

La Historia de la Minería Mexicana: El Caso del Distrito Minero de Guanajuato, Gto., México.

Francisco Javier Orozco Villaseñor¹ y Eduardo González Partida²

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Depto., de Geología.

²Centro de Geociencias, Campus UNAM, Juriquilla, A. P. 1-742 Querétaro, Qro.

E. Mail: egp@geociencias.unam.mx

Resumen

El Distrito minero Guanajuato ha sido, en determinados momentos de la historia minera mundial, un foco de atención del más alto relieve desde el siglo XIX. Consiste, principalmente, de vetas y grupos de vetas conocidos como los sistemas de: La Luz, La Sierra, El Nopal, y el más importante, la Veta Madre, en o relativamente cerca de la ciudad de Guanajuato. Esta última ciudad dio nombre al distrito y vino a ser la capital del Estado, así como un importante centro turístico internacional, gracias a sus riquezas mineras y su relevancia histórica. La producción minera del distrito supera 37,000 toneladas métricas de plata refinada y 135 de oro. Con ello, el distrito es el segundo en importancia mundial, sólo después del de Real del Monte-Pachuca, sobrepasando ambos a Cerro Rico del Potosí, en Bolivia, que fue considerada en el pasado como la región argentífera más considerable del mundo. Su descubrimiento se atribuye a unos arrieros, quienes informaron de la existencia de la veta, bautizada como San Bernabé, del sistema de La Luz. Dos años más tarde, Juan de Raya descubrió los afloramientos de la Veta Madre en lo que es hoy día la mina Rayas.

Los sistemas de vetas del distrito se orientan con patrón estructural de rumbo general NW, con variaciones locales notables. La Veta Madre ocupa una falla o zona de falla que tiene rumbo general NO45°SE, con echado, también general, de 45° al NE, y ancho que va desde insignificante hasta cerca de 90 m, con desplazamiento en el rango de 400 a 1700 m, según diferentes autores.

Hacia finales de 1960, se pensaba que el distrito había agotado sus riquezas minerales, pero nuevos estudios geológicos y renovados esfuerzos de exploración dieron como resultado el descubrimiento de los minerales básicos y preciosos del Clavo de Rayas, así como también de muy importantes cuerpos de mineral en las minas Cebada y Cedros-Las Torres, a lo largo de la Veta Madre, y unos años más tarde, mineral aurífero en mina El Cubo, en el sistema Vetas de la Sierra.

Algunos de los estudios establecen que la Veta Madre consiste de horizontes mineralizados sobrepuestos, separados por zonas estériles o empobrecidas como son: 1) el superior, con metales nativos principalmente, abarcando desde la superficie (2,350 msnm) hacia abajo, hasta la cota 2,200; 2) el inferior, con abundantes sulfosales, desde el nivel 2,200 hasta el nivel 1,700; y 3) el profundo, con sulfuros, por debajo del nivel 1,700. Este zoneamiento dio motivo a uno de los modelos hidrotermales más conocidos en el mundo minero.

Palabras Clave: Historia minera, Guanajuato, Vetas, Oro, Plata.

Abstract

The Guanajuato mining district has been a focus of attention of the higher relief at certain times of the world's mining history since the 19th century. Consists mainly of grain and grain groups known as systems: La Luz, La Sierra, El Nopal and the most important, the grain called La Madre, in or relatively near the city of Guanajuato. The latter city gave name to the district and came to be the capital of the State, as well as an important international tourist centre, thanks to its mining riches and historical relevance. Mining production district exceeds 37,000 metric tons of refined silver and gold 135. This district is the second in global importance, only after the of Real of Monte-Pachuca, surpassing both Cerro Rico de Potosi, in Bolivia, which was considered in the past as the most significant silver region of the world. Its discovery is attributed to a few drovers, who reported the existence of the grain, known as San Bernabé, La Luz system. Two years later, Juan de Raya discovered the outcrops of the mother lode in what is today the mine stripes.

Veins of the district systems are oriented with structural pattern of general direction NW, with notable local variations. The mother lode is a failure or fault zone that has heading general NO45 °, with cast, also general, from 45 ° to the NE, and wide ranging from insignificant to about 90 m, with displacement in the range from 400 to 1700 m, according to different authors.

Towards the end of the 1960's, it was thought that the district had exhausted their mineral wealth, but new geological studies and renewed exploration efforts resulted in the discovery of basic and precious minerals of striped nail, as well as of very important bodies of ore in barley and Cedars - Las Torres, throughout the mother lode mine, and a few years later, gold-bearing ore in El Cubo mine in the veins of the saw system.

Some of the studies establish that the mother lode consists of mineralized horizons onlays, separated by sterile or impoverished areas such as: 1) superior, with native metals mainly, spanning from the surface (2,350 m) down, up to the 2,200 level; (2) the lower, with abundant Sulfosalts from the 2,200 level up to the 1,700 level; and (3) the deep, with sulfides, below the 1,700 level. This zoning gave rise to one of the most known in the mining world hydrothermal models.

Keywords: History mining, veins, gold, silver.

Generalidades

La reciente inmoderada apreciación de los metales preciosos -(podríamos decir que descomunal en el caso del oro)- ha llevado el valor de mercado de éstos, a niveles históricos, impensables hasta hace unos cuantos años, impactando enormemente en la actividad geológico-minera a nivel mundial. La demanda ha obligado al desarrollo de nuevas técnicas tanto de exploración y explotación, como de evaluación de nuevos y antiguos distritos y fundos mineros y así, se ha impulsado el refinamiento de los conocimientos teóricos sobre la formación de los yacimientos minerales, de la alteración que los acompaña e identifica, y de todos los aspectos inherentes a ellos. Hasta los mismos instrumentos y equipo científico de detección o medición, utilizados en la exploración, ya sea en el campo o en el laboratorio, se han sofisticado a tal grado que su empleo para aplicar en elementos traza, inclusiones, isótopos estables o radioactivos, o en cualquier otro aspecto que pudiera evidenciar la existencia de minerales susceptibles de explotarse, ha redundado en hallazgos de suma importancia, haciéndose indispensable su uso en campañas de exploración “modernas”.

Como consecuencia lógica, el conocimiento de los yacimientos minerales ha mejorado, siendo el de los epitermales el tipo que se ha visto más beneficiado ya que de ellos proviene la más importante contribución a la producción total del oro y de la plata. Conceptos y modelos tales como el de los sistemas geotermales fósiles o activos, o del depósito de metales por cualquiera de los mecanismos de ebullición, efervescencia o dilución de fluidos, se han aplicado con éxito para determinar profundidades óptimas de productividad, al igual que algunos criterios como el de la clasificación de estos depósitos en los grupos de sulfuración alta, baja o intermedia, que permiten distinguir cuando algún prospecto en particular es potencialmente mayor productor de oro o de plata.

