intrusivo, mientras que en la devónica predominan los materiales volcanosedimentarios. Los cuerpos de tobas explosivas aparecen actualmente limitados por fallas,



Figura 3. Trazo de las unidades de cuarcitas en el flanco meridional del Sinclinal de Almadén.



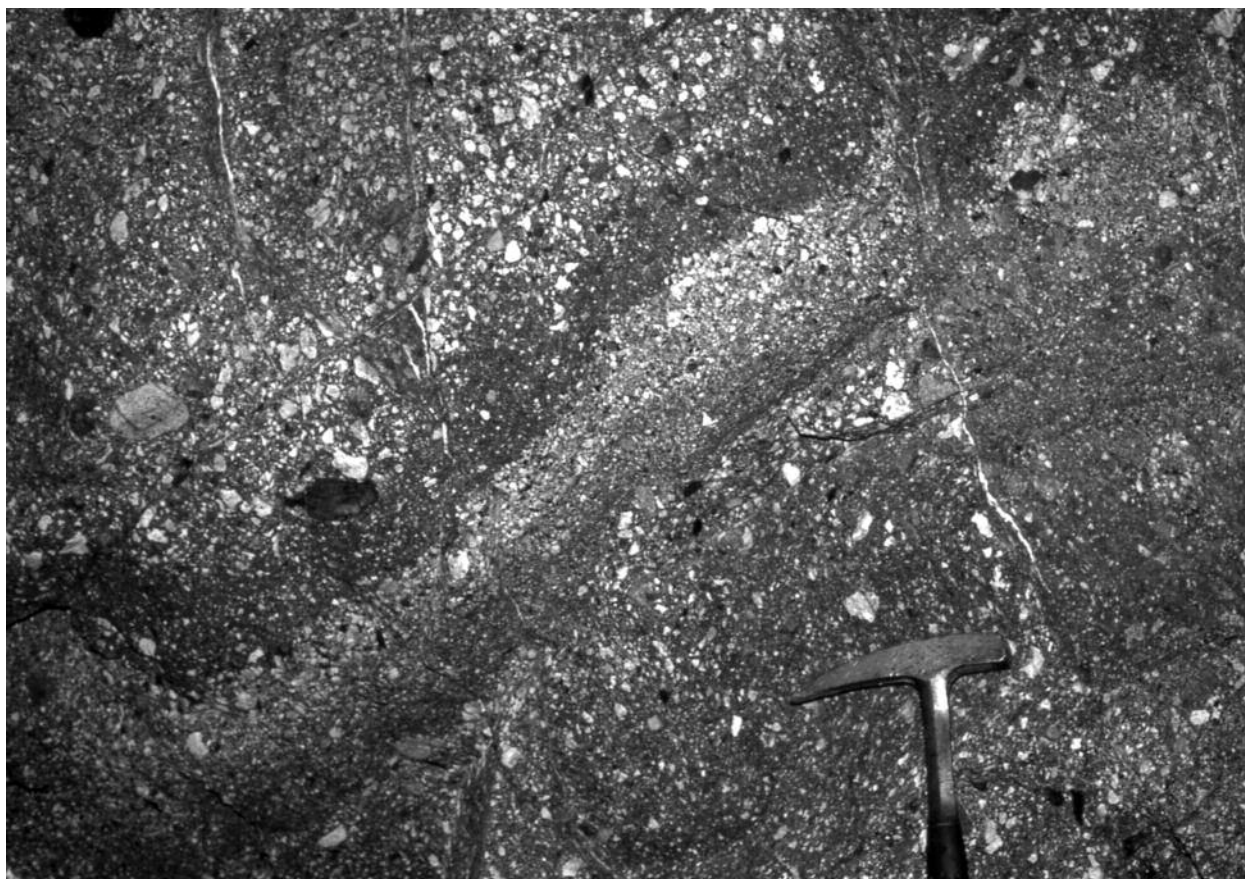


Figura 4. Aspecto de la "Roca Frailesca" en la planta 5ª de la mina de Almadén. Se puede apreciar que es una toba volcánica heterolítica con fragmentos angulosos y con una cierta ordenación a modo de *bedding*.

por lo que no es posible saber las relaciones temporales originales de contacto con las rocas encajantes. No obstante, hay que señalar que los casos conocidos de éstos materiales aparecen hoy día entre rocas silúricas y devónicas. Estas tobas son muy características del sinclinal de Almadén y reciben el nombre de "Roca Frailesca".

La "Roca Frailesca" está formada mayoritariamente por material volcánico, tanto en los fragmentos como en la matriz, aunque también contiene trozos de pizarras negras y cuarcitas. El material volcánico es de composición basáltica y también hay fragmentos de rocas ultramáficas. Como característica presenta una fortísima carbonatización y sericitización, tanto es así que en láminas delgadas únicamente se observa una masa de carbonato ankerítico y sericita, y solo en ciertos fragmentos volcánicos se conservan relictos de su mineralogía original. Normalmente se presenta con un aspecto tobáceo masivo, pero en ciertas zonas tiene una cierta ordenación ("bedding"), sin que suponga una verdadera estratificación (Fig. 4). El significado de esta roca tan peculiar ha ido variando desde que se describió por primera vez, interpretándose actualmente como cuerpos diatrémicos a partir de los últimos trabajos de investigación que realizó el Servicio de Geología de MAYASA. Este tipo de estructuras volcánicas explosivas son un caso excepcional en el contexto del dominio hercínico de la Península Ibérica y de Europa.

La estructuración geológica del sinclinal de Almadén se debe a la superposición de las diferentes deformaciones hercínicas y post-hercínicas.

Los pliegues de la primera fase se forman a todas las escalas y se generan por un proceso de "buckling" casi perfecto. Son pliegues de geometría cilíndrica, ejes subhorizontales ONO-ESE y planos axiales subverticales. Esta deformación no lleva asociado un aplastamiento apreciable, siendo muy incipiente el desarrollo de esquistosidad, que no llega a ser más que una "slaty-cleavage" visible sólo en las pizarras. El metamorfismo está prácticamente ausente y solamente ciertas rocas volcánicas básicas llegan a dar minerales neoformados en las facies de las ceolitas (Saupé, 1973; Higuera *et al.*, 1995).

La segunda fase se manifiesta principalmente por fracturas de desgarre, que afectan de forma desigual a distintas zonas del sinclinal. Estas fracturas son de fuerte buzamiento, longitudinales a la estructura general del sinclinal, con rumbo ONO-ESE a NO-SE y componente levógira. Producen frecuentes cuñas tectónicas y pliegues de eje vertical. Muchas veces estas estructuras no resultan evidentes a escala cartográfica, y en muchas zonas del sinclinal, que aparentemente no están afectadas por ellas, cuando se realizan estudios de detalle se pone de manifiesto una estructuración geológica muy compleja. Esto ocurre, por ejemplo, a lo largo del flanco Sur del sinclinal, donde las cartografías geológicas no reflejan lo realmente complicado de la estructura. Tanto es así que cuando se realizan sondeos de investigación sobre una teórica corrida continua de la Cuarcita del Criadero, aparecen sorpresas de todo tipo, que van desde la desaparición de la unidad a duplicaciones de la cuarcita, hechos que son inapreciables en superfi-

cie. A la macroescala la segunda fase también tiene manifestaciones dúctiles, provocando distorsiones en los ejes de los pliegues de 1ª fase y produciendo geometrías cónicas por efecto de interferencia de plegamiento.

La actividad volcánica en el sinclinal parece estar producida en 2 pulsos. El primero sería el correspondiente a la "Roca Frailesca", o lo que es lo mismo, un primer episodio volcánico explosivo, de composición basáltica, generador de las diatremas. En estrecha relación con las tobas volcánicas aparecen una red de diques y "sills" que como peculiaridad contienen enclaves de rocas ultramáficas. Fragmentos de estos materiales, caracterizados por la presencia de fuchsita (filosilicato con cromo), aparecen también incorporados en la "Roca Frailesca". Los diques y "sills" muestran muchas veces estructuras peperíticas, en especial cuando encajan en pizarras negras, señal de que su emplazamiento tiene lugar cuando los sedimentos tienen aun importantes cantidades de agua. Estas rocas presentan la fuerte carbonatización y sericitización característica de estas rocas, a las que se superponen otras relacionadas con las deformaciones y con procesos hidrotermales. Hall *et al.* (1997) realizaron dataciones Ar/Ar en illitas procedentes de la alteración de estas rocas, aportando una edad entorno a los 360 Ma. También analizaron muestras de fuchsita, dando estas un rango de edades más amplio entre los 365 y 427 Ma. Si bien estos filosilicatos pueden haberse formado en varios eventos ocurridos desde el emplazamiento de estas rocas, estos datos son relevantes y pueden dar idea de cuando se han formado.

El segundo pulso volcánico viene representado por el emplazamiento de rocas básicas cuyo término más característico son cuarzo-diabasas. Estas rocas aparecen principalmente en cuerpos intrusivos dispuestos de forma alargada, siguiendo la estructuración general del sinclinal. Presentan claras relaciones de intrusión en la "Roca Frailesca", lo que muestra su carácter posterior a ella. Han sufrido alteraciones de desigual grado, consistentes en propilitización y cloritización. En relación con fallas sufren silicificaciones.

Los materiales volcanosedimentarios, abundantes en la secuencia silúrico-devónica, resultan difíciles de precisar a que episodio volcánico corresponden. El carácter habitual de tobas heterolíticas impide precisar su origen, mas aún teniendo en cuenta que hay claras evidencias de material retrabajado. Comúnmente aparecen carbonatizados y sericitizados, aunque con desigual grado.

En el núcleo del Sinclinal de Almadén se encuentran rocas intermedias y ácidas de forma esporádica. Estos materiales reflejan una clara evolución del vulcanismo a términos más ácidos y hoy día no se puede asegurar si representan un tercer pulso volcánico independiente o las últimas manifestaciones del 2º pulso ya comentado.

Las manifestaciones de plutonismo hercínico en el Sinclinal son los plutones de Fontanosas y Garlitos, comentados anteriormente. Se trata de pequeños plutones alóctonos granodioríticos, que generan una aureola de metamorfismo término de anchura hectométrica. Las

granodioritas del plutón de Fontanosas están datadas por método de K-Ar, dando una edad de 302 Ma (Saupé, 1973; Leutwein *et al.*, 1970).

## METALOGENIA

La ingente producción de Hg del distrito de Almadén ha procedido sólo de las 6 minas mencionadas al comienzo, destacando entre todas la Mina de Almadén. Además de estas minas hay del orden de una docena de indicios y registros mineros, así como el depósito inexplorado del Nuevo Entredicho, encontrado a finales de la década de los 80.

La gran mayoría de minas y manifestaciones mercuríferas se hallan en el flanco meridional del Sinclinal de Almadén, concretamente en la zona central y oriental (Fig. 5). Todas las manifestaciones de mineral conocidas responden a dos tipologías distintas, que se pueden definir con los términos de yacimientos estratiformes y yacimientos "stockworks" y vetas. Los primeros son lo más grandes, siendo los ejemplos representativos las minas de Almadén, El Entredicho y Vieja Concepción. Los segundos son de dimensiones más reducidas, pero en compensación presentan generalmente leyes más altas, siendo ejemplos destacados las minas Nueva Concepción, Las Cuevas y el depósito inexplorado Nuevo Entredicho.

Los yacimientos estratiformes encajan exclusivamente en la unidad de ortocuarzitas del límite Ordovícico-Silúrico llamada Cuarzita del Criadero, de edad Hirnantense-Aeroniense (Villas *et al.*, 1999). La mineralización aparece como impregnación y/o relleno fisural de unos niveles de ortocuarzitas muy concretos (Fig. 6), situados uno a muro y otros dos a techo de la unidad litoestratigráfica. La paragénesis es muy simple, estando constituida por cinabrio como mineral mayoritario que se acompaña de pequeñas cantidades de pirita y mercurio nativo. Prácticamente a nivel de trazas hay cuarzo, dolomita-ankerita, barita y siderita, presentándose estos minerales con un carácter tardío, junto con pequeños cristales de cinabrio y pirita. Estos minerales minoritarios se hallan en fracturas que cortan a los paquetes cuarcíticos mineralizados. En general no parece que haya una alteración característica en las rocas encajantes de estas mineralizaciones, salvo una ligera recristalización de la sílice contenida en la roca y de una cierta "cinabrización".

Los yacimientos de tipo "stockworks" y vetas encajan en rocas de diferentes edades pero muestran una acentuada afinidad litológica hacia los materiales volcánicos. También aparecen mineralizaciones de este tipo en rocas detríticas, pero siempre se hallan de forma subordinada y en la inmediatez de rocas volcánicas. La paragénesis es algo más variada que en la otra tipología, con cinabrio y pirita como minerales mayoritarios, acompañados de mercurio nativo, pirofilita, caolinita, sericita, ankerita y cuarzo. También se encuentra el conjunto más tardío de barita, siderita, dolomita-ankerita, calcopirita, pirita y cinabrio cristalizado, que es anecdótica al igual que en el caso anterior. La mineralización aparece rellenando venas y produciendo reem-



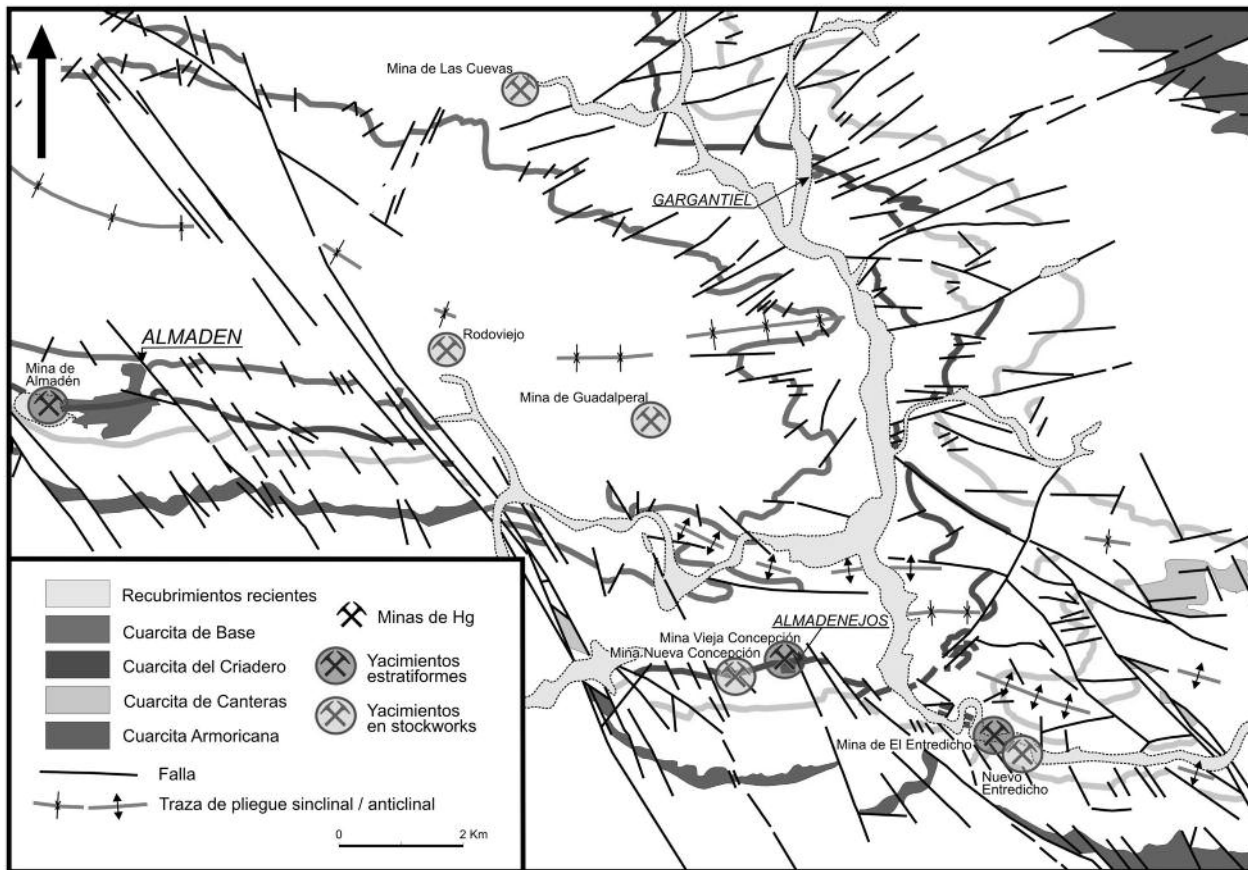


Figura 5. Principales minas de Hg en el Sinclinal de Almadén.



Figura 6. Mineralización estratiforme de cinabrio del Banco de San Pedro de la Mina de Almadén.

plazamientos de las rocas encajantes (Fig. 7). En materiales detríticos sólo se dan los rellenos, mientras que en las rocas volcánicas se dan los dos tipos de mineralización, apreciándose que ambos están íntimamente relacionados. Esto es evidente ya que el grado de reemplazamiento aumenta en la cercanía de la vena de cinabrio. Las texturas de relleno y reemplazamiento permite establecer una secuencia de cristalización para la mineralización principal de: Pirita → pirofilita+caolinita → cuarzo → cinabrio.

En relación con estas mineralizaciones hay una fuerte alteración argílico-sericitica que afecta a las rocas volcánicas (Higueras, 1995), la cual se superpone a la carbonatización y sericitización que ya tienen estas rocas. Esta alteración engloba a las alteraciones que propiamente tienen los cuerpos mineralizados que están argilizados, piritizados y "cinabrizados".

Las temporalidad entre ambos tipos de yacimientos se pueden establecer en base a las relaciones que hay entre mineralizaciones y deformaciones hercínicas. Efectivamente, se puede apreciar que los cuerpos mineralizados estratiformes están plegados, cortados y cizallados por las estructuras producidas en dicho evento orogénico. Por contra, las venas rellenas de cinabrio características de las mineralizaciones en "stockworks", aparecen cortando a las foliaciones hercínicas. Además, siendo el cinabrio un mineral muy dúctil, en estos yacimientos este sulfuro no muestra muchas señales deformativas y, desde luego, en mucho menor grado que el que tienen las rocas encajantes. Todas las texturas y relaciones de la mineralización con los materiales encajantes sugieren que su emplazamiento tiene lugar en condiciones ligeramente sin-cinemáticas o tardi-cine-

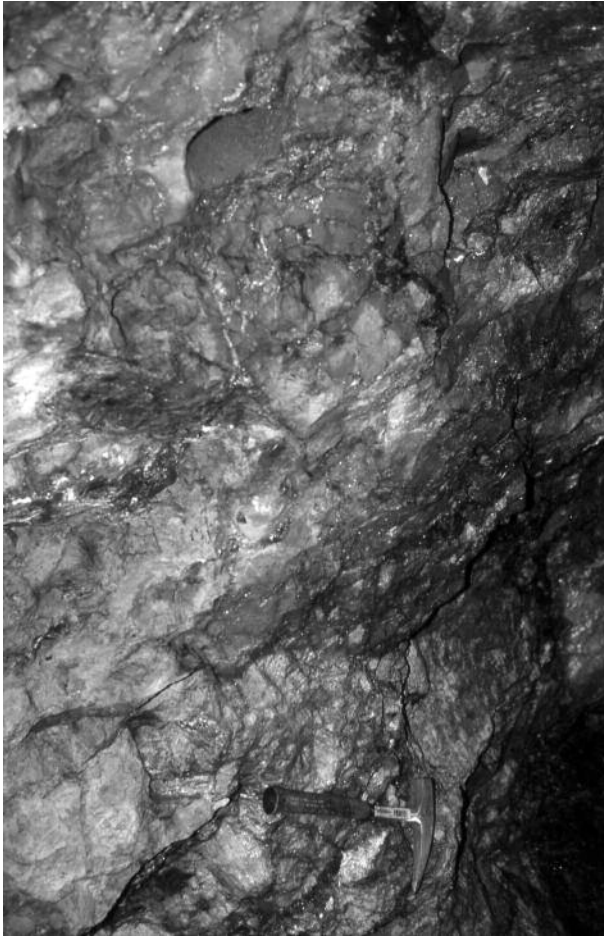


Figura 7. Mineralización de reemplazamiento de cinabrio del Macizo de Poniente de la Mina de Las Cuevas.

máticas respecto al acortamiento E-O de 2ª fase hercínica. Con las claras relaciones comentadas, resulta evidente que las mineralizaciones estratiformes son más antiguas que las mineralizaciones en "stockworks", pudiéndose considerar a las primeras como primarias y a las segundas como epigenéticas.

Respecto al vulcanismo sinsedimentario, las mineralizaciones estratiformes muestran un claro carácter precoz. Efectivamente, en la mina de El Entredicho se puede ver con claridad como un sill con enclaves ultramáficos relacionado con la "Roca Frailesca", está en contacto con el paquete cuarcítico mineralizado, produciendo sobre él una zona de "metamorfismo térmico" con la consecuente movilización del cinabrio y recristalización de la cuarcita por efecto del calor de la roca ígnea. Las mineralizaciones en "stockworks" son evidentemente post-vulcanismo, ya que arman en rocas volcánicas y producen sobre ellas una serie de alteraciones que las afectan una vez consolidadas.

El origen de estas mineralizaciones mercuríferas de Almadén es un misterio que aun hoy día continúa siendo difícil dar una respuesta satisfactoria. Las mineralizaciones en "stockworks" se pueden interpretar como removilizaciones de mineralizaciones estratiformes durante la actividad de las cizallas frágiles de la 2ª fase hercínica. La paragénesis de estos yacimientos parece indicar que esa removilización se habría efectuado en un medio hidrotermal ácido, habiéndose comportado las rocas volcánicas tectonizadas y carbonatizadas como elementos reactivos fijadores de la mineralización.

Pero la pregunta que surge es evidente: ¿De dónde, cuando y como se ha podido dar tal acumulación de un metal escaso en un lugar tan puntual como el distrito de Almadén? Desde hace tiempo se ha tenido en cuenta la coincidencia espacial de mineralizaciones con la "Roca Frailesca", estableciéndose por ello una relación causa-efecto entre vulcanismo y proceso mineralizador (Almela *et al.*, 1962; Saupé, 1973, 1990; Hernández, 1984; Ortega y Hernández, 1992). Sobre esta idea se ha trabajado siempre y se ha tenido como criterio básico de exploración, siendo los lugares seleccionados para la investigación aquellos en los que las tobas volcánicas estaban en contacto con la Cuarcita del Criadero. Esta relación es clara, pero la evolución en el conocimiento de la geología de los yacimientos ha permitido ver con claridad que las diatremas de "Roca Frailesca" y mineralizaciones estratiformes ambas son consecuencia de un mismo proceso geológico y no una consecuencia de otro. Otro hecho geológico importante, que hasta no hace mucho tiempo no se había tenido en cuenta, es la importante tectónica longitudinal relacionada con la 2ª fase hercínica que afecta a los yacimientos.

Con estas evidencias geológicas y situando los yacimientos en el contexto geológico regional, se ve que están en un flanco verticalizado, que es anormal con relación a la vergencia habitual en la región, lo cual debe estar condicionado por un importante accidente de zócalo de rumbo cercano a ONO-ESE y que condiciona seguramente la forma del sinclinal al haber producido una especie de cubeta subsidente durante el Silúrico y el Devónico. Este accidente probablemente sea heredado de la tectónica de bloques pre-ordovícica, reactivado como falla normal durante la sedimentación en esos periodos, que actuó a modo de escalón estructural en el plegamiento hercínico y que se reactivó como desgarre levógiro en el acortamiento E-O de la 2ª fase hercínica.

A favor de ese accidente de zócalo se habrían canalizado los fluidos mineralizantes que impregnaron ciertos niveles permeables, por alguna razón también fijadores del mineral, en la "Cuarcita de Criadero". Esto tuvo que ocurrir seguramente cuando estos sedimentos aún no tenían una litificación importante. Posteriormente se habrían emplazado los cuerpos diatrémicos a favor del mismo accidente, de ahí la coincidencia espacial de cuerpos mineralizados y la "Roca Frailesca". Se desconoce el momento de formación de las diatremas y si se produce en uno o varios estadios, pero dada la uniformidad textural y composicional de esta peculiar roca y que llegan a encontrarse encajadas hasta entre rocas del Devónico Superior, es muy probable que se emplazaran en un único evento durante ese periodo. Las dataciones sobre illitas realizadas por Hall *et al.* (1997), que dan la edad en torno a 360 Ma, apuntan también esta posibilidad, aunque una edad algo más joven de lo esperado. Pero por el contrario, las edades obtenidas para la fuschita apuntarían a varios episodios de emplazamiento. Hay que señalar que, mientras entre las rocas sedimentarias silúricas aparecen metidas rocas subvolcánicas de



carácter intrusivo, en la secuencia devónica se encuentran tanto estas como abundantes materiales volcanosedimentarios. La reactivación del accidente durante las deformaciones hercínicas produjo primero la verticalización del flanco meridional del sinclinal, y con ello la de los cuerpos mineralizados, para después cizallarlos y fracturarlos, y producir las removilizaciones que dieron lugar a los yacimientos en "stockworks".

Si bien este modelo de formación parece bastante congruente con todas las evidencias geológicas encontradas, hay que intentar buscar también una respuesta satisfactoria a de dónde procede tal cantidad de un metal escaso. Para ello, haciendo correlaciones con otros yacimientos de mercurio del mundo, las mineralizaciones de Almadén son realmente peculiares y no encajan con las paragénesis que hay ampliamente extendidas. Se pueden considerar dos asociaciones típicas para este metal que corresponden a la As-Sb-Hg y a la Au-Ag-As-Hg. La primera es característica de yacimientos asociados a rocas carbonatadas, mientras que la segunda se relaciona con los yacimientos epitermales en rocas volcánicas. En el caso de Almadén no hay coincidencias con estos modelos ampliamente distribuidos por el planeta, siendo la característica principal aquí precisamente la ausencia de otras sustancias acompañando al Hg. Ni siquiera a nivel de trazas los contenidos en otros metales son significativos. Las rocas encajantes son también distintas y las relaciones con rocas volcánicas son muy diferentes a las de los yacimientos epitermales clásicos. Por ello se habla del modelo Almadén. Es decir, que hay unos hechos particulares en la historia geológica de Almadén que no se dan en otros distritos mercuríferos y que son los que han dado lugar a tal acumulación del metal líquido.

Sin duda alguna se puede pensar que el hecho relevante con el que tenga algo que ver esta acumulación de Hg es el vulcanismo silúrico-devónico, tan particular y concreto en el Sinclinal de Almadén. A este respecto se plantean dos hipótesis:

- Una en la que se piensa que hay una pre-concentración de Hg en el medio sedimentario, especialmente en las pizarras negras, y una reconcentración posterior por efecto de la actividad volcánica (Saupé, 1973, 1990).
- La otra en la que se opina que el mercurio tiene un origen profundo, probablemente mantélico, en relación con las evidencias petrológicas de los materiales volcánicos de composición básica y ultrabásica (Ortega y Hernández, 1992; Higuera *et al.*, 2000a).

La idea de la pre-concentración en el medio marino está apoyada en el alto fondo geoquímico en Hg que presentan las abundantes pizarras negras paleozoicas. Saupé (*op.cit.*) establece este fondo en 2 ppm y pone en evidencia la abundancia de manifestaciones mercuríferas en toda la Península Ibérica, que aunque aparecen en distintos ambientes, las relaciona con las unidades de pizarras negras omnipresentes. En contra de esta hipótesis se puede argumentar el ingente volumen de pizarras negras que habría que lixiviar para obtener la

cantidad necesaria para formar un yacimiento tan desconocido como Almadén. Es difícil imaginar un proceso tan extenso que sea capaz de dar lugar a un depósito tan grande en un lugar tan concreto.