En cuanto a la existencia de yacimientos de este tipo, no cabe duda de que México es un país privilegiado; de sus minas ha salido -(según la opinión de varios expertos en el tema)- más de la mitad de la plata que hoy circula en el mundo, y muy substancial porción de la de oro. A principios del siglo XIX, Humboldt escribió, maravillado, sobre la riqueza de las minas que había conocido en nuestro país, destacando que: “in Nueva España there were 17 mineralized ditricks that contained 3,000 mines”(Clark y Salas, 2008). Posteriormente, Cecil Rhodes afirmaría que: “the richest mining countries in the world are Mexico, Perú and Bolivia,

especially México”. Son muy numerosos los distritos mineros mexicanos que descuellan a nivel mundial como productores de la mayor importancia.

La historia de la minería mexicana se remonta quizás a unos 1,400 años atrás; en Simojo-Vel, Chiapas, cerca de Palenque, hacia esa época ya se extraía ámbar para usarse como piedra preciosa. Además, se han encontrado evidencias de la existencia de talleres de orfebrería en las cercanías de Monte Albán, Oaxaca, que datan de ~ 800 a.C, siendo el origen probable de los metales, el placer de Tepehuanes (Clark y Salas 2008). Aproximadamente entre los años 800 a 1500, la minería pre-colonial era algo común en los ahora distritos de Taxco, Pachuca-Real del Monte, Zimapán, Tlalpujahua y Sultepec (Orozco 2014). Con la llegada de los españoles la actividad minera se expandió de manera extraordinaria, pues era tal su ambición de riquezas, que muy poco tiempo después de la conquista de México, en 1521, comenzó su labor de explorar el enorme territorio que se abría ante ellos, en busca de las riquezas que, de acuerdo con las leyendas, estaban en ciudades míticas donde el oro y la plata eran artículos tan comunes que se usaban como materiales de construcción e inclusive, como pavimento.

Inicios de la minería mexicana.

El mismo año de la conquista (1521) se descubrió plata en Chico, Hgo., y se empezó a explotar a mayor escala en Taxco; lo mismo se hizo en Sultepec para 1523, en Pachuca en 1524 y en Tlalpujahua en 1525. En 1531 se descubrió Mazapil, en Zacatecas; en 1534, Nombre de Dios, en Zacualpan, Edo. de México; poco antes de 1537, Real de Guachinango, en Ameca, Jal.; en 1538, Los Leones y Santa Isabel en Charcas, SLP.; en 1544, Santa Bárbara, en Chih.; en 1546, San Martín, Albarrada de San Benito, Pánico y San Juan Bernabé, en Zac., y en 1548, vendrían a sumarse Bolaños, en Jal., Alvarado y Veta Grande, en Zac., y San Bernabé, en La Luz, Guanajuato (Clark y Salas, 2008). La lista de descubrimientos resultaría enorme si pretendiéramos abarcarla completa pero, no siendo ese nuestro propósito, nos bastará con lo consignado para resaltar la celeridad con que se llevó a cabo la exploración minera en nuestro país y los resultados que arrojó.

La fama de México como productor de metales preciosos ha atraído de tal modo el interés científico y económico mundiales, que numerosos y eminentes personajes, además de instituciones,

tanto extranjeros como nacionales, han contribuido al conocimiento de sus características geológico-mineras; los trabajos no sólo han beneficiado el conocimiento sino también orientado el criterio de numerosos inversionistas. Entre los informes y estudios más destacados habremos de citar los que recientemente refiere Orozco (2014): [Humboldt (1804), Sonnenschmidt (1810), Humboldt (1823), Burkart (1832), Dupont (1843), Arenas (1853), Russell (1854), Hall (1854), Palmarejo and Mexican Gold Fields Ltd. (1898), American Institute of Mining Engineers (1901), Southworth (1905), Burckardt (1905, etc.) y Bostford (1909)]. También se harían presentes en México, a principios del pasado siglo, los hermanos Guggenheim, y el geólogo minero Emmons.

La segunda mitad del siglo pasado, y en particular sus últimos 30 años, resultarían pródigos en estudios geológico-mineros de los distritos mexicanos más notables; numerosos estudiantes estadounidenses de postgrado –(y también algunos de otras nacionalidades)-, seleccionarían como objetivos de investigación algunos de tales distritos, para lograr sus grados de maestría o doctorado, y lo mismo se puede decir del número creciente de aspirantes mexicanos a grados académicos superiores, así como de los investigadores, especialistas en el ramo, que se han venido a incorporar en las plazas de investigación y docencia que se han creado desde tales fechas, en nuestras universidades. Las aportaciones al conocimiento de las provincias metalogénicas de México han sido numerosas; algunas de excepcional calidad.

El Distrito minero Guanajuato.

El distrito minero Guanajuato [figura 1 (tomada de Orozco 2014)], que es el que nos ocupa, ha sido, en determinados momentos de la historia minera mundial, un foco de atención del más alto relieve; algunas de las bonanzas encontradas en sus vetas han hecho la fortuna –(enorme)- de los individuos, familias o compañías diversas, poseedoras de los derechos de explotación en tales momentos. Por ello ha recibido también la atención especial de numerosos personajes, entre ellos, durante el siglo XIX, el ya citado von Humboldt y el prominente minero John Hays Hammond que comentaría sobre el distrito: “the district of Guanajuato is the most thoroughly mineralized zone in the known world for gold and silver” Orozco (2014), y durante el siglo recién pasado, además de los ya nombrados destacan: Wandke y Martínez (1928), Wisser (1928), Guiza et al., (1949), Wilson, et al., (1950), Edwards

(1955), Echegoyén (1970), Petruck y Owens (1974), Gross (1975), Buchanan (1979, 1980 y 1981), Randall (1978, 1979, 1982, 1987,1989, 1990^a, b, y 2002), Nelson (1981), Mango (1988, et al., 1991 y 1992). En el siglo presente podríamos mencionar los trabajos de: Davis (2002), Abeyta (2003) y Moncada (2008). No se podría omitir hacer mención de los trabajos de los eminentes investigadores, principalmente de la UNAM, quienes desde los años 80’s hasta la fecha han contribuido de manera extraordinaria al esclarecimiento de diversos problemas geológicos en cuanto a: estratigrafía, geología estructural, edades radiométricas, paleontología, mineralogía, geología de yacimientos, Aguirre y Labarthe (2003), Aranda y Vassallo (2007), Aranda y McDowell (1998), Vasallo (1988, 1996), Vassallo y Reyes-Salas (2007), Camprubí (2003, 2006), Canet (2006, 2009 a, b) y González (1981).

Citando nuevamente a Cecil Rhodes (in Orozco 2014), acerca de los tres países de mayor riqueza minera a nivel mundial, habría que considerarse que aun y cuando la producción de plata peruana es colosal, ésta palidece al compararse con la excesivamente superior que históricamente México ha “donado” a la economía del mundo. Y, en lo particular, aunque todavía a principios del siglo pasado se consideraba que las minas argentíferas más pródigas eran las del Potosí, en Bolivia, los números –(siempre fríos)- indican otra cosa muy distinta: la cantidad total extraída de aquel distrito era, hasta el año 2,000, cercana a las 30,000 ton de plata refinada, mientras que la de Guanajuato superaba las 36,000 y la de Pachuca-Real del Monte llegaba a las 46,500 toneladas (Buchanan, 1981). Así pues, Guanajuato sigue siendo el segundo productor de plata más importante del mundo –(aunque quizás no por mucho tiempo, pues se dice que Fresnillo, en Zacatecas, ya incluido desde hace varios años en el grupo selecto de los más grandes productores de este metal, pronto se pondrá a la cabeza de todos pues su potencial de producción es, de cuando menos, el doble de lo que hay en Guanajuato)-; Así continuará la supremacía mexicana en cuanto a producción de plata, a nivel mundial.