La hipótesis sobre un origen profundo de la mineralización se basa en la presencia de las rocas ultrabásicas espacialmente relacionadas con los yacimientos y que son singulares del Sinclinal de Almadén. Estas rocas, aunque aparecen en general muy alteradas, conservan relictos de espinelas cromíferas y otros minerales que indican un origen astenosférico con valores de fusión parcial bajos (Higuera *et al.*, 2000a, 2000b). Se piensa que una concentración previa de volátiles enriquecidos en Hg en el manto superior sería la fuente del metal de estos yacimientos. Un ascenso rápido a favor de los accidentes de zócalo como frente de volátiles previo a la entrada de los magmas básicos y ultrabásicos, habría sido lo que formó los yacimientos estratiformes en niveles corticales muy superficiales, en unos tramos permeables muy concretos de la secuencia sedimentaria. Contra esta hipótesis se puede decir que las rocas básicas en general presentan un fondo geoquímico en Hg muy bajo y que resulta muy complicado pensar como se puede formar una anomalía en Hg tan grande y tan puntual en el manto superior y estar tan limitada en el tiempo como es lo que ocurre en Almadén.

Los datos físico-químicos que van apareciendo publicados hasta ahora no han apartado ninguna evidencia concluyente sobre el origen de las mineralizaciones y, lejos de ello, permiten hacer interpretaciones adecuadas para soportar una u otra hipótesis. Por ejemplo, los datos de  $\delta^{34}\text{S}$  en el yacimiento de Almadén dan rangos de valores distintos en cada uno de los cuerpos mineralizados, cuando la apariencia de la mineralización es muy semejante en todos ellos (Rytuba *et al.*, 1989; Saupé y Arnold, 1992; Jébrak *et al.*, 2002; Higuera *et al.*, 2005). Más datos a este respecto y nuevas interpretaciones son necesarios para poder tomar partido por alguna de estas hipótesis o incluso dar lugar a nuevos modelos de formación.

## LA MINA DE ALMADÉN

La mina de Almadén ha sido con mucho el mayor yacimiento de mercurio del mundo. Su explotación se ha extendido a lo largo de unos 2.000 años, aunque a gran escala la actividad minera se ha realizado desde mediados del siglo XVI hasta finales del siglo XX. El cierre definitivo tuvo lugar en noviembre de 2002, tras la paralización de los trabajos mineros en junio de 2001.

El yacimiento es el situado más a poniente de la banda de manifestaciones mercuríferas del flanco sur del Sinclinal de Almadén (Fig. 5). La estructura del yacimiento de Almadén viene marcada por una disposición verticalizada de los cuerpos mineralizados, que alcanzaron una profundidad de algo más de 600 m. Se puede decir que el yacimiento se encontraba casi completo cuando comenzaron los trabajos mineros, ya que los afloramientos debían restringirse a una zona muy concreta en lo que luego ha sido la parte occidental de la explotación.

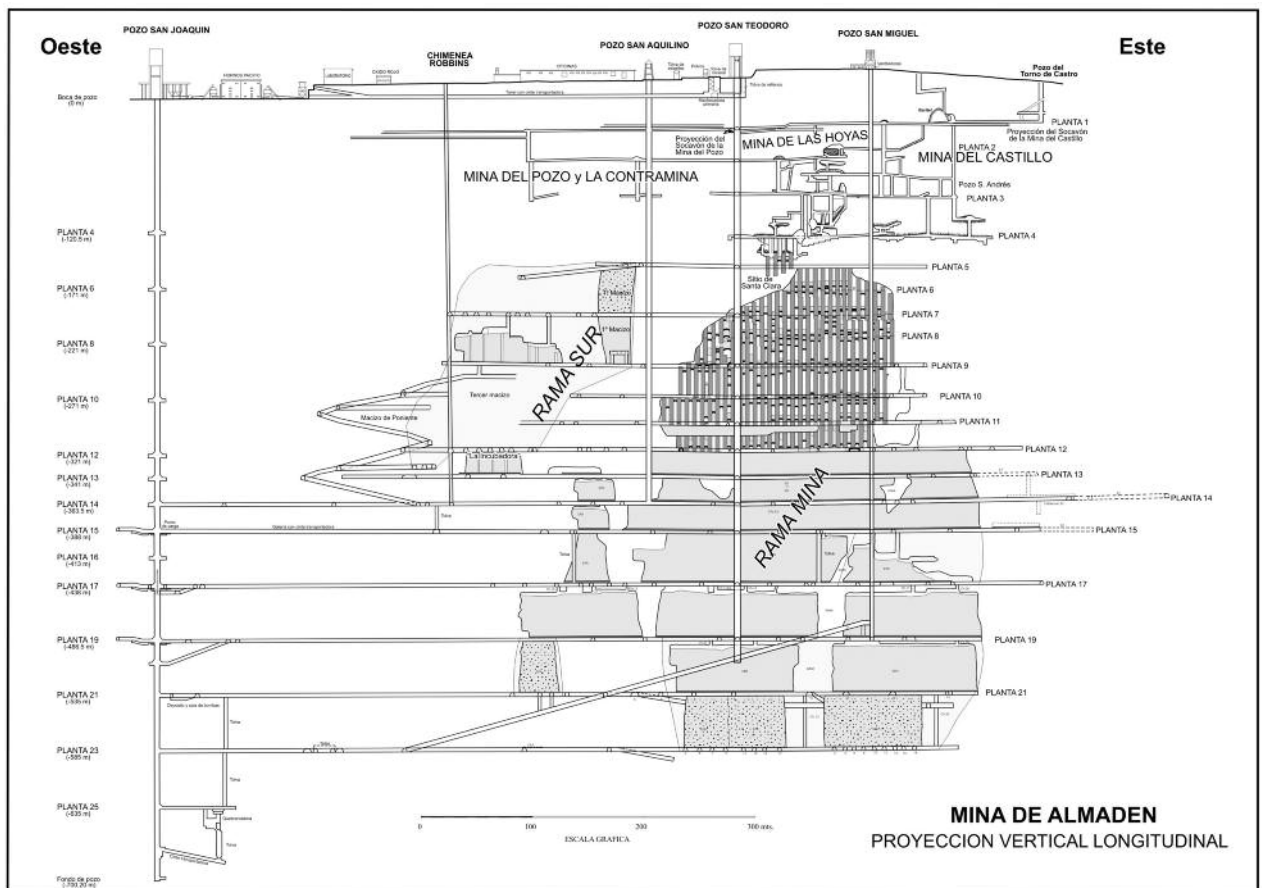


Figura 8. Sección longitudinal de la mina de Almadén con representación de la infraestructura minera básica.

Esta estructura geológica ha ido haciendo necesaria la progresiva profundización de los trabajos mineros según se iba necesitando poner a la vista nuevos recursos a extraer. En el momento del cierre, la infraestructura básica de la mina consistía en 2 pozos principales: San Teodoro y San Joaquín y 3 pozos auxiliares y de ventilación, San Miguel, San Aquilino y Robbins. Estos pozos daban servicio a un sistema de 27 plantas, separadas aproximadamente 25 m entre sí, aunque completamente desarrolladas estaban de la 1ª a la 15ª y, a partir de esta, sólo las impares 17ª, 19ª, 21ª y 23ª (Fig. 8). Los trabajos de beneficio sólo se desarrollaron hasta la planta 23ª.

La mineralización de Almadén era estratiforme y el mineral aparecía en tres niveles de ortocuarzitas muy concretos dentro de la Cuarcita del Criadero. Estos niveles mineralizados se localizaban uno a muro y dos a techo de esa unidad litoestratigráfica, que respectivamente recibían los nombres de Banco de San Pedro-San Diego (Fig. 6), Banco de San Francisco (Fig. 9) y Banco de San Nicolás (Fig. 10).

La Cuarcita del Criadero en la mina de Almadén se subdividía en 4 tramos que se muestran en la figura 11. Los niveles mineralizados presentaban potencias de 3 a 8 m en el Banco de San Pedro y San Diego y de 2,5 a 5 m en los otros dos. La separación entre los dos bancos del techo oscilaba entre 0 y 8 m, debiéndose esta variación probablemente a causas tectónicas (laminación tectónica).

Por debajo de la Cuarcita del Criadero estratigráficamente se hallaba una unidad de pizarras negras y

finas capas de areniscas, denominada las Pizarras de Muro. Por encima de las cuarcitas había otra unidad pizarrosa conocida como las Pizarras de Techo, constituidas éstas mayoritariamente por pizarras negras grafitosas fosilíferas con abundantes graptolitos. Las pizarras grafitosas estaban sustituidas parcial o totalmente por cuerpos intrusivos de rocas subvolcánicas (diabasas y cuarzodiabasas), materiales que se les conocía como las "Lavas de Techo". Cortando, o intercalados entre las rocas sedimentarias había diques y sills de materiales volcánicos composicionalmente equivalentes a las "Lavas de Techo". Se podían observar espectaculares casos de metamorfismo térmico de estos diques sobre las cuarcitas y los bancos mineralizados.

En una posición estratigráfica dudosa aparecían unas brechas heterogéneas formadas por fragmentos de areniscas, cuarcitas y rocas volcánicas, mostrando estas últimas estructuras peperíticas. Este era otro hecho peculiar a destacar de la Mina de Almadén.

Con carácter discordante se encontraban las tobas volcánicas de la "Roca Frailesca" (ver figura 3), formadas por fragmentos angulosos de tamaño variable (máximo 12 cm). Estos materiales formaban un gran cuerpo masivo de forma lenticular que aparecía limitado por grandes fallas ONO-ESE y NO-SE.

La mineralización de la Mina de Almadén estaba constituida básicamente por cinabrio y se presentaba como una impregnación y relleno fisural de los paquetes cuarcíticos mineralizados. Aunque en términos generales el aspecto del mineral se podía considerar semejante en los tres bancos, había ciertas diferencias texturales



Figura 9. Frente de explotación del Banco de San Francisco en la planta 14ª de la Mina de Almadén.



Figura 10. Frente de avance sobre el Banco de San Nicolás en la planta 10ª de la Mina de Almadén.

entre los del Banco de San Pedro y los que procedían de los otros dos bancos. Así, mientras en el Banco de San Pedro predominaba el mineral de impregnación, en los bancos de San Francisco y San Nicolás el mineral más común era el de relleno fisural. Hay que dejar claro que esto era una tendencia general y no una regla estricta, porque era posible encontrar los distintos estilos de mineralización en todos los bancos. La mineralización en impregnación suponía el relleno con cinabrio de la porosidad primaria de la roca, esencialmente de los espacios intergranulares, mientras que los rellenos fisurales representaban el sellado de la porosidad aportada por el diaclasado producido seguramente por procesos de compactación tardi-diagenéticos de la roca cuarcítica.

La paragénesis del yacimiento era la característica en este tipo de mineralizaciones estratiformes.

De forma ocasional se encontró en la Mina de Almadén también el tipo de mineralización en "stockwork" en la "Roca Frailesca". Se presentaba como reemplazamientos y rellenos de venas en la toba volcánica, acompañada de fuerte alteración filítica y piritización, y estaba relacionada con grandes fallas. En la Mina de Almadén esta mineralización resulta anecdótica, pero es la única que actualmente se puede ver "in situ" en la zona acondicionada para turismo. Se desconoce la importancia que hubiera podido tener dicha mineralización.

La verdadera mineralización económica de Almadén fue trabajada en una corrida máxima de unos 500 m y alcanzó una profundidad de 600 m. La metalización en los bancos de San Pedro-San Diego y San Francisco llegó

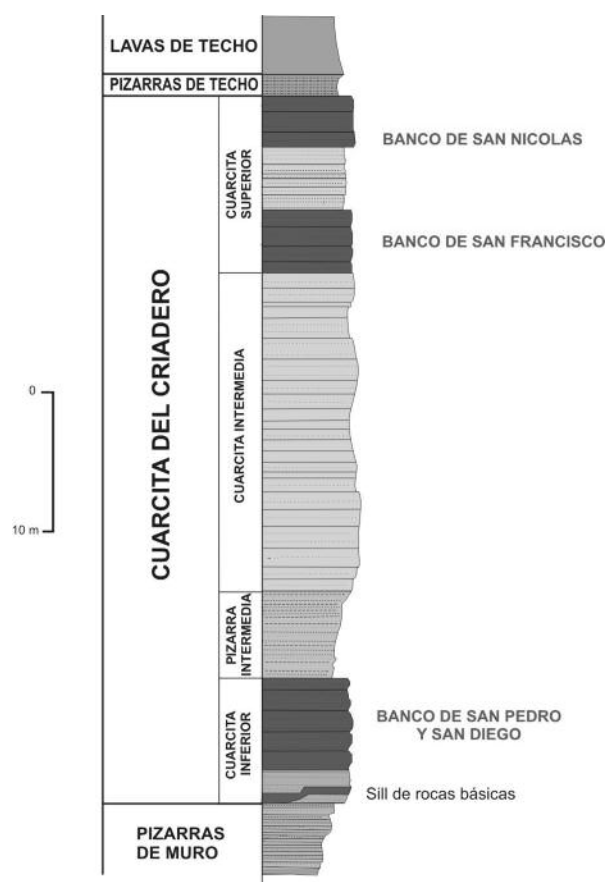


Figura 11. Columna estratigráfica esquemática de la Cuarcita del Criadero en la Mina de Almadén.



al nivel de la planta 23ª, mientras que el Banco de San Nicolás apenas sobrepasó la planta 17ª (425 m). Los minerales más ricos del Banco de San Pedro se disponían siguiendo un supuesto eje con cabeceo al Este que iría desde el Pozo San Teodoro en niveles superficiales, al Pozo San Miguel en niveles profundos. En el caso de los minerales de San Francisco y San Nicolás los más ricos se disponían siguiendo un teórico eje subvertical situado inmediatamente a poniente del Pozo San Aquilino.

Resulta imposible conocer con seguridad los tonelajes y las leyes medias obtenidas en el criadero, pero no es muy aventurado estimar una producción del orden de 7 millones de toneladas con una ley media de 3,5% de Hg (aproximadamente 1 frasco/Tm). No obstante ha habido una gran variabilidad de leyes, con zonas de hasta el 40% de Hg y amplios sectores con leyes del orden del 1% de Hg. Se puede decir que de los tres bancos mineralizados el mayor fue el de San Pedro-San Diego, seguido del de San Francisco y por último el de San Nicolás. Una estimación de metal aportado por cada uno de ellos sería 50% para San Pedro-San Diego, 30% para San Francisco y 20% para San Nicolás.