Desde el punto de vista geológico, la riqueza minera del distrito minero Guanajuato está controlada estructuralmente, siendo tres las zonas de estructuras productoras principales: El grupo de las vetas de la Sierra, la Veta Madre y el grupo de las vetas de la Luz. De éstas, la más relevante es la Veta Madre, que puede ser seguida a lo largo de unos 16 Km, aunque hay quienes aseguran que se extiende por distancia cercana a los 26. Con

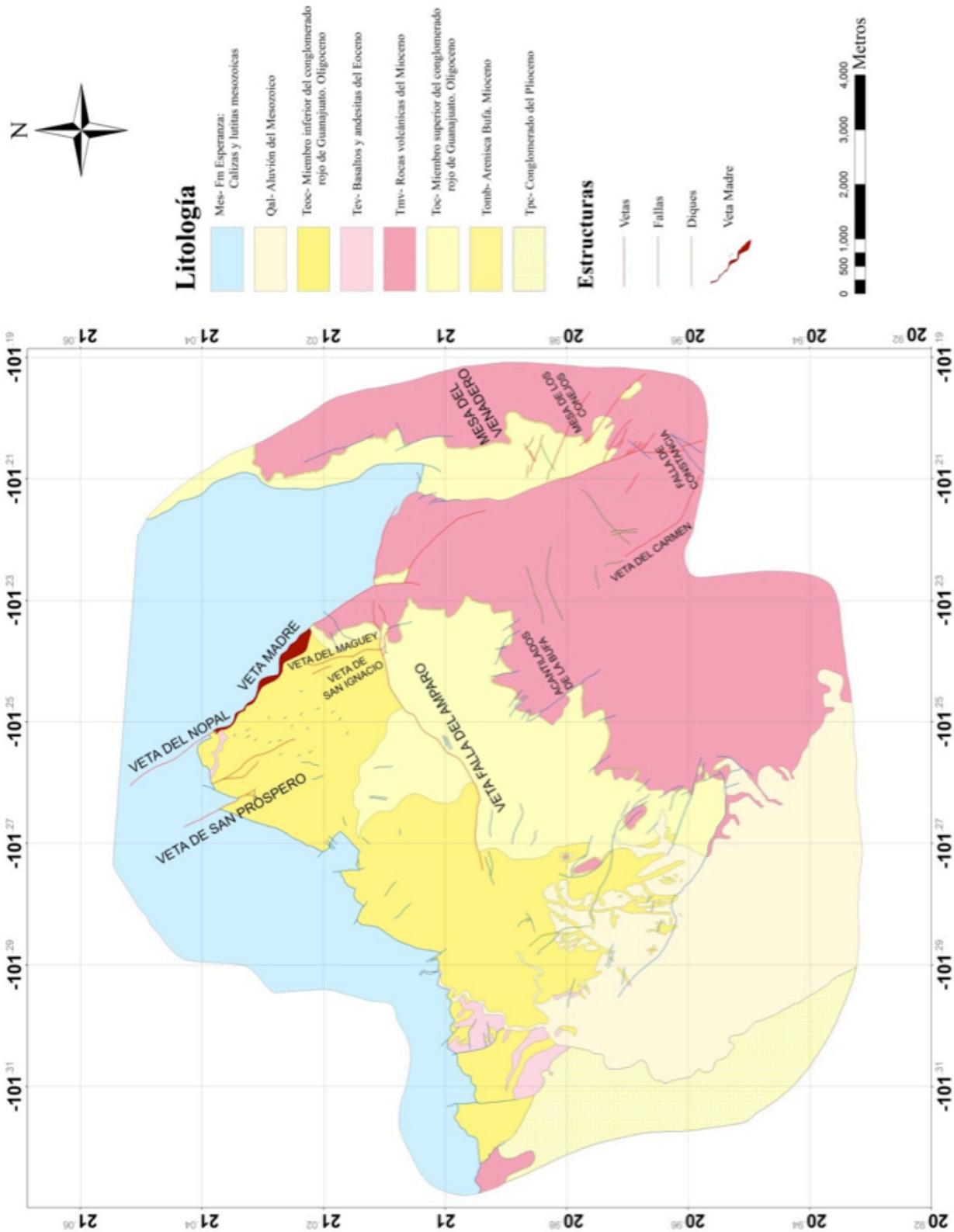


Figura 1.- Plano geológico del Distrito Minero Guanajuato, tomado de Orozco 2014.

variaciones locales menores, el rumbo general de esta veta es N45°O y su echado, también con variaciones menores, de entre 45° a 50° grados al SO. Tanto Las vetas de La Luz y “el Nopal”, (al alto de la Veta Madre) como las de la Sierra (al bajo de aquélla) presentan irregularidades en cuanto a rumbos y echados, y también en sus anchos y longitudes. Además hay diferencias en cuanto a mineralogía, proporción Ag:Au en cada subsistema, con respecto a los otros, así como en otros aspectos que comentaremos más adelante.

Estudios geológico-mineros.

Mucho se ha escrito sobre este distrito minero; algunos informes han trascendido pero muchos otros se han perdido, quizás irremisiblemente. De lo que ha podido conservarse, que ha llegado a nuestras manos y que tiene cierto mérito, comentaremos brevemente, dividiendo en varios grupos los documentos, según la época a que pertenezcan:

a) Informes pioneros (1804 – 1909).

Se reconoce a Alexander von Humboldt (Orozco 2014) como la primera autoridad en el campo de la minería que escribiera sobre las características del distrito. Su más valiosa aportación fue la de consignar que los cuerpos de mineral dentro de la Veta Madre tenían características mineralógicas diagnósticas que derivaban de la profundidad a la que se encontraban y los agrupó en dos tipos: 1) los del nivel superior que llegaban desde la superficie hasta la cota 2,130 msnm, caracterizados por la presencia de plata nativa y de ciertas sulfosales y, 2) los de la parte inferior, por debajo de la cota señalada, en los que predominaban los sulfuros de plata, como especie económica principal. Referencias posteriores incluyen la de Ponciano Aguilar quien, en 1883 fue comisionado por el gobierno de la República. Encabezó un grupo de especialistas para elaborar un mapa geológico y una sección transversal y la de Monroy en 1888, quien, también por encomienda del Gobierno hizo un estudio muy completo, abarcando aspectos geográficos, históricos, estadísticos y geológicos del distrito. Aunque no hemos tenido acceso a estos documentos, por las descripciones sabemos que no abordan el tema del origen de los yacimientos.

b) Estudios geológicos diversos (1909 – 1971).