Las investigaciones geológicas realizadas en los últimos años de trabajos en la mina, supusieron un importante avance en el conocimiento de la estructura geológica del yacimiento. La necesidad de buscar nuevos recursos en zonas de geología más complicada que las habituales, obligó a revisar los conceptos clásicos sobre la geología del yacimiento, realizándose una reinterpretación que condujo a un nuevo modelo estructural, mucho más complejo de lo que se había pensado hasta entonces. Los trabajos de investigación precedentes mostraban una geometría del criadero de gran simpleza, con una gran continuidad y regularidad de los cuerpos metalizados, que solo se veía modificada por dos grandes fallas transcurrentes, las clásicas fallas de San Aquilino y de San Miguel (Saupé, 1973, 1990; Hernández Sobrino, 1984). Pero este modelo, que en su fundamento era válido para la zona clásica de trabajos mineros ("Rama Mina"), no se ajustaba a la realidad que mostraba otra zona del criadero ("Rama Sur"), donde la mineralización aparecía en macizos discontinuos de irregular distribución y con formas extrañas, tanto era así que ante la imposibilidad de reconocer a que banco pertenecía una mineralización se les atribuían nombres como "3er Macizo", "La Patata", etc.

El avance en el conocimiento de la estructuración geológica del yacimiento se produjo al comprender los sistemas de fracturación que le habían afectado. Se pudo comprobar que había una importantísima tectónica frágil afectando a la Cuarcita del Criadero, mucho más compleja y con una incidencia mucho mayor en su disposición geométrica de lo que hasta entonces se había supuesto. La intensa fracturación correspondía a dos episodios de generación de desgarres, uno longitudinal más antiguo y otro transversal más moderno. El sistema longitudinal supone una importante deformación que produce traslaciones hasta hectométricas a favor de estructuras concordantes o pseudo-concordan-

tes con la estratificación. Esta deformación era muy poco patente en la "Rama Mina" pero afectaba sobremanera a la "Rama Sur", razón por lo que hasta que no se acometió una investigación detallada de este sector no se puso en evidencia.

Las **fracturas de desgarres longitudinales** son fallas subverticales de rumbo principal ONO-ESE a E-O. Son grandes estructuras que actúan como cizallas levóginas de carácter eminentemente frágil, las cuales producen importantes desplazamientos en las alternancias cuarcíticas al presentar direcciones próximas a la de la estratificación. Este hecho favorece el desarrollo de ramificaciones y muchas estructuras de adaptación y asimilación del desplazamiento, lo cual complica la estructuración general de la Cuarcita del Criadero en la zona occidental del yacimiento (Fig. 12). Dan lugar a pliegues falla de eje subvertical, cuñas tectónicas, bandas de milonitas, etc. Junto al sistema principal de fallas ONO-ESE levógiro aparecían otras contemporáneas con rumbos NE-SO, dextróginas, y ENE-OSO, éstas también levóginas. Todas estas fallas habrían sido generadas por el acortamiento E-O de 2ª fase hercínica.

Las **fracturas de desgarre transversales** forman un conjunto de estructuras con buzamientos generalmente altos, de rumbo NO-SE y que cortan de forma transecta a la Cuarcita del Criadero produciendo desplazamientos con sentido dextrógiro. Muestran un carácter más frágil que las longitudinales, produciendo cortes más o menos netos de las rocas que afectan. Estas fallas dan lugar a traslaciones de irregular importancia, cuya magnitud va desde decimétrica a hectométrica. Estas fracturas son consecuencia de acortamientos N-S tardi-hercínicos.

La intersección de fallas longitudinales y transversales con la Cuarcita del Criadero en posición subvertical, es lo que ha configurado la estructuración del yacimiento. La estructura general se puede definir como la de un gran pliegue de eje subvertical desmembrado. Esta estructuración es producto de la traslación producida por un corredor de cizallamiento longitudinal levógiro ONO-ESE, a la que se superpone un corredor de fracturación transversal NO-SE que compartimenta el yacimiento en dos partes, al producir una traslación dextral del bloque oriental respecto al occidental (Fig. 12). La disposición de fallas, estratificación de la Cuarcita del Criadero y mineralizaciones, permitían diferenciar en el yacimiento 3 zonas que quedaban separadas por dos importantes fallas transversales NO-SE, que se llamaron la "Falla C" y la "Falla A" (Fig. 12). Los principales caracteres de cada una de estas zonas serían los siguientes:

**Zona "Rama Mina"** era el clásico sector de la explotación de la mina de Almadén. La Cuarcita del Criadero aparecía poco trastocada y sólo fallas del sistema transversal NO-SE producían pequeños saltos dextrales que no alteraban en gran medida la continuidad de los bancos mineralizados. Solo una de estas fallas tenía verdadera importancia, la denominada Falla de San Miguel, que producía un salto de magnitud decamétrica.

En esta zona la "Roca Frailesca" queda al Sur, formando un cuerpo lenticular limitado por un importante

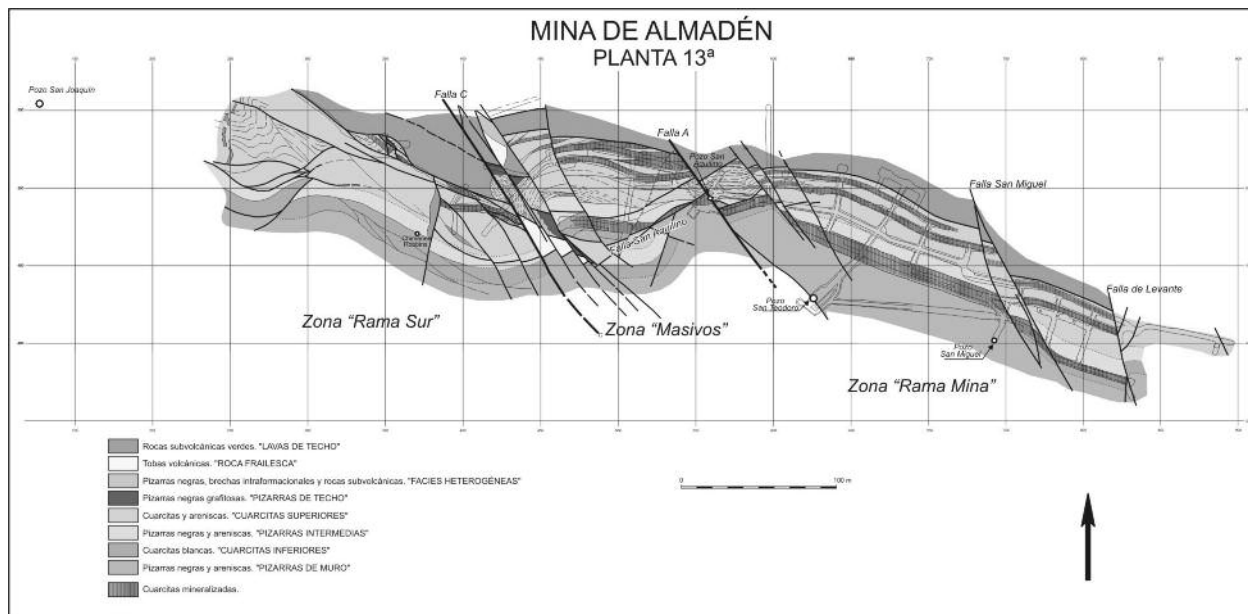


Figura 12. Esquema geológico de la planta 13ª de la Mina de Almadén.

accidente longitudinal con buzamiento fuerte al SSO. El límite occidental es la falla transversal "Falla A", que tiene buzamiento al NE. La intersección de la "Falla A" con la longitudinal condiciona que el cuerpo de tobas volcánicas a partir de la planta 10ª se vaya separando del criadero de forma progresiva (Fig. 13).

La mineralización aparecía en los 3 bancos clásicos, pero las mejores leyes y el mayor volumen de mineral procedió del Banco de San Pedro-San Diego.

**Zona de "Los Masivos"** era estructuralmente muy compleja al estar afectada por las fallas longitudinales que formaban dos sistemas levógiros, uno el principal ONO-ESE, y otro ENE-OSO (al que correspondía la llamada Falla de San Aquilino). Estas fallas producían importantes translocaciones de la Cuarcita del Criadero, incluso duplicaciones de los bancos mineralizados, lo que supuso la existencia de sectores con potencias mineralizadas de hasta 15 metros con minerales de alta ley (masivos). A la tectónica producida por las fallas longitudinales se le superponía una red de fallas transversales con importantes translaciones. Esta red quedaba delimitada por las dos grandes fallas transversales NO-SE, una a levante ("Falla A") con buzamiento al NE, y otra a poniente ("Falla C") que tenía buzamiento al SO. Al buzarse ambas estructuras en sentidos contrapuestos se producía su unión aproximadamente a nivel de 8ª planta ( $\approx 200$  m de profundidad), lo que conllevaba la desaparición de esta zona en la parte alta del yacimiento. Era la "Falla C" la que alcanzaba niveles de superficie, sirviendo en la parte superior del criadero de límite entre las zonas "Rama Mina" y "Rama Sur".

En esta zona de "Los Masivos", quedan en el Sur retazos de tobas en pequeños bloques limitados por fallas. Estos materiales son muy heterogéneos, de predominio tobáceo pero con gran cantidad de material detrítico entremezclado. Por el Norte hay tantas diabasas como tobas volcánicas (Fig. 13). En profundidad la "Roca Frailesca" prácticamente desaparece, quedando solo las "Lavas de Techo". Las Pizarras de Techo se encuentran bien representadas hacia la parte de poniente, sobre todo en las plantas superiores, pero van

desapareciendo en profundidad al ir siendo laminadas por las fallas longitudinales.

Respecto a la distribución de la mineralización, en esta zona el Banco de San Pedro y San Diego se esterilizaba progresivamente tanto en sentido Oeste como en profundidad, de tal forma que en los niveles por debajo de planta 15ª se presentaba estéril en este sector. Por contra, los bancos de San Francisco y San Nicolás presentaban leyes extraordinarias, sobre todo a niveles de 10ª a 14ª planta. Por debajo de planta 14ª comenzaba la pérdida de mineralizaciones en ambos bancos del techo, tanto en sentido horizontal como vertical. Sin embargo, en el extremo de poniente había un sector con minerales de San Francisco de buena calidad que llegó a la planta 21ª.

La **Zona "Rama Sur"** era estructuralmente compleja por efecto de la tectónica de las fallas longitudinales. Una peculiaridad estructural era la existencia de frecuentes pliegues de eje subvertical que resolvían buena parte de la traslación de las fallas de desgarre. En esa zona apenas había fallas transversales, y las que había eran de poca entidad.

En esta zona la "Roca Frailesca" aparecía al Norte de la Cuarcita del Criadero, limitada a levante por la "Falla C" y por el Sur mediante otro gran accidente longitudinal. A partir de la 7ª planta, la toba volcánica era intruída y sustituida por las "Lavas de Techo" (diabasas), encontrándose los últimos retazos de la toba a nivel de planta 14ª (Fig. 13). Estos materiales aparecen unas veces en contacto directo con las cuarcitas y otras separadas por una banda delgada de las Pizarras de Techo.

La mineralización en ese sector había perdido la continuidad por efecto de la tectónica de los desgarres longitudinales, apareciendo en forma de complejas estructuras cizalladas y plegadas. Pese a todo se podía precisar que las mineralizaciones conocidas correspondían exclusivamente a los bancos de San Francisco y San Nicolás. También se sabía que la mineralización no alcanzaba la planta 14ª, ya que lateralmente los bancos se esterilizan dentro de la "Zona de Los Masivos" colindantes más a Levante.

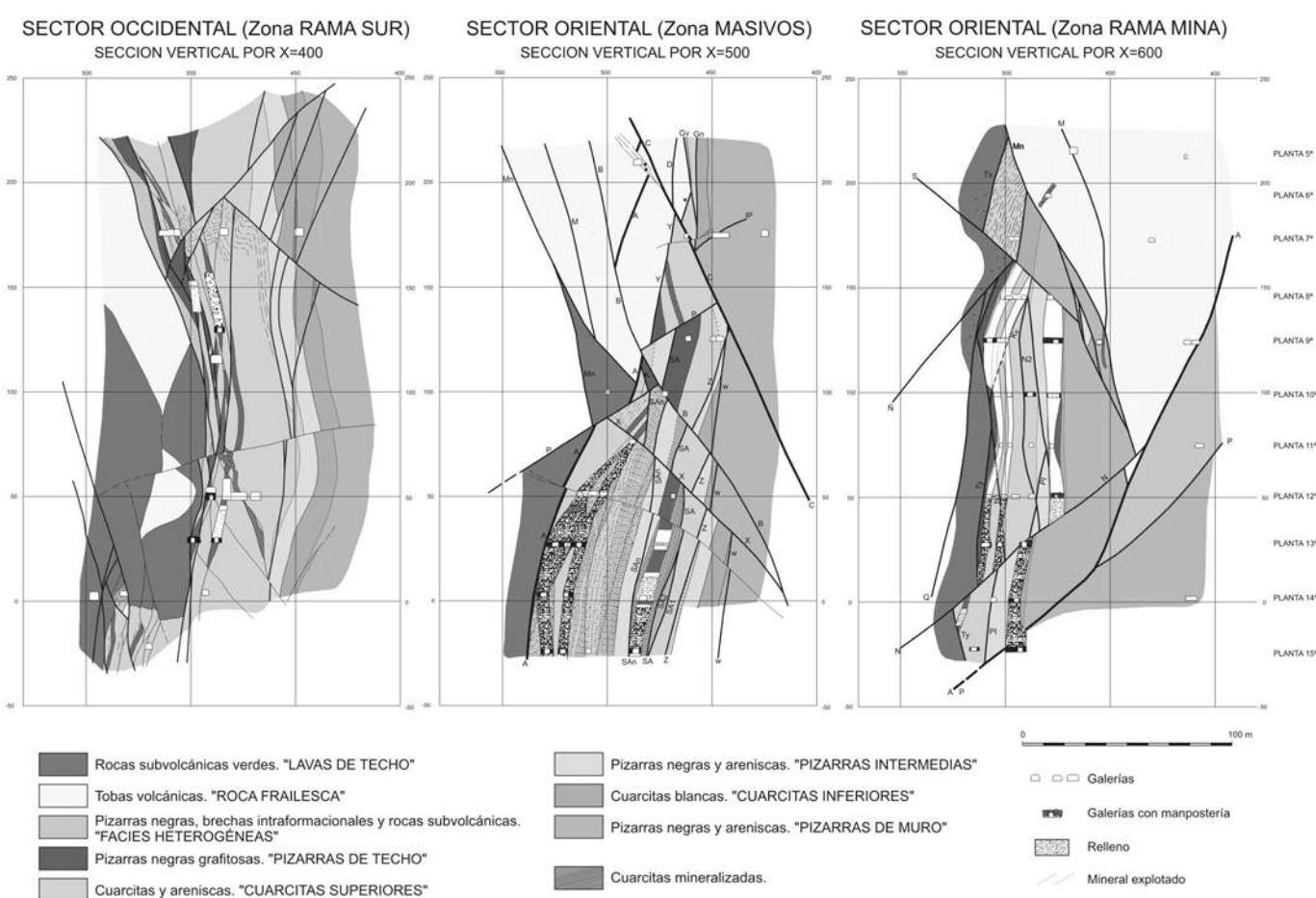


Figura 13. Secciones geológicas transversales representativas de las distintas zonas de la Mina de Almadén.