Bostford en 1909 (in Orozco 2014) atribuye la mineralización a cuerpos de roca granítica aislados, que aparecen en los flancos de la

Veta Madre. Wandke y Martínez (1928) concuerdan con lo anterior y sugieren que el emplazamiento de la mineralización estuvo controlado por las condiciones de temperatura y presión existentes. Informan, además, que en las minas Sirena, Rayas y Valenciana es mayor la presencia de esfalerita y galena, comparativamente con las demás del distrito. Guiza et. al., (1949) opinan que la mineralización de metálicos pudo haber sido originada por los diques andesíticos (aunque también los hay félsicos) que son comunes en las cercanías de Cedro y Calderones, “a los que no se les ha puesto mucha atención”. Un dique de esta composición, denominado “micro-brecha andesítica” puede observarse en el cruce al alto, del nivel 390, a un lado del clavo de Rayas. Wilson et al., (1950), con base en estudios de inclusiones fluidas, determinaron la temperatura del depósito en la Veta Madre, siendo ésta, de unos 254 °C, sin aportar ideas acerca de su origen, aunque opinan que eran los mismos fluidos que dieron origen al cuarzo amatista, lo cual es incorrecto. Consignan también haber encontrado el mineral argirodita (Ag₈GeS₆) siendo, quizás los primeros y únicos en mencionarlo. Edwards (1955), en su detallado estudio sobre el Conglomerado Rojo de Guanajuato, señala que éste aparece cortado tanto por cuerpos de granito como de diorita y, siendo el conglomerado del Terciario temprano, diorita y granito serían, obviamente, pre-terciarios; en consecuencia, el granito no podría ser la fuente de la mineralización, como interpretaron previamente Wandke y Martínez (1928), con quienes discrepa este autor. Sobre el particular nos inclinamos a pensar, coincidiendo con Aranda-Gómez y Vasallo (2007) que ambos trabajos se refieren a rocas distintas; las encontradas en el conglomerado son más antiguas, quizás parte del intrusivo Comanja, o bien, de fuentes no identificadas. Las rocas a las que parecen referirse Wandke y Martínez son más jóvenes y aparecen en la vecindad de la Veta Madre; en nuestra opinión, podrían estar relacionados con los cuerpos de riolita sub-aérea que se encuentran en varios lugares dentro de la veta. Velásquez (1964), sin referirse al origen de la mineralización, señala (no sabemos con qué bases) que los cuerpos son “epigenéticos”, afectados por reemplazamiento, que fueron formados porque no alcanzaron temperatura de 250 °C”. Establece la relación paragenética siguiente: Primero, la alteración (propilítica y albitización) seguida por piritita y calcita y después, de manera simultánea, se habrían depositado calcopiritita, esfalerita y galena, terminando con argentita, “que contiene oro nativo” (figura 2). Pronostica, además, de nueva cuenta sin mencionar

A



B



Figura 2.- a).- Ejemplar de a, de mina Cebada, es eléctrum y b), Ejemplar de mina Rayas consiste sólo de plata nativa. Ambos “changuitos o alambres” se forman en drusas o cavidades; en este caso, posteriormente a la formación de las estructuras de recubrimiento denominadas “crestas de gallo o dientes de perro”.

sus bases, que “la zona de la mina El Cubo, al alto de la veta Villalpando, es un lugar con buenas posibilidades económicas”, algo que resultaría cierto años después. Finalmente, este autor nos ofrece un dato interesante acerca de la riqueza aurífera de las minas El Cubo y San Nicolás: los valores “en el Cubo superaban los 500 g de Ag y los 10 g de Au, mientras que en San Nicolás, entre los años 40’s y 50’s, en algunos lugares se extraían minerales con contenido de oro superior a 1 Kg/ton!. González, R. J. (1965) sin mencionar fundamentos, establece que la mineralización de la Veta Madre, la veta del Carmen y las de La Luz, así como las vetas de esfalerita y galena en León Gto., deben su génesis al intrusivo que subyace tales distritos (“no nos cabe duda de que los procesos genéticos de su mineralización tienen origen en dicho intrusivo”), refiriéndose al intrusivo Comanja. Recomienda tener en cuenta las rocas riolíticas pues todos los yacimientos mencionados “tienen su origen íntimamente asociado a rocas riolíticas”.

c) Estudios contemporáneos (1971 – 2000).

El primer trabajo sobre el distrito de Guanajuato, en el que se incorporan métodos y tecnologías modernos, es el de Taylor (1971) quién, a partir de geoquímica y varias técnicas microscópicas concluye que la secuencia volcánica terciaria de la zona, probablemente se derivó de un magma basáltico rico en alúmina y potasio por diferenciación normal, y que tales lavas pudieron haber sido la fuente de los yacimientos minerales. Con base en un estudio de isótopos de azufre que llevó a cabo en ejemplares de pirita, galena, esfalerita y argentita, deduce que la fuente de la mineralización debe ser magmática (al menos para pirita y galena). La dispersión observada en los valores para la argentita, le sugiere una fuente biogénica. Establece también la existencia de un gradiente de temperatura que disminuye verticalmente hacia la superficie y hacia el reliz del alto, durante la precipitación de las menas, con base en la variación de ortoclase en adularia así como de las proporciones Au/Ag. Otros datos de interés, mencionados por el autor, incluyen: 1) la presencia de plomo anómalo (Joplin) en la Veta Madre, 2) la edad de 27.4 ± 0.4 Ma, para una adularia, mediante el método K-Ar, 3) que los minerales de selenio presentes indican que el ambiente fue oxidante, 4) que tales minerales indican formación a partir de soluciones alcalinas, 5) que lo anterior es también aplicable para la calcita, 6) que, además, lo anterior es indicio de un ambiente deficiente en azufre, 7) que la presencia de sulfosales también indica deficiencia de azufre y, 8) que hay

evidencias de más de un período de mineralización en el distrito.

Petruck y Owens(1974) sólo hacen una descripción mineralógica de ejemplares de tres minas -“estratégicamente seleccionadas”- del distrito (Valenciana y Cebada, en las partes central y noroeste de la Veta Madre, respectivamente y, Peregrina, en las vetas de la Sierra); las muestras son representativas de los tres horizontes en que, después de Humboldt, se ha dividido a la Veta Madre, hacia la profundidad. Llegan a concluir que: a) la mineralogía es muy similar con respecto a las zonas que representan, b) el mineral de plata más abundante es acantita, aunque: “the morphology of argentite is often preserved in ores that were deposited at a high temperature”. Otras aportaciones destacables de este trabajo son: 1) encontraron nontronita ($H_4Fe_2Si_2O_9$) en Peregrina, 2) encontraron eléctrum en todas las muestras, 3) la composición media del eléctrum es 55% de Au y 45 % de Ag, aunque en Cebada varía el oro entre 26 a 55 %; 4) la composición porcentual de la esfalerita del horizonte profundo es: Zn = 64.4, Fe = 0.6, Cd = 1.3, Mn = 0.4 y S = 32.6, mientras que la del horizonte intermedio es: Zn = 65.2, Fe = 0.4, Cd = 0.4, Mn = 0.3 y S = 32.7; 4) la pirargirita -(abundante en mina Peregrina)- aumenta su bajo contenido de Se hacia la superficie y, 5) el contenido de Se en el sulfuro de plata oscila entre 1.4 y 2.2 %, siendo en aguilarita de 13.4 %.