### LA MINA DE EL ENTREDICHO

La mina de El Entredicho ha sido el segundo depósito en importancia del distrito de Almadén. La explotación moderna abarcó realmente a dos yacimientos trabajados a mediados del siglo XVIII conocidos como Las Minetas de Valdezogues y la Mina de Stör, esta última también llamada Mina del Entredicho, de donde se tomó el nombre. Los trabajos de exploración realizados a mediados de los 70 llevaron al redescubrimiento de este importante yacimiento. Desde un principio el proyecto de explotación fue concebido a cielo abierto. La mina empezó a producir minerales a partir de 1979 y se paró en el año 1997, habiendo aportado unos 350.000 frascos de Hg. La forma final de la corta ha sido elipsoidal, con unas dimensiones de 450 m de anchura máxima según un eje NO-SE y 350 m en la dirección perpendicular. La profundidad máxima fue de 90 m desde el fondo del cauce del río Valdezogues, que atravesaba el yacimiento.

La tipología del yacimiento de El Entredicho es estratiforme, con caracteres muy semejantes a la mina de Almadén, aunque con dimensiones mucho más modestas. Está situado en el extremo suroriental del sinclinal de Almadén (ver figura 5) donde la estratificación pierde el rumbo predominante E-O del flanco Sur para pasar a constituir la parte suroriental de la terminación periclinal del sinclinal, caracterizada por numerosos pliegues menores y una importante fracturación.

Al igual que en Almadén, la serie estratigráfica está formada por las Pizarras de Muro, que están atravesadas

por numerosos diques de rocas subvolcánicas básicas. Sobre ellas está la Cuarcita del Criadero y por encima de ésta las Pizarras de Techo silúricas, constituidas por las clásicas pizarras negras grafitosas, muy poco presentes en la zona explotada.

La Cuarcita del Criadero se puede subdividir en los 4 tramos equivalentes a los de Almadén, en los que únicamente cambian los espesores, pero no las características sedimentarias. Como peculiaridad hay un "sill" basáltico intercalado en la parte basal, con gran continuidad y potencia de 2 a 5 m, que contiene abundantes enclaves de rocas ultrabásicas. Se trata de un claro ejemplo de "pebble-dyke". El tramo correspondiente a la Cuarcita Inferior contenía el denominado "Banco Inferior" (Fig. 14), con potencia entre 1 y 2 m y que en los niveles más profundos de la corta integraba casi todo el tramo. El tramo de las Cuarcitas Superiores aparecía peor definido que en Almadén al encontrarse en una zona replegada, fracturada y acomodada ante un acortamiento importante en el núcleo de los pliegues. Este tramo contenía el Banco Superior, que fue trabajado en Las Minetas de Valdezogues donde se le conocía como Esperanza.

Otra mineralización encontrada en El Entredicho es abundante Hg nativo en fracturas y fallas, que llegaron a ser beneficiadas en el siglo XVIII en la mina de Störn. Las zonas que contenían mayor cantidad de este elemento nativo era la denominada Falla de San Javier, en donde esta cortaba al cuerpo de "Roca Fraileasca" que





Figura 14. Exposición del Banco Inferior en un banco de la corta de El Entredicho. A la derecha, separado por un tramo de pizarras, se aprecia el sill de rocas básicas con enclaves ultramáficos.

allí había. Las cajas de falla de esta fractura y en sus ramificaciones contenían abundante Hg nativo, junto con algunas pintas de cinabrio.

Las rocas volcánicas están ampliamente representadas en el yacimiento. Se reconoce un importante cuerpo tobáceo de "Roca Frailesca" y otras facies de brechas explosivas, y dos sistemas de diques básicos. Las tobas volcánicas aparecen formando un gran afloramiento situado en la parte oriental de la corta, prolongándose hacia el Este (Fig. 15). Estas rocas forman un gran cuerpo discordante, que en niveles superficiales de la explotación estaba en contacto con la Cuarcita del Criadero mediante una falla llamada "San José". Realmente todos los contactos de esta diatrema son por grandes fallas, seguramente producto de la reactivación de los límites mecánicos netos de origen. Debido a que el buzamiento del límite del cuerpo de "Roca Frailesca" es hacia el Este y a que la Cuarcita del Criadero buza hacia el Oeste, estas unidades litológicas se iban separando según se profundizaba la corta. De esta forma toda la toba volcánica quedó encajada entre Pizarras de Muro al terminar la explotación. En los taludes de la corta el cuerpo tobáceo tiene forma triangular y está limitado por el Norte por una falla transcurrente levógira de rumbo cercano a E-O ("San José"), y por el SO por otra gran falla de dirección NO-SE ("San Javier") que parece haber rejugado en diversas ocasiones, reconociéndose actualmente un salto dextral de magnitud hectométrica (Fig. 16).

Dentro del cuerpo de "Roca Frailesca" se reconocen dos facies de brechas volcánicas que se podrían definir como Frailesca clásica y brechas redondeadas de matriz pelítica. La primera es la típica toba, masiva o groseramente bandeada ("bedding"), muy semejante a la de la

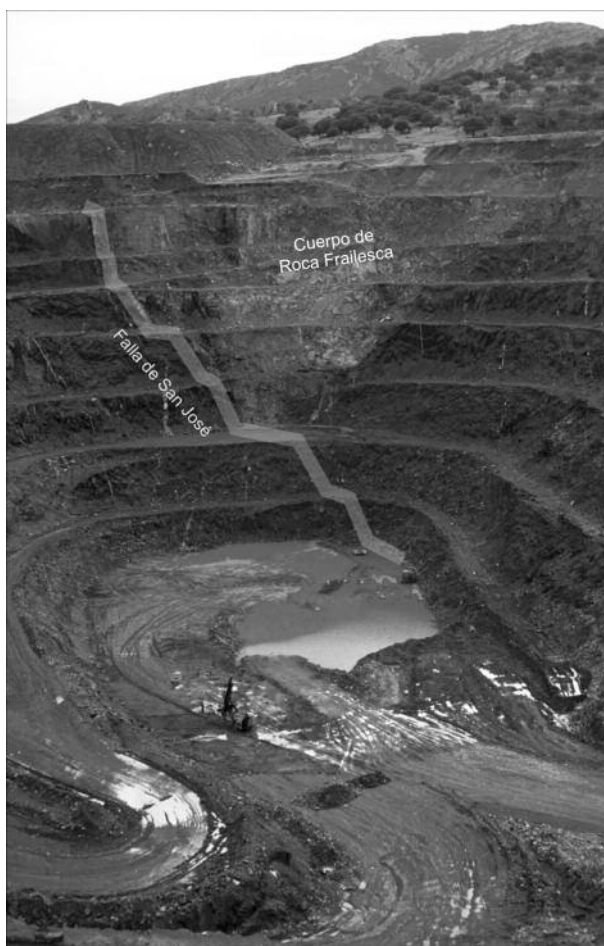


Figura 15. La corta de El Entredicho en un momento avanzado de la explotación. Se puede ver el cuerpo diatrémico de tobas volcánicas rodeado por las pizarras negras. El límite de la izquierda es la Falla de San José.

mina de Almadén. La segunda facies está integrada por material volcánico que forma grandes bolos subredondeados rodeados por material tobáceo heterogranular y abundante matriz pelítica negruzca. Estas últimas ocupan una amplia banda en la parte Norte del afloramiento de material volcánico en la corta, que se prolonga en profundidad como se ha reconocido por sondeos. Parece ser que hacia abajo se van perdiendo los bolos y queda una brecha más angulosa con abundante matriz pelítica negra. También hay dos pequeños cuerpos de estas facies de tobas en la parte occidental de la corta, uno encajando en las alternancias del Ordovícico Superior y otro entre Pizarras de Muro (Fig. 16).

Los diques básicos forman dos conjuntos que representan a su vez dos episodios de material intrusivo subvolcánico. El primer episodio está representado por "sills" de rocas basálticas con enclaves ultramáficos. Tienen potencias métricas y se encuentran intercalados en la Cuarcita del Criadero en dos niveles, uno a techo del tramo cuarcítico inferior y otro en la parte alta de la alternancia cuarcítica intermedia. Estos diques tienen la misma composición que la "Roca Frailesca" y nunca la llegan a cortar, interpretándose como canales de alimentación del cuerpo diatrémico.

El segundo episodio de diques forma una red de estructuras, tanto concordantes como discordantes con la estratificación, que encajan en todas las unidades litológicas de la mina, incluida la "Roca Frailesca".

Están formadas por material basáltico con textura afánítica y holocristalina, presentando a veces bandeados de enfriamiento paralelos a los bordes del dique. Su potencia es variable y presentan frecuentes boudinamientos por deformación posterior.

En El Entredicho se encontró un hecho de gran relevancia metalogénica que ha permitido establecer las relaciones temporales entre mineralización y vulcanismo. Efectivamente, en los niveles profundos de la corta uno de los "sills" con enclaves ultrabásicos se hallaba en contacto con el Banco Inferior, produciendo en él una especie de "metamorfismo". Esto supone que el emplazamiento del mineral ha sido claramente anterior al dique con enclaves y, puesto que este está relacionado espacial y composicionalmente con la "Roca Frailesca", se deduce que la mineralización es más antigua que el emplazamiento de las diatremas volcánicas.

La estructura principal del yacimiento está constituida por un doble pliegue (sinclinal-anticlinal) que describe la Cuarcita del Criadero. Estos pliegues son de dirección NO-SE, con el eje cabeceando unos 30-35° al NO, y se originan durante la 1ª fase de deformación hercínica. Llevan asociados una esquistosidad grosera de plano axial, subvertical.

Además de los pliegues de primera fase hercínica, es la fracturación la que controla la estructura actual del yacimiento (Fig. 16). Las fallas presentan evoluciones complejas, con rejuegos indicados por la presencia de varios sistemas de estrías con direcciones e inclinaciones diversas y que se relacionan tanto con la 2ª fase hercínica de carácter frágil-dúctil, como con los movimientos tardi y post-hercínicos. Las fallas más importantes son las denominadas Falla de San Javier y Falla de San José ya comentadas. La primera tiene una dirección NNO-SSE y plano de falla subvertical. Presenta una historia de movimientos compleja, aunque el desplazamiento final observado sería dextral. Esta falla produce un desplazamiento dextrógiro cuya traslación horizontal es del orden de unos 200 m. tomando como referencia la base de la Cuarcita del Criadero. Divide la estructura geológica de la corta en dos mitades (Fig. 16). Al Oeste de esta estructura afloran materiales de edad Ordovícico Superior, constituidos por alternancias de pizarras, areniscas y cuarcitas, mostrando pliegues a escala hectométrica. Al Este de la falla es donde se sitúa el total de mineralizaciones explotadas, así como el afloramiento de las tobas volcánicas.

## LA MINA DE LAS CUEVAS

La mina de Las Cuevas constituye el ejemplo mejor estudiado del tipo de yacimientos en "stockworks" y es el único caso de mineralización mercurífera en el flanco Norte del Sinclinal de Almadén (ver figura 5).

La explotación de Las Cuevas se inició en tiempos de los romanos, pero estuvo abandonada durante mucho tiempo hasta que en 1774 fue redescubierta. En el último cuarto del siglo XVIII se realizaron trabajos de investigación y explotación, pero la pérdida del mineral en profundidad y las difíciles condiciones de trabajo, llevaron de nuevo a su paralización. A partir de la década de

1960 se realizaron diversas investigaciones que culminaron con la definición de un importante criadero de Hg por debajo de las labores antiguas a finales de los 70. La explotación de la nueva mina se inicia en 1987 la cual se prolonga hasta octubre de 1999 en que se da por finalizada la extracción de mineral. Los recursos extraídos han supuesto aproximadamente unos 150.000 frascos de Hg.

El yacimiento se sitúa en el seno de una zona de fuerte deformación por cizallamiento, la cual está afectando a una alternancia verticalizada y plegada de pizarras negras y arenisca, con intercalaciones cuarcíticas y volcánicas. Este hecho a dado lugar a una estructuración geológica del yacimiento muy complicada, resultado de una intensa fracturación generada en la 2ª fase hercínica, reactivada en varios episodios posteriores de actividad tectónica. En origen la fracturación debe haber estado condicionada por la presencia de un cuerpo diatrémico de "Roca Frailesca" e importantes diques y "sills" de rocas subvolcánicas.

La mineralización aparece de forma irregular encajada en rocas volcánicas y detríticas pertenecientes a la secuencia sedimentaria silúrico-devónica. En los materiales volcánicos la mineralización aparece como rellenos de venas y como reemplazamientos masivos, siendo en estos casos cuando se alcanzan las mayores leyes de Hg (ver figura 7). En el caso de las rocas detríticas, los minerales aparecen exclusivamente como relleno de venas. La cantidad de mineral explotado en rocas volcánicas ha supuesto el 69% del total, frente al 31% del obtenido en rocas detríticas. Si bien esta diferencia es grande, es mucho más importante si se compara el metal contenido, ya que en las rocas volcánicas ha representando el 83% de los frascos de Hg obtenidos frente al 17% aportado por las rocas detríticas.