Gross (1975) con bases de: mineralogía, radiometría, isotopía y, sobre todo de análisis de datos geológicos, hace algunas conclusiones interesantes: 1) que el granito de Comanja no originó la mineralización de la Veta Madre, 2) que dicha mineralización tampoco fue producto de secreción lateral (según afirma Taylor) a partir de las aguas meteóricas que circularon por entre las lavas y tobas terciarias del distrito, 3) propone que las lutitas negras de la formación Esperanza aportaron los metales que darían lugar a los yacimientos, 4) como apoyo a lo anterior, demuestra que los valores $\delta^{34}S$ de las lutitas negras de la formación Esperanza son similares a los encontrados en los sulfuros de la Veta Madre; 5) determina que la temperatura de depósito fue ~ 320 °C hacia la cota 1,700, disminuyendo a ~ 240 °C para la cota 2,400 msnm; es decir, hay un gradiente térmico de 10 °C/100 m en la Veta Madre. Para las vetas de la Sierra, calcula el gradiente en 8 °C/100 m. 6) Para él las soluciones mineralizantes tenían carácter alcalino y fueron calentadas por arriba de los 300 °C durante el volcanismo que causara el fallamiento en el distrito, durante el Oligoceno Superior, lo que permitiría la lixiviación de los minerales a partir

de las rocas mesozoicas y su depósito posterior al moverse hacia arriba, a zonas de menores temperatura y presión. Y finalmente, 7) con base en datos de campo y trabajos de laboratorio establece que el depósito ocurrió en tres etapas.

Ruvalcaba (1976) en su tesis de licenciatura, resultado de varios años de trabajo en la mina Rayas, menciona que: 1) sin descartar la presencia de un apófisis menor, el “clavo de Rayas” no está asociado a rocas intrusivas, 2) que la abundante pirita de las lutitas negras podría ser, al menos parcialmente, autigénica, 3) que sus observaciones le sugieren que el “clavo” tuvo al menos dos etapas de mineralización, precedidas cada una de ellas, por fracturación y brechamiento y, 4) que el color verdoso de algunas rocas encajonantes en ciertas zonas mineralizadas podría indicar que los fluidos eran de origen magmático y de carácter algo ácido.

Randall (1978, 1979, 1982, 1987, 1990^{a,b}) aporta: 1) coincidiendo con Gross (1975), en que la mineralización de plata proviene de las lutitas negras mesozoicas, 2) también coincide con Buchanan en que el mecanismo de la precipitación de la mineralización fue ebullición, 3) que aunque existen redes de vetas, los cuerpos de mineral más comunes en la Veta Madre son clavos discontinuos, 4) que la más larga de las discontinuidades (~ 2 Km) entre clavos es la que hay entre las minas Sirena y Las Torres, 5) que a lo largo de la Veta Madre, hay tres localidades (Sirena, Rayas y Valenciana) con amplias zonas de brecha, con características similares, que contienen pequeñas cantidades de metales base (1 a 3 %), 6) que las alteraciones en la Veta Madre son similares a las del modelo propuesto por Lowell y Guilbert para los pórfidos de cobre y, 7) hace mención de la presencia de bloques de pórfido diorítico y de una “rara latita porfirítica,” intensamente alterados, entre los clavos.

Buchanan (1979). Las aportaciones de este autor, al conocimiento del distrito Guanajuato, luego multicitado en la literatura especializada, son las siguientes: 1) Alteración.- Sobre este aspecto, tratado previamente por Taylor (1975) y Randall (1979), hay que destacar dos aspectos: a) permite guiar los programas de exploración y, b) se puede utilizar como control en la localización de cuerpos mineralizados, siendo la filica y la argílica, las más significativas. 2) Depósito de menas.- A partir de su estudio de inclusiones fluidas determinó que: a) el depósito de minerales en mina Las Torres se efectuó en el rango de temperaturas de 225 a 235 °C, b) los minerales de ganga (cuarzo y calcita) se formaron a temperatura superior a los 240 °C, c) el mecanismo

de depósito fue ebullición, d) dicho mecanismo se evidencia con proporciones líquido-vapor variables, en las inclusiones fluidas y, 3) Composición de los fluidos.- El autor identifica tres períodos de mineralización, cada uno de ellos con valores de salinidad diferentes alcanzando: en la etapa de pre-mineralización, 29,200 ppm; 5,260 ppm y 26,000 ppm en dos etapas de mineralización que identifica como tipos Bufo y Loseros, respectivamente, y, de 6,910 ppm, para la etapa de post-mineralización. Deduce además, que durante la etapa principal de la mineralización, los fluidos fueron pobres en metales base y en H₂S, precipitando de ellos cuarzo y calcita, más no sulfuros. Esto le sugiere que los fluidos: a) tuvieron fuentes diferentes o, b) que la ebullición hubiera causado la precipitación de ambos tipos de minerales, la de los metales básicos a profundidad y la de metales preciosos en los niveles superiores. 4) Nivel de ebullición.- Establece que el mecanismo de ebullición que originó el depósito de la mena ocurrió a la elevación correspondiente al nivel 345 de la mina Rayas (~1,700 msnm).

Buchanan (1981) extrapola sus observaciones de Guanajuato al sureste de USA, enfatizando que: 1) importante proporción de vetas de metales preciosos alojados en rocas volcánicas presentan rasgos físico-químicos diagnósticos de su origen, 2) tales rocas son principalmente andesitas terciarias, calcialcalinas, y riolitas en menor proporción, 3) una zona inferior, mineralizada con sulfuros, queda separada de otra superior con metales preciosos, por un horizonte en el que habría ocurrido ebullición (ver figuras 3 y 4); 4) en estos depósitos hay, casi siempre, minerales de alteración que denotan bajo pH de los fluidos y su formación a temperaturas superiores a 200 °C; 5) el mecanismo implica que los fluidos, lo mismo que el nivel de ebullición no pueden ser constantes, 6) la ebullición en zonas profundas ocurriría gracias a fracturamiento o brechamiento de la roca encajonante, 7) lo anterior sería causa de fluctuaciones episódicas de temperatura y desprendimiento de los gases contenidos en las soluciones y, 8) la ebullición ocasiona el zoneamiento vertical tan común en este tipo de yacimientos (figura 4).

Frankenberg (1988) establece que: 1) la mineralogía del horizonte profundo de la mina Rayas, en cuanto a sulfuros, consiste sólo de: esfalerita, calcopirita y galena, pero todos en proporción significativamente mayor de lo que previamente habían establecido Petruck y Owens; 2) el principal mineral de plata en esta zona es acantita y no polibasita o galena argentífera “as others have speculated”, 3) la galena es muy pobremente argentífera,

<u>Minerales no-metálicos</u>	<u>Minerales metálicos</u>
Óxidos:	Sulfuros y sulfosales:
cuarzo alfa	arsenopirita
cuarzo amatista	calcopirita
calcedonia	cinabrio
limonitas	esfalerita
Silicatos:	estibnita
apofilita	galena
asbestos	guanajuatita
chabazita	marcasita
datolita	molibdenita
estilbita	pirita
laumontita	tetraedrita
valencianita	Minerales de oro:
Carbonatos:	oro nativo
ankerita:	naumannita aurífera
calcita	Minerales de plata:
dolomita	aguilarita
rodocrosita	argentita
siderita	estefanita
Sulfatos:	miargirita
barita	naumanita
celestita	pirargirita
epsomita	plata nativa
halotriquita	polibasita
selenita	Productos de oxidación:
yeso	cerargirita
Arcillas:	embolita
clorita	marcasita
saponita	petchblenda
	psilomelano

Figura 3.- Relación de los minerales del distrito minero Guanajuato.

cuando contiene algo de plata y, 4) la formación de los minerales de mena ocurrió en dos etapas.

Mango (1988, 1991 y 1992) concluye, con base en sus estudios de inclusiones y de isotopía que: 1) la dilución de soluciones hidrotermales con agua meteórica ocasionó la precipitación de los metales, 2) que las soluciones mineralizantes eran ligeramente alcalinas ($\text{pH} \approx 6.3$), 3) que dichas soluciones tenían baja salinidad ($< 1\%$ en peso, de NaCl equivalente), 4) que la temperatura media de depósito fue moderadamente alta (270°C), 5) que, considerando las proporciones constantes de agua/vapor en las inclusiones, el mecanismo de depósito no pudo haber sido la ebullición, 6) que esta hipótesis se refuerza con los datos de isótopos de O, pues $\delta^{18}\text{O} = +1.91\%$, valor que sugiere la mezcla de soluciones de origen magmático con agua meteórica ($\delta^{18}\text{O} = -10\%$); 7) que al permanecer constantes los valores de isótopos de plomo, se debe inferir una sola fuente para los metales, la cual sería cortical, lo cual se refuerza con la composición isotópica del carbono; 8) que la disminución de la fugacidad del oxígeno hacia la superficie indica que una solución clorurada y no una de sulfuros complejos fue el principal agente transportador para Ag-Pb-Cu, 9) que, considerando que el oro es más estable en soluciones de sulfuros complejos y que éstos incrementan su estabilidad con el decremento de la $f\text{O}_2$, la modesta cantidad de oro en mina Rayas se atribuye a su transporte en forma de sulfuro complejo; 10) que la mina Rayas, con sus altos valores de plata y la presencia de metales base en la parte inferior puede representar un sistema en tres horizontes, apilados verticalmente, graduando desde un cuerpo rico en plata y metales básicos en el fondo, hasta uno rico en oro en la parte superior; 11) que las altas concentraciones de Au encontradas en mina El Cubo son representativas de la existencia de ese horizonte que pudo haber existido en Rayas si no hubiera sido erosionado, 12) que la cubierta erosionada en la superficie de mina Rayas fue de unos 850 m de roca y, 13) que aún es posible llegar a descubrir cuerpos de mineral de los tipos que se encuentran tanto en la zona profunda, como superficiales.

Randall (1990b) considera a la Veta Madre como una antigua zona de falla con períodos de revitalización que han afectado a las estructuras subordinadas en el área de El Cubo que: “may some day become important to local mine exploration”. Algunas de estas estructuras que llegaron a considerarse como posteriores a la mineralización, por sus rumbos diferentes al general, han llegado a ser las más productivas en cuanto a metales

preciosos. Propone que: “the original fractures were almost contemporaneous with rhyolite emplacement (¿Chichíndaro?), but the major faulting and mineralization are later”. Sigue apoyando la idea de Gross (1975), acerca del origen de la plata a partir de las lutitas mesozoicas, pero aduce que la mineralización de oro proviene de la formación La Luz. Querol et al., (1991) menciona que, la Veta Madre podría tener una longitud total de unos 100 Km.

Mango (1992) reconoce que: 1) la salinidad de las soluciones hidrotermales, causantes de la mineralización en la Veta Madre alcanzaron valores hasta de 3% , en peso, de NaCl equivalente, 2) que las soluciones responsables del depósito de esfalerita de la etapa inicial fueron más calientes ($\sim 290^\circ\text{C}$) y más salinas (2.5% NaCl eq.), 3) que la carencia de alteración por volátiles ácidos, encima de los horizontes mineralizados, así como los altos contenidos de plata hablan en contra de la posibilidad de ebullición; 4) que el depósito de Ag y otros metales a partir de cloruros complejos pudo haber sido función de incremento en el pH o consecuencia de la alteración de la roca encajonante, o de la temperatura decreciente; 5) que su modelo para explicar la mineralización en la Veta Madre incluye agua meteórica infiltrándose profundamente, calentándose, intercambiando isótopos con tales rocas y, quizás, lixivando de ellas Ag, Cu, Zn y otros componentes de mena, para ser canalizadas luego por las fracturas hacia la superficie; 6) un cuerpo magmático en la profundidad habría provisto calor al sistema, lo mismo que un componente de agua magmática, además del Pb y otros metales y, 7) el descenso de temperatura de los, así como el incremento en la fugacidad de oxígeno y el pH, habrían ocasionado el depósito.

Martínez-M. (1993) menciona que hace 29 Ma la región estaba dominada por un ambiente extensional que provocó diapirismo del manto, lo que daría como resultado la formación de juegos de fallas en direcciones NO, NE y O-NO, a lo largo de las cuales se emplazarían domos exógenos y cuerpos subvolcánicos de la serie Chichíndaro, a la cual se identifica como la fuente de calor que removilizó los metales del basamento para su concentración y depósito en las estructuras cenozoicas.

Lester (1994), tratando de probar la suposición de Randall (1979) de que el intrusivo Peregrina graduaba imperceptiblemente a los flujos Chichíndaro y que estas rocas eran el origen de la mineralización en el distrito, señala que: 1) hay diferencias mineralógicas muy notables entre ellas, 2) con esa base debe pensarse que cada una de las formaciones fue emplazada en

diferentes pulsos de actividad, 3) los análisis geoquímicos indican similitud tanto en los elementos mayores como en los traza, 4) sin ser concluyente, la evidencia sugiere que el intrusivo Peregrina y la formación Chichíndaro están genéticamente relacionados, derivados del mismo magma padre y, 5) no se puede concluir que el magma que dio origen a ambas formaciones sea también el origen de la mineralización.

Randall et al., (1994) proponen que la secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno en el distrito están relacionadas con un centro magmático-plutónico que exhibe las características de una caldera, la cual estaría genéticamente relacionada con las menas del distrito. La estructura, de unos 16 Km de diámetro aparece muy pobremente definida como resultado de haber sufrido intensa erosión.

Larson en 1995 (in Orozco 2014), con base en sus estudios petrogenéticos, divide la secuencia volcánica, sobre todo con la relación Nb/Y y otros elementos traza, en dos series, una andesítica que parece haberse formado a partir de la fusión del manto superior, y la otra, riolítica, derivada de la asimilación, por parte del magma andesítico, de material de la corteza, en particular de un arco de islas mesozoico, acrecionado. El primero de dos voluminosos ciclos de magmatismo comenzaría hace unos 38 Ma, en el Oligoceno temprano, con el emplazamiento de la riolita La Bufa, seguida por la riolita piroclástica de la formación Calderones, a la cual sucederían los flujos andesíticos de la formación Cedros. El segundo ciclo comenzaría hace unos 32 Ma, produciendo las ignimbritas de la formación Chichíndaro, a las que siguieron los emplazamientos de domos riolíticos y del intrusivo Peregrina. Estas secuencias habrían provenido de una cámara magmática zonada, pseudo-estratificada a causa de diferencias de densidad del magma. El último pulso de magmatismo –(sugiere el autor)- pudo haberse debido a una extensión cortical.