La paragénesis del yacimiento es la típica de esta tipología, con cinabrio y pirita como minerales mayoritarios, acompañados por filosilicatos. El mercurio nativo merece una mención especial en Las Cuevas por su gran abundancia. Aparece con profusión en toda la mina, ocupando cualquier oquedad de las rocas, principalmente en las zonas fracturadas, seguramente favorecido por la gran movilidad del metal líquido.

Asociada a esta paragénesis hay una intensa alteración de las rocas encajantes, en especial en las de naturaleza volcánica. Esta alteración consiste en piritización y argilitización, las cuales se superponen a la carbonatización y seritización previas de las rocas volcánicas. El proceso de reemplazamiento por cinabrio supone realmente otra alteración que se podría definir como "cinabrización". Se puede establecer una secuencia de alteraciones que sería:

carbonatización + seritización → piritización →  
argilitización + cinabrización

Posteriormente a la formación de la mineralización se detecta una cierta desestabilización de la paragénesis de cinabrio+pirita, pues se aprecian corrosiones de los granos de cinabrio y recristalización de pirita. En

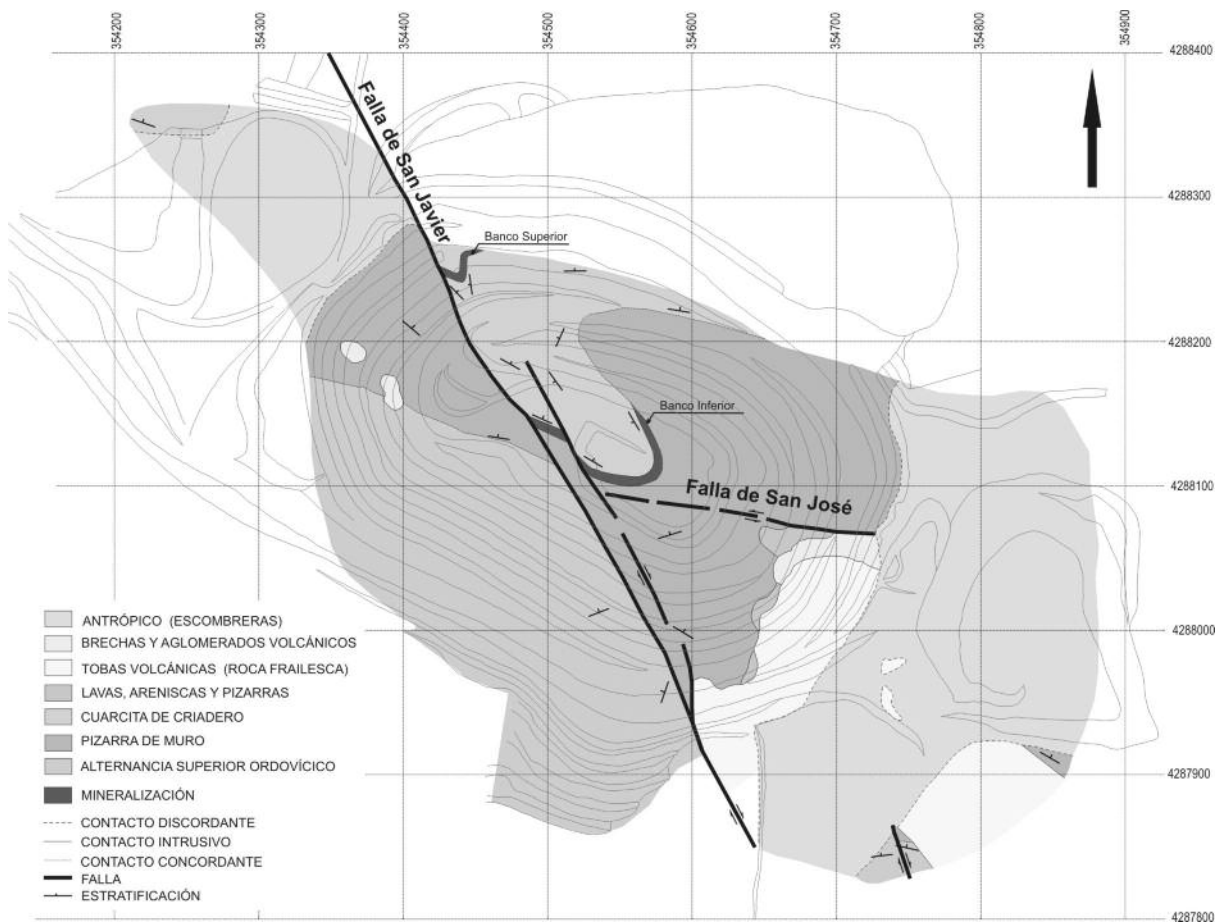


Figura 16. Esquema geológico de la corta de El Entredicho en los últimos momentos de la explotación. El mineral quedaba restringido al limbo de un sinclinal cortado por la falla transversal de San Javier.

este caso aparece abundante caolinita y barita, esta última perfectamente cristalizada y englobando granos de cinabrio y pirita corroidos.

La distribución de la mineralización era bastante irregular en el yacimiento, viéndose condicionada la ley en Hg por el grado de "cinabrización" de las rocas volcánicas y por las diluciones introducidas por las rocas estériles que había entremezcladas con las metalizadas, producto de la deformación por cizallamiento del criadero.

Las venas rellenas de cinabrio tenían escaso desarrollo longitudinal. Se disponían de manera irregular, pero se presentaban de forma repetida siguiendo una pauta predominante de suave inclinación (Fig. 17). Su forma y distribución respondía bien a un modelo de grietas de tensión, pero su disposición horizontal no es lógica en un estilo de fracturación de banda de cizalla transcurrente subvertical.

La estructura del yacimiento de Las Cuevas se puede definir como una banda de deformación por cizalla frágil-dúctil vertical generada por el acortamiento E-O de 2ª fase hercínica. Tiene una anchura hectométrica, movimiento levógiro y los límites llevarían un rumbo ONO-ESE (Fig. 18). La estructuración interna de la banda se realiza mediante cizallas frágiles-dúctiles y dúctiles-frágiles de rumbo ENE-OSO y sentido de desplazamiento levógiro. La anchura de estas estructuras es variable y función de la naturaleza del material afectado. Así, cuando afectan a materiales volcánicos se manifiestan mediante planos discretos y bandas de desarrollo milonítico de anchura decimétrica, mientras que cuando

afectan a alternancias pelítico-arenosas se forman amplias zonas de deformación con generación de abundantes bandas centimétricas anastomosadas de milonitas, formación de "peces tectónicos", pliegues cónicos de eje subvertical y fábricas s-c. Cuando la deformación afecta a alternancias de paquetes gruesos de ortocuarcitas se da una deformación de carácter dúctil-frágil, produciéndose la traslación por los planos de estratificación a favor de las finas intercalaciones pelíticas, y originándose cuñas tectónicas y boudinamientos de los paquetes cuarcíticos.

Posteriormente a la formación de las principales estructuras de la mina, continúa una evolución tectónica, eminentemente frágil, que supone el rejuego de las estructuras descritas, así como la generación de otras nuevas fracturas que modifican y compartimentan el criadero. Los desplazamientos tienen magnitud hasta decamétrica, a grandes rasgos esta evolución se puede sintetizar en cuatro episodios que son:

- Rejuegos frágiles-dúctiles de componente mixta transcurrente levógiro y vertical inversa.
- Segundos rejuegos bastante generalizados frágiles-dúctiles de componente mixta direccional-extensional.
- Formación de fallas inversas de medio/bajo ángulo.
- Rejuego frágil extensional.

Las fallas inversas de medio y bajo ángulo suponen, por la importancia que tienen, una peculiaridad estructural de la mina de Las Cuevas. Se reconocen unas fallas principales cuyo rumbo es NO-SE a ONO-ESE, buzamien-



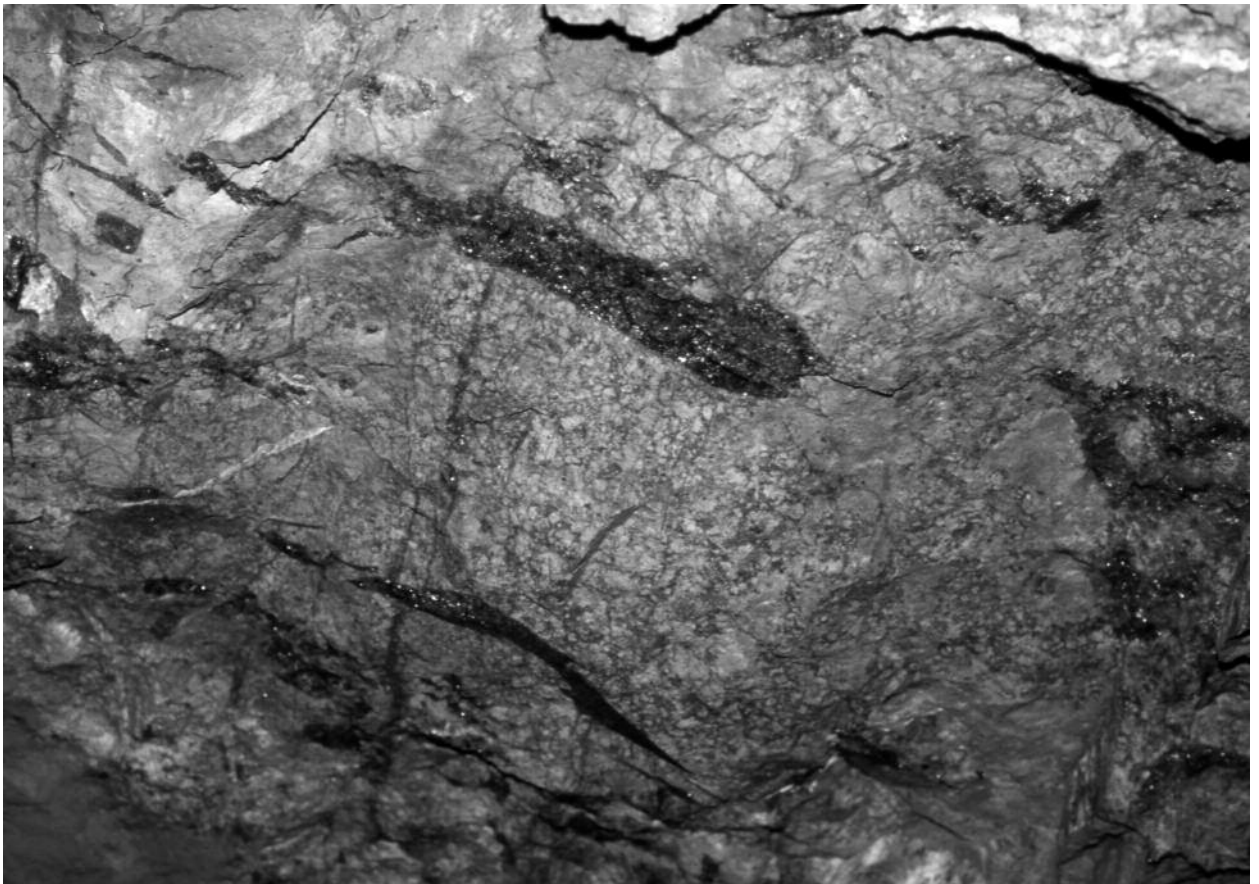


Figura 17. Fracturas de tensión rellenas de cinabrio masivo en las tobas volcánicas del yacimiento de Las Cuevas. Se puede apreciar la tendencia a la disposición tendida con bajo ángulo de estas venas.

to de 30° a 50° al SO y traslación del bloque superior hacia el NE. En la mina se reconocen tres de estas fallas como estructuras principales que compartimentan el yacimiento en cuatro bloques en la vertical, los cuales serían de arriba a abajo los siguientes (Fig.19):

Bloque superior, entre superficie y cota -60. Fue la zona explotada en el siglo XVIII y antes. Queda limitado por la Falla de Techo.

Bloque de 1ª y 2ª plantas, entre cotas -60 y -125. Comprendía los macizos mineralizados entre el subnivel -60 y 2ª planta. Queda limitado por la Falla 2ª.

Bloque de 3ª planta, entre cotas -125 y -225. Contiene los macizos mineralizados entre 2ª planta y el subnivel -190. Queda limitado por la Falla 4ª.

Bloque inferior, por debajo del nivel -225. Fue estéril.

La mineralización de Las Cuevas se presentaba como cuerpos de forma irregular que, desde el punto de vista económico, definían dos macizos subverticales que se denominan respectivamente de Poniente y de Levante. Estos macizos estaban integrados por uno o varios "peces tectónicos" de mineral muy próximos, cuerpos geológicos formados como consecuencia de la compleja evolución tectónica del yacimiento.

El macizo de Poniente fue sido el más grande, representando el 62% del tonelaje total y el 78% de los recursos de Hg del yacimiento. Aparecía desarrollado entre los niveles -60 y -195, o lo que es lo mismo, desde por encima de 1ª planta hasta por debajo de 3ª planta. El macizo de Levante supuso el 20% del tonelaje de minerales, y el 19% del mercurio presente en el yacimiento.

Estaba desarrollado entre los niveles -85 y -175, o lo que es lo mismo, entre las plantas 1ª y 3ª de la mina.

Además de los dos macizos explotados, había otro, calificado como sub-económico, con desarrollo entre los niveles -125 y -180 (2ª y 3ª plantas). Este macizo, denominado Intermedio, suponía el 18% del tonelaje, pero debido a su baja ley solo representaba el 3% del metal contenido.

### LA MINA NUEVA CONCEPCIÓN

La mina Nueva Concepción fue el mayor yacimiento del tipo "stockwork" con una producción que alcanzó los 185.000 frascos, representando el 3° yacimiento en el distrito de Almadén.

Parece ser que los trabajos más antiguos en esta mina fueron de época romana. Fue redescubierta en 1779 pero las primeras investigaciones no dieron resultados muy halagüeños, parando en 1784. En 1793 se reiniciaron los trabajos de exploración, los cuales obtuvieron resultados positivos al año siguiente. Desde entonces y hasta 1829 se explotó con intensidad. A partir de 1830 los trabajos van ralentizándose ante el empobrecimiento del mineral, parándose la mina en 1860. Posteriormente es reabierta en 1940, volviéndose a parar en 1942. Por último, en 1965 se vuelve a abrir, permaneciendo operativa poco tiempo al comprobar la esterilidad de las plantas más inferiores. Desde entonces se han realizado varias campañas de investigación que nunca han obtenido resultados positivos.