También habla de la existencia de otros cuerpos magmáticos, [a los que Orozco (1983) se refiere como “los intrusivos de Rayas” o como riolitas sub-volcánicas], diciendo que son pequeños, complejos y tardíos, composicionalmente variables, y variando desde lo basáltico hasta lo dacítico, a pesar de que los elementos traza indican que son consanguíneos; uno de tales cuerpos parece extenderse, como dique, desde Rayas hasta Sirena.

Con respecto al origen de la mineralización en el distrito, el autor menciona que: 1) Se nota estrecha relación entre la

ocurrencia de arcos magmáticos del Mesozoico-Cenozoico y la ocurrencia de mineralización de Au-Ag, en México; 2) lo anterior sugiere la existencia de un control cortical sobre la mineralización de Au-Ag, 3) que, siendo la serie riolítica producto (al menos parcialmente) de asimilación de la corteza inferior, es obvio que interactuó con litologías profundas; 4) que lo anterior sugiere que esta serie riolítica movilizó Ag y Au de la profundidad, 5) que de tal magma se derivarían los responsables de la formación de los yacimientos.

Así pues, el magma padre de la formación Chichíndaro habría aportado el Au y Ag de los yacimientos, aunque: 6) la zona más rica del distrito (minas Rayas, Cata y Valenciana) presenta relaciones temporal y espacial con uno de los últimos pulsos del volcanismo Oligocénico; el que dio origen a los “intrusivos de Rayas”, 7) estos “intrusivos” parecen ser el centro de un paleosistema hidrotermal y al parecer, también representan una fase de actividad ígnea tardía, pero de pre-mineralización 8) el análisis de elementos traza muestra que los “intrusivos de Rayas” no son equivalentes a las rocas del sistema Peregrina-Chichíndaro.

Labarthe et al (1995, 1982) y Álvarez-M. (1997) señalan que: 1) la geometría de las cabalgaduras presentes en el distrito corresponden a un modelo de subducción de un segmento oceánico de la placa de Norteamérica, por debajo de la placa Paleopacífica, 2) varios distritos mineros de importancia se encuentran localizados sobre complejos similares, 3) es muy posible que haya habido aporte de elementos metálicos desde el basamento al sistema hidrotermal que dio origen a los yacimientos del distrito, 4) los habrían sido movilizados por el vulcanismo cenozoico, 5) existe asociación espacial de los domos de la zona y la riolita Chichíndaro con la mineralización, 6) puede especularse que el sistema hidrotermal formado pudo lixiviar y transportar metales del terreno Guerrero para depositarlos en las estructuras del distrito, 7) el patrón estructural en el distrito consiste de una serie de fallas escalonadas que ocasionaron brechamiento, 8) es notable cierta asociación entre mineralización de reemplazamiento con cuerpos pequeños de rocas riolíticas, 9) algunas zonas de silicificación podrían corresponder a cuerpos ígneos sub-volcánicos, 10) un fallamiento a rumbo afectó a la Veta Madre, originando la formación de lazos sigmoides y un gran desplazamiento, 11) estos lazos sigmoides fueron aprovechados por la riolita Chichíndaro para emplazarse y formar domos exógenos y, 12) la “caldera de Randall” no existe.

d) Estudios recientes (2000 – 2014).

En un trabajo con el que intenta apoyar la existencia de la caldera propuesta por Randall, Bet.al., (2002) concluye no muy convincentemente que encuentra evidencia de una posible caldera, pero del tipo de “puerta de entrappe” (trap door caldera) formada por dos o más fases de subsidencia. En otra sección del estudio ofrece un modelo sobre el fenómeno y explica, sobre las fallas limitantes de la estructura: “Ring faults not exposed at the surface can some times to be inferred”.... Y más adelante, expresa que: “most of the ring faults are not seen at the surface or subsurface”. Todavía más adelante dice que: “It is very possible that additional faulting due to resurgence has disrupted the original appearance of the caldera”. Cabe hacer aquí, de nueva cuenta, la mención de Labarthe et al, (1995) expertos en volcanología, sobre el particular: “la caldera de Randall no existe”. Abeyta (2003), en su estudio en mina El Cubo, específicamente en la veta San Nicolás (ley media de Au: 6.8 g/ton y de Ag: 141 g/ton) nos ofrece la siguiente información que puede utilizarse para hacer comparaciones: 1) las temperaturas de homogenización en esta veta estuvieron del rango de 172 a 182 °C, 2) la salinidad determinada para estas inclusiones estuvo entre 0 y 2.95 en peso, de Na Cl equivalente; 3) la coexistencia de inclusiones con dominio de líquido o vapor, indistintamente, así como la presencia de calcita hojosa y el intercrecimiento de eléctrum indican que hubo ebullición en el sistema; 4) el análisis de los gases presentes en las inclusiones indican que los fluidos fueron de origen meteórico con la posible contribución de un componente menor de fluido magmático; 5) la mineralización de oro habría ocurrido como respuesta a una catastrófica caída de presión y por ebullición extrema y, 6) la intensa ebullición, acompañada por la presencia de suficiente H₂S, resultó crucial para el transporte y depósito de más de 10 ppm de Au. Orozco (2014), expresa que: 1) las expectativas de encontrar nuevos cuerpos de mineral parecen limitarse a clavos aislados profundos, 2) los cuerpos mineralizados de la Veta Madre estarían relacionados con focos de calor a la profundidad, quizás apófisis de una masa mayor, o las rocas sub-volcánicas de afiliación calci-alcalina conocidas como los “intrusivos de Rayas”; 3) los “sombrosos” de alteración argílica encontrados en superficie serían evidencia de los focos de calor a la profundidad, 4) todos los cuerpos mineralizados dentro de la Veta Madre, en las minas Las Torres, Sirena, Rayas, Cata y Valenciana, están relacionados espacialmente con roca riolítica, y en las vetas de la Sierra, con

el intrusivo Peregrina o con la riolita Chichindaro; 5) el esquema de los tres horizontes de mineralización ya no es tan funcional; la mineralización por debajo de la cota 1,600 msnm lo invalida, al menos parcialmente. El concepto aún es válido en la exploración al establecer límites más favorables; 6) el clavo de Rayas es una brecha explosiva hidrotermal y, de acuerdo con las descripciones de Randall (1979), el de Sirena también. Ambos son diferentes al de Valenciana-Nueva Luz cuyas características lo evidencian como una brecha tectónica, 7) La profundidad de estos clavos es la apropiada para la localización de otros similares; estudios de la alteración y de inclusiones resultarían muy útiles en la exploración de nuevos cuerpos de este tipo.

Moncada (2008), a partir de un estudio de inclusiones en el que revisó los aspectos texturales del cuarzo que las contenía, observa que: 1) las leyes más altas de Ag y Au se asocian con sílice colorforme, así como con calcita hojosa y sílice de textura plumosa, aunque en éstas en grado ligeramente menor; 2) las variaciones en la proporción de vapor y líquido en las inclusiones no parece haber tenido efecto en las leyes de Au o Ag depositadas, 3) hay abundante evidencia de ebullición aún en los niveles más profundos, lo que se determinó tanto revisando los labrados, como los testigos de barrenación y, 4) estudios de inclusiones pueden ser exitosos en la exploración por depósitos epitermales de metales preciosos, ya sea en zonas “nuevas” como en lugares donde hubo explotación previa. Por otro lado, Orozco (2014) concluye que, el origen de los mineralizantes y su composición es aún motivo de controversia. Este último autor afirma que en Guanajuato, el origen de este depósitos epitermales de metales preciosos ha sido atribuido al granito de Comanja, a rocas ígneas dentro o cerca de la veta, a lixiviación a partir de lutitas de la formación Esperanza, o a otras rocas pre-existentes. Los análisis isotópicos realizados (de C, O, y S) por este autor, muestran los valores δ‰ de: a) δ¹³C = -7.9 a -13.97 ‰, con media de δ¹³C = 9.88‰, ; b) de δ¹⁸O = -14.4 a -24.53‰, con la media de δ¹⁸O = 18.78‰ y c) δ³⁴S = -4.45 a -14,3‰. Estos resultados y las relaciones de campo indican que la fuente de los mineralizantes es esencialmente magmática, con modificaciones isotópicas que ocurrieron cuando circulaban a través de, o reaccionaban con, las lutitas de la formación Esperanza, y cuando alcanzaron el nivel en que pudieron mezclarse con aguas meteóricas. También fueron importantes para la evolución de los , las condiciones de: P – T – X, Eh, pH y otros cambios físico-químicos, cuando los se alejaban de la fuente de calor, hasta que el

sistema mineralizante, probablemente subvolcánico, colapsó o cesó en su actividad, hacia la época del Terciario medio. El resultado de los análisis de inclusiones revelan que la temperatura media de depósito fue de 276 °C, con media de salinidad equivalente, de 12.76 % de peso, de NaCl, y que el depósito de mena más importante, así como también el re-equilibrio isotópico, tuvieron lugar a profundidad cercana a los 600 m .

Discusión y conclusión.

De acuerdo a la mineralogía de las menas (figura 3; tomada de Orozco 2014).- En la zona superior se han mencionado: oro y plata nativos, eléctrum, cinabrio, embolita, cerargirita y otros halogenuros de plata, seleniuros, sulfo-seleniuros y otras diversas sulfonales. En la zona inferior (intermedia) se mencionan acantita o argentita, las series argirodita-canfiendita (Wilson et al, 1950), aguilarita-naumanita, polibasita-pearcita, además de estefanita, tetraedrita y los dimorfos guanajuatita y paraguajuatita. En la zona profunda, más rica en sulfuros, hay argentita o acantita, calcopirita, esfalerita y galena, acompañados por cantidades cada vez menores, hacia la profundidad, de sulfosales. Como ya se mencionó, Petruk y Owens (1974) dividieron la mineralogía del distrito en tres tipos; uno por cada subsistema de vetas. Aunque su estudio fue muy limitado, pues sólo estudiaron ejemplares de las minas Cebada y Peregrina, hay datos de interés: la proporción oro-plata en eléctrum es 55:45 en mina Peregrina, mientras que para mina Cebada es variable, entre los rangos 25-75 y 55:45. La acantita contiene entre 1.4 y 2.2 % de Se, en tanto que la pirargirita, el mineral argentífero más abundante en mina Peregrina, contiene muy poco de este elemento. En cuanto a la composición de la esfalerita, informan que contiene 64.7 % de Zn, 0.6 % de Fe, 1.3 % de Cd, 0.4 % de Mn y 32.65 % de S, con variaciones en los contenidos de Cd-Mn. Con respecto a los minerales de alteración y ganga: En las zonas superficial y somera, abundan las arcillas de los grupos: caolinita, montmorillonita e illita, y como especies, nontronita y haloisita, además de metahaloisita; también hay clorita, calcita, dolomita, siderita, cuarzos (blanco lechoso y amatista) rodocrosita, adularia, sericita, fluorita, zeolitas, y alunita. Y como especies metálicas: pirita, arsenopirita, marcasita, y hematita. En la zona intermedia se repiten algunos minerales de las relaciones anteriores, variando solamente sus proporciones. En la parte profunda siguen siendo importantes las arcillas, clorita, cuarzo(s), adularia y sericita,

que se asocian con epidota y los metálicos pirita y pirrotita. Con respecto a el zoneamiento, a este aspecto ya se mencionó también; hay tres zonas u horizontes de mineralización; el más profundo se caracteriza por la mayor proporción de sulfuros de metales base; en la zona intermedia, la presencia de sulfosales y sulfuros de plata es lo distintivo, y en el horizonte superior, los minerales nativos, seleniuros y haluros, acompañados por carbonatos, arcillas, y más raramente sulfatos, son lo común. Los minerales de ganga y de alteración, en cambio, no presentan variaciones ni en especie ni en proporciones, a excepción quizás del cuarzo amatista que hacia la profundidad es menos abundante. Por otro lado la alteración hidrotermal, tan determinante en la exploración minera de nuestros días, por mucho tiempo no se le dio la importancia debida en el distrito: Wandke y Martínez (1928) hicieron notar que las rocas de la formación Esperanza presentaban zonas con cierta decoloración que atribuyeron a lixiviación que habrían sufrido por fluidos ácidos que percolaron por entre ellas y, aunque tales zonas estaban relacionadas con clavos mineralizados, no se les dio importancia mayor. Gómez de la Rosa (in Orozco 2014) menciona por primera vez la estrecha asociación de minerales de mena con zonas ricas en arcillas, sin que la observación tuviera aplicación. Buchanan (1979) demuestra que la alteración argílica, adecuadamente interpretada, es de la mayor importancia como guía de exploración. A partir de este autor se han hecho varios estudios sistemáticos de las alteraciones en el distrito, resultando de ellos que son muy similares en todos los cuerpos del distrito (Nelson, 1981). En seguida presentamos una relación de las características con que presentan las diversas alteraciones observadas: 1).-Propilitización; Es la alteración que alcanza mayor amplitud; se le encuentra en los márgenes de las vetas, extendiéndose por unos pocos cm, o hasta por cerca de unos 50 m. Se desarrolla mejor en el respaldo del bajo, formando halos más extensos cuando se relaciona con cuerpos mineralizados, aparentemente de manera proporcional a la magnitud de éstos. La pirita se comporta de esta manera también: mayor cantidad de pirita, mayor la zona de propilitización y más grandes los clavos mineralizados asociados; la proporción de pirita, en volumen, llega a ser hasta de 2 y 5 %. Otros minerales asociados son calcita (2 a 8 %) y epidota que disminuye en cantidad, de la profundidad hacia la superficie (Nelson, 1981). La intensidad de la cloritización parece depender de dos factores: la cantidad de minerales ferromagnesianos de la roca original, y la intensidad del fracturamiento que haya sufrido (Buchanan, 1979);

la abundancia llega a ser del 16 al 18 %. 2).- Silicificación.- Esta fue