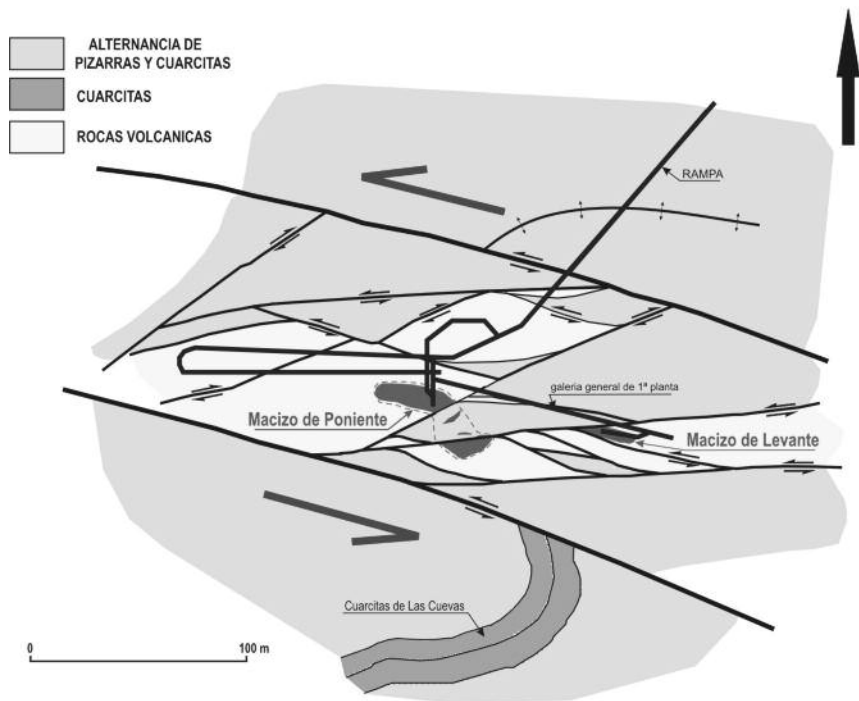


Figura 18. Esquema geológico simplificado del yacimiento de Las Cuevas a nivel de la 1ª planta de la mina (-90 m de profundidad).

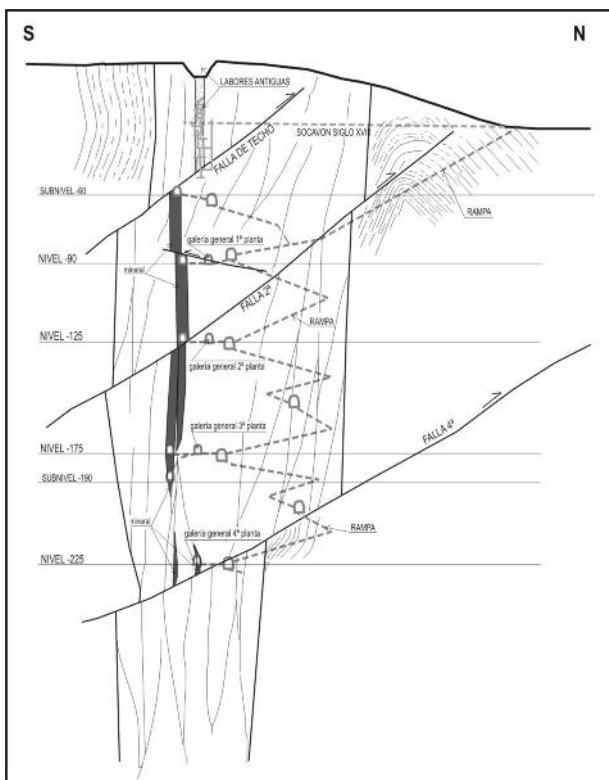


Figura 19. Sección geológica idealizada del yacimiento de Las Cuevas por lo que sería en Macizo de Poniente, que fue el principal de la mina.

Desde el punto de vista geológico el yacimiento de la Nueva Concepción se halla en el flanco Sur del Sinclinal de Almadén (ver figura 5), en una zona verticalizada de la Cuarcita del Criadero afectada por frecuentes zonas de cizalla de rumbo NO-SE y movimiento levógiro. Estas cizallas actúan a modo de desgarres y producen repeti-

ciones del nivel cuarcítico. En general se define una geometría de "ganchos" con pliegues de eje subvertical producidos por el arrastre de los desgarres. En la parte no rotada, el cierto paralelismo entre falla y las capas verticalizadas facilita los deslizamientos capa a capa dando lugar a cuñas tectónicas. En este contexto, las cizallas son esencialmente frágiles y se presentan como bandas de deformación decamétrica a hectométrica, dentro de las cuales se produce el desmembramiento de las unidades rocosas, formándose litones y megalitones separados por fracturas.

Dentro de esta estructura general, el yacimiento quedaría en una zona deformada por una de estas bandas NO-SE, levógiro, de una anchura de unos 100 m. En superficie esta estructura parece bastante clara, evidenciándose el "gancho" en las cuarcitas situadas en el bloque septentrional de un gran desgarré (Fig. 20). La estratificación está en posición subvertical, con una dirección general ONO-ESE. Dentro de la zona afectada por la banda de cizalla aparecen una serie de fracturas de ángulo medio/bajo hacia el Este, de rumbo arqueado de N-S a NNE-SSO. Estas fallas eran muy evidentes en el interior de la mina.

La presencia de rocas volcánicas y subvolcánicas es un hecho frecuente en la zona. Estas aparecen esencialmente en formas de "sills" y diques. Destaca un "sill" encajado en las alternancias cuarcíticas superiores y que tiene gran continuidad en el interior de la mina. También hay diques que cortan a la estratificación, los cuales aparecen en fallas reactivadas que afectan, brechifican y deforman a las rocas subvolcánicas. Por las descripciones existentes, las fallas de ángulo medio/bajo engloban frecuentemente rocas subvolcánicas.

La mineralización de la Nueva Concepción era esencialmente cinabrio, que se presentaba en su mayor parte rellenando venas en las rocas detríticas y volcáni-

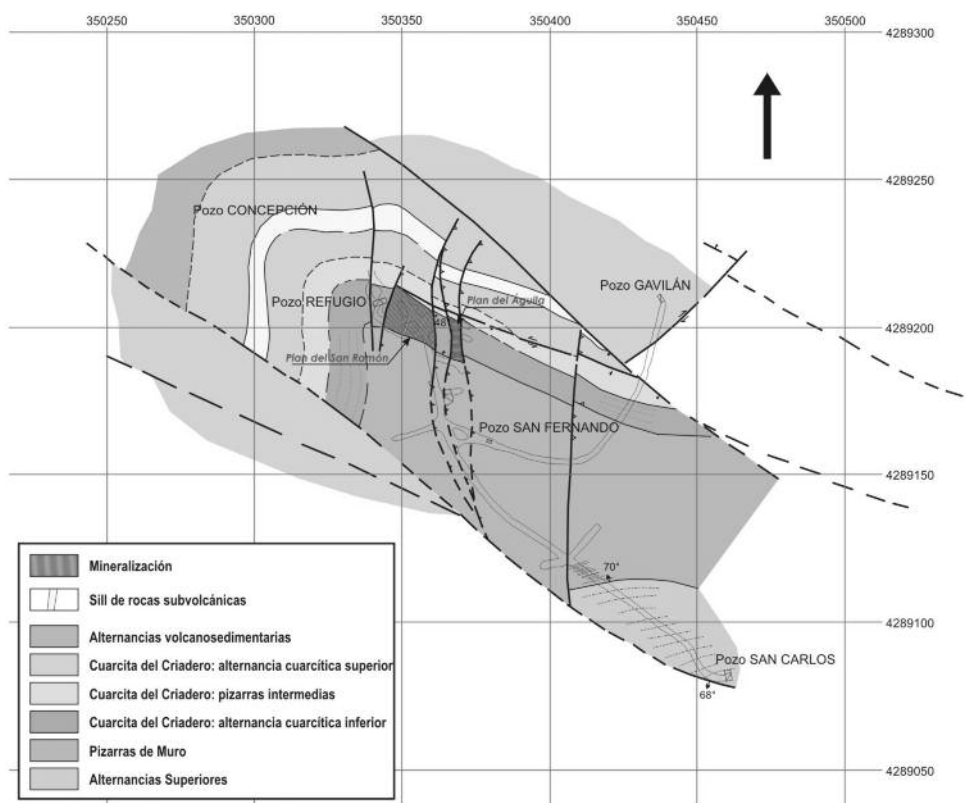


Figura 20. Esquema geológico del yacimiento de la Nueva Concepción a nivel de la 2ª planta.

cas. En las rocas volcánicas también se producían reemplazamientos masivos, dando lugar a las zonas con altas leyes en Hg. La imposibilidad de acceder a las labores mineras impide el poder establecer las relaciones temporales entre mineralización y estructura geológica del criadero, pero a juzgar por las grandes similitudes con el yacimiento de Las Cuevas, su emplazamiento tendría lugar en estados avanzados de la deformación relacionada con los desgarres NO-SE.

El mineral de la Nueva Concepción aparecía formando tres cuerpos limitados por fallas de bajo/medio ángulo a techo y muro, y por contactos geológicos en los hastiales (Figs. 20 y 21). Estos cuerpos eran denominados Plan de Águila, Plan de San Ramón y Plan de Santa Isabel. Los dos primeros se hallaban en la parte alta de la mina, mientras que el último se situaba en la zona profunda. Los dos primeros macizos de mineral se disponían en la vertical uno debajo del otro, mientras que el tercero se hallaba desplazado algo menos de 100 m al SE de los otros dos (Fig. 21).

Las dimensiones de estos macizos mineralizados no eran muy grandes y aunque las diferencias de volúmenes entre los tres no eran significativas, no ocurría lo mismo con el contenido en metal. Así, en el Plan del Águila las leyes medias era de 12,4% de Hg, en el de San Ramón era de 8%, y en el de Santa Isabel de 1,06%. Este hecho supuso que el 63% del metal se obtuviera en el Plan del Águila, el 28% procediera del Plan de San Ramón, y solamente el 4% se obtuviera en el Plan de Santa Isabel. El 5% restante de la producción de mercurio procedió de la explotación de los llamados Plan Lineal y Plan de San Lorenzo, los cuales correspondían a la explotación de dos pequeños filones situados en las

fallas de bajo ángulo que servían de límite a los planes del Águila y San Ramón.

El mineral del Plan del Águila aparecía encajado en cuarcitas y rocas subvolcánicas, básicas brechadas y carbonatizadas. Estas rocas pertenecían a la parte basal de la Cuarcita del Criadero y a un "sill" que hay en la zona del yacimiento. El mineral del Plan de San Ramón aparecía esencialmente en las mismas cuarcitas de la base de la Cuarcita del Criadero. Estos dos macizos mineralizados tenían formas más o menos poligonales y estaban separados por una cuña de roca estéril de unos 5 m de espesor. El mineral en el plan de Santa Isabel aparecía encajado en pizarras negras correspondientes a las Pizarras de Muro. Este macizo tenía una forma tabular, muy alargado en la vertical y con poco espesor. Parece ser que en esta estructura, que tenía un cierto carácter filoniano, estaban involucradas rocas subvolcánicas en forma de diques.

Las fallas de bajo/medio ángulo que limitan los macizos mineralizados parecen haber jugado un papel primordial en la formación de estos cuerpos. Muy probablemente estas fracturas al intersectar tramos rocosos de mayor competencia que su entorno, produjeron su fracturación y generaron zonas de mayor permeabilidad para la circulación de fluidos mineralizantes. La presencia de rocas volcánicas o subvolcánicas carbonatizadas habría facilitado la fijación de los minerales, dando lugar también reemplazamientos y consecuentemente a las zonas de mayor ley en Hg.

La estructura general del yacimiento de la Nueva Concepción quedaría definida por una falla inversa de bajo/medio ángulo de rumbo general NNE-SSO que intersecta a la Cuarcita del Criadero, unidad litológica



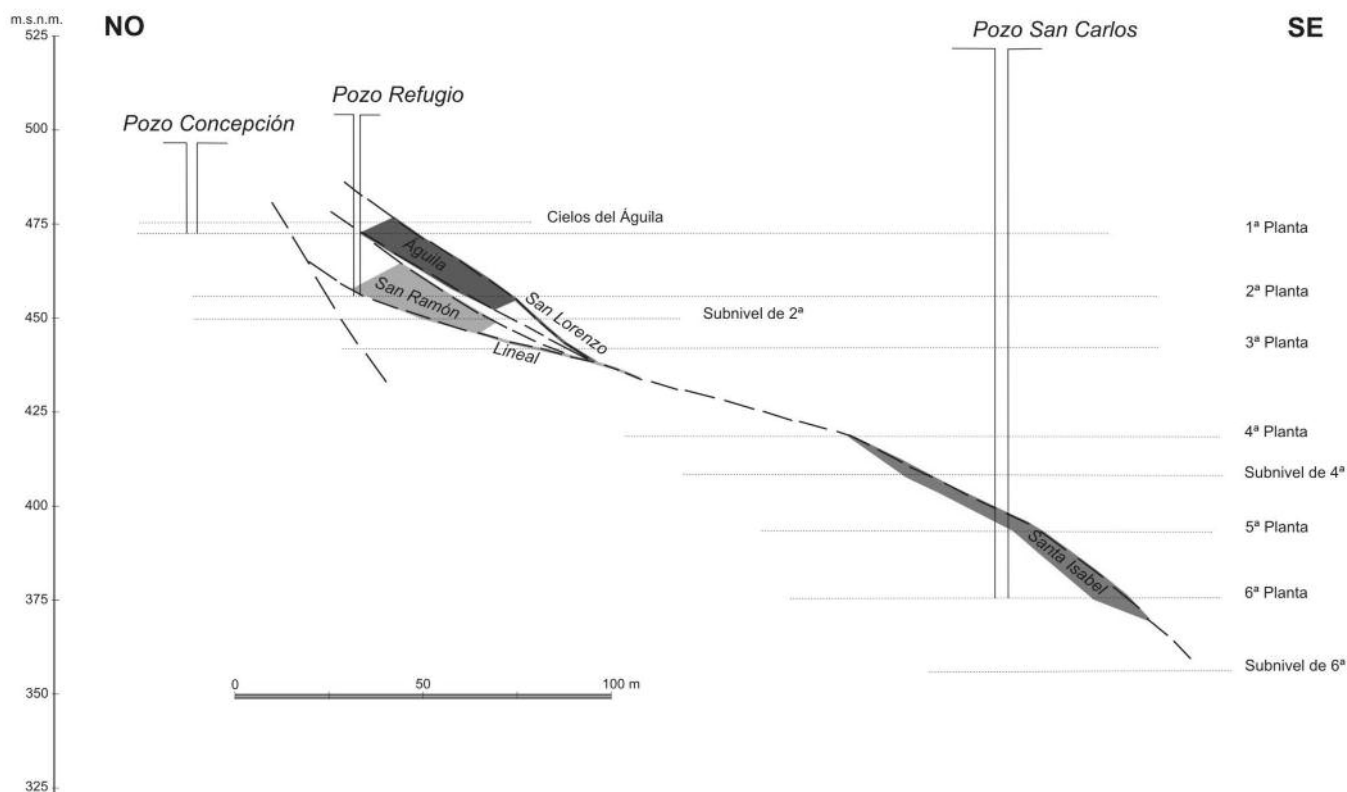


Figura 21. Distribución espacial de los cuerpos mineralizados en el yacimiento de la Nueva Concepción.

que está afectada por una red de desgarres levógiros NO-SE. El mineral se disponía en los tres cuerpos mencionados, dos de ellos sobre el plano de la falla inversa y uno bajo ella (Fig. 21). Los dos superiores se hallaban donde dicha falla corta a las Cuarcitas del Criadero, que incluyen al sill de rocas subvolcánicas. En esa zona la falla inversa se abriría en varias ramas que individualizarían los dos macizos mineralizados.

El macizo bajo la falla corresponde a una zona de fracturación en el tramo que la falla inversa corta a las Pizarras de Muro. En definitiva, más que pensar en un único cuerpo metalizado cortado por la falla inversa y fragmentado en los tres macizos conocidos, se puede considerar que la dinámica de ésta estructura ha provocado tres zonas de fracturación que han servido de trampas estructurales para fijar la mineralización. La presencia de metalización en la propia falla inversa, en lo que eran los planes Lineal y de San Lorenzo, invita a pensar que esta estructura hubiera actuado de canalizador del hidrotermalismo que generó el yacimiento.

## CONCLUSIONES

De lo expresado en los párrafos precedentes se puede ver la singularidad geológica y metalogénica que representan los yacimientos de mercurio del distrito de Almadén. Estos yacimientos aparecen en un contexto geológico muy concreto y con unas peculiaridades que hacen del distrito una gran anomalía y un referente en la geología ibérica. El sinclinal de Almadén presenta una de las series sedimentarias del Paleozoico más completas del Hercínico de la Península Ibérica, que incluye unos materiales volcánicos que son exclusivos de esta

macroestructura. Los cuerpos diatrémicos de la "Roca Fraileasca" son algo espectacular y particular en el dominio hercínico europeo. En el aspecto de geología estructural, el sinclinal de Almadén ofrece un compendio de todo tipo de estructuras de plegamiento, fracturación y cizallamiento de rocas anisótropas en condiciones anquimetamórficas.

Los yacimientos de Hg del distrito responden a dos tipologías muy bien diferenciadas, en la que se puede establecer unos yacimientos primarios de morfología estratiforme y otros epigenéticos de morfología irregular (stockworks) que seguramente derivan de la movilización de las mineralizaciones primarias. Se pueden establecer claros criterios de temporalidad entre ellos, en donde los estratiformes son claramente precinemáticos respecto a las deformaciones hercínicas, mientras que los epigenéticos son tardí a sincinemáticos.

Los avances en el conocimiento de la geología del sinclinal del Almadén y de los yacimientos de mercurio, han permitido establecer un modelo coherente para su formación. Este modelo considera que los yacimientos de mercurio se relacionan con un accidente cortical que ha rejugado en varios momentos de la historia geológica del sinclinal, el cual es responsable de la anomalía geométrica que representa la verticalidad del flanco sur del sinclinal, lugar en donde se encuentran la mayor parte de las mineralizaciones. A favor de este accidente se habrían emplazado primero las mineralizaciones estratiformes y después los cuerpos diatrémicos de la "Roca Fraileasca". Las deformaciones hercínicas reactivan el accidente y el acortamiento E-O produce el cizallamiento del flanco y de una buena parte del sinclinal,

dando lugar a removilizaciones de las mineralizaciones primarias y formando los yacimientos epigenéticos en rocas afectadas por esta deformación y químicamente reactivas, como son las rocas volcánicas carbonatizadas.

El origen de esta descomunal concentración de un metal escaso en un lugar tan concreto como Almadén, es un problema metalogénico que por el momento no tiene una respuesta satisfactoria. Las dos hipótesis que se manejan: preconcentración en el medio sedimentario y concentración por la actividad volcánica; y acumulación puntual en el manto superior de gran cantidad de volátil mercurial, canalización y elevación hasta niveles corticales muy someros; ambos disponen de argumentos a favor y en contra.

La mina de Almadén ha sido el mayor yacimiento de mercurio del distrito y del mundo. Es un claro ejemplo de yacimiento gigante. Responde al tipo estratiforme y estaba formado por tres niveles mineralizados en la Cuarcita del Criadero. La estructura geológica del yacimiento se puede definir como un conjunto de importantes accidentes longitudinales levógiros afectando a una zona de la Cuarcita de Criadero verticalizada y cortada por una diatrema volcánica de "Roca Frailesca". Los accidentes se han visto modificados en su trayectoria por el cuerpo de tobas volcánicas y han producido una repetición de la unidad cuarcítica y un pliegue de eje vertical. Posteriormente fracturas de desgarre transversales dextrales han cortado y compartimentado al yacimiento en 3 partes con unas peculiaridades estructurales propias. La mineralización de Almadén tuvo unos 500 m de corrida y unos 600 m de profundidad, produciendo unos 7.000.000 de frascos con una ley media de 3,5% de Hg.

La mina de El Entredicho ha sido otro importante ejemplo de mineralización estratiforme, que presentaba idénticas características a la mina de Almadén pero con dimensiones mucho más modestas. Los bancos de mineral se encontraban en un sinclinal de Cuarcita del Criadero limitado por 2 fallas. El cuerpo de "Roca Frailesca" se situaba a levante del sinclinal y quedaba en contacto por una de las fallas. Esta mina produjo unos 350.000 frascos con minerales de alta ley.

La mina de Las Cuevas ha sido un ejemplo de mineralización epigenética. Se encuentra en una banda de cizallamiento levógira de rumbo ONO-ESE que afecta a rocas volcánicas y detríticas de la secuencia silúrico-devónica. La mineralización estaba formada por relleños e importantes reemplazamientos en rocas volcánicas. El yacimiento estaba fuertemente afectado por el acortamiento hercínico E-O y mostraba una distribución de la mineralización muy irregular. A grandes rasgos se definían dos macizos de mineral verticalizados cortados por fallas de bajo ángulo. De ellos se extrajeron unos 150.000 frascos de Hg.

La Mina Nueva Concepción fue otro ejemplo de mineralización epigenética, en este caso encajada en la Cuarcita del Criadero, en un sill de rocas volcánicas y en pizarras negras. El mineral aparecía formando 3 cuerpos condicionados por una falla de medio ángulo que cortaba a las cuarcitas verticalizadas, cizalladas y plegadas

formando un pliegue de eje vertical. Estos cuerpos aportaron 185.000 frascos de Hg.

Como se puede ver, los depósitos de Hg de Almadén han sido algo excepcional y difícilmente puedan tener una réplica en algún otro lugar del planeta. Estas son razones que justifican sobradamente el que sean declarados Patrimonio de la Humanidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almela, A., Alvarado, M., Coma, E., Felgueroso, C. y Quintero, I. 1962. Estudio geológico de Región de Almadén. *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, 73, 193-327.
- Coupez, Y., Tomkinson, M. y Phillips, A. 1988. Use of correlations between structural analysis of outcrop, remote sensing and gravity data to aid exploration for base metal mineralization in the Almadén region of Spain. *2<sup>nd</sup> Remote Sensing European Workshop (Bruxelles, 1986)*, 177-242.
- Díez Balda, M.A., Vegas, R. y Gonzalez-Lodeiro, F. 1990. Central-Iberian Zone. Structure. En: Dallmeyer, R.D. y Martínez García, E. (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, 172-188.
- Donaire, T. y Pascual, E. 1992. Caracterización petrológica y geoquímica del sector central del batolito de los Pedroches: discriminación de dos series de granitoides. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 5 (3-4), 41-54.
- Gallardo, J.L., Gomis, E., Dinarès, J. y Pérez-González, A. 1998. Relaciones entre las polaridades paleomagnéticas y las edades radiométricas del volcanismo del Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Geogaceta*, 23, 55-58.
- García Sansegundo, J., Lorenzo Álvarez, S. y Ortega, E. 1987a. *Memoria explicativa de la Hoja nº 808, Almadén. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- García Sansegundo, J., Lorenzo Álvarez, S. y Vázquez de la Torre Casinello, J. 1987b. *Memoria explicativa de la Hoja nº 781, Siruela. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Hall, C.M., Higuera, P.L., Kesler, S. E., Lunar, R., Dong, H. y Halliday, A.N. 1997. Dating of alteration episodes related to mercury mineralization in the Almadén district, Spain. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 148, 287-298.
- Hancock, P.L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 7 (3/4), 437-457.
- Hernández Sobrino, A. 1984. *Estructura y génesis de los yacimientos de mercurio de la zona de Almadén*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca.
- Higuera, P.L. 1995. *Procesos petrogenéticos y de alteración de las rocas magmáticas asociadas a las mineralizaciones de mercurio del distrito de Almadén*. Tesis doctoral, Universidad de Granada. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca, 270 pp.
- Higuera, P.L., Morata, D. y Munha, J. 1995. Metamorfismo de bajo grado en facies prehnita-pumpellyita en las metabasitas del Sinclinal de Almadén. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 18, 111-125.
- Higuera, P.L., Gervilla, F. y Morata, D. 2000a. Las espinelas cromíferas como indicadores petrogenéticos en las rocas magmáticas del sinclinal de Almadén. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 23, 107-120.
- Higuera, P.L., Oyarzun, R., Munha, J. y Morata, D. 2000b. The Almadén Mercury Metallogenic Cluster (Ciudad Real, Spain):

- Alkaline Magmatism Leading to Mineralization Processes at an Intraplate Tectonic Setting. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (1), 105-119.
- Higueras, P., Munha, J., Oyarzun, R., Tassinari, C.C.G. y Ruiz, I.R. 2005. First lead isotopic data for cinnabar in the Almadén district (Spain): implications for the genesis of the mercury deposits. *Mineralium Deposita*, 40, 115-122.
- Jébrak, M., Higueras, P.L., Marcoux, E. y Lorenzo, S. 2002. Geology and geochemistry of high-grade, volcanic rock-hosted, mercury mineralisation in the Nuevo Entredicho deposit, Almadén district, Spain. *Mineralium Deposita*, 37, 421-432.
- Julivert, M., Ribeiro, A. y Conde, L. 1972. *Memoria explicativa del Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares. Escala 1:1.000.000*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Leutwein, J., Saupé, F., Sonet, J. y Bouyx, E. 1970. Première mesure géochronologique en Sierra Morena: La granodiorite de Fontanosas (Ciudad Real, Espagne). *Geol. en Mijnbouw Nederl.*, 49, 297-304.
- Lorenzo Álvarez, S., Martín Herrero, D. y Valverde Fernández, M.F. 2005. *Memoria explicativa de la Hoja nº 807, Chillón. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Molina Cámara, J.M. y Fernández Carrasco, J. 1987. *Memoria explicativa de la Hoja nº 782, Valdemanco de Esteras. Mapa Geológico de España, escala 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Ortega, E. 1988. Geology and Metallogeny of the Almadén area, Centrobiberian zone, Spain. *2<sup>nd</sup> Remote Sensing European Workshop* (Bruxelles, 1986), 149-173.
- Ortega, E. y Hernández sobrino, A. 1992. The mercury deposits of the Almadén syncline, Spain. *Chronique de la Recherche Minière*, 506, 3-24.
- Ortega, E., Hernández Urroz, J. y González Lodeiro, F. 1988. Distribución paleogeográfica y control estructural de los materiales anteordovícicos en la parte suroriental del autóctono de la zona Centrobiberica. *II Congreso Nacional de Geología*, Granada.
- Palero, F.J. y Lorenzo Álvarez, S. 2008. Mineralizaciones de mercurio en la región de Almadén. En: García Cortés, A. (Ed.), *Contextos Geológicos Españoles. Una aproximación al patrimonio geológico español de relevancia internacional*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Roiz, J.M. 1979. *La estructura y la sedimentación herciniana, en especial el Precámbrico superior, en la región de Ciudad Real-Puertollano*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Rytuba, J.J., Rye, R.O., Hernandez, A.M., Dean, J.A. y Arribas, A. 1989. Genesis of Almadén type mercury deposits, Almadén, Spain. *International Geology Congress*, Washington, 2.
- Saupé, F. 1973. La géologie du gisement de mercure d'Almadén (Province de Ciudad Real, Espagne). *Sciences de la Terre* (Nancy), *memorie* 29.
- Saupé, F. 1990. Geology of the Almadén Mercury Deposit, Province of Ciudad Real, Spain. *Economic Geology*, 85, 482-510.
- Saupé, F. y Arnold, M. 1992. Sulphur isotope geochemistry of the ores and country rocks at the Almadén mercury deposit, Ciudad Real, Spain. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 3765-3780.
- Villas, E., Lorenzo, S. y Gutiérrez-Marco, J.C. 1999. First record of a *Hirnantia* Fauna from Spain, and its contribution to the Late Ordovician paleogeography of northern Gondwana. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 89, 187-197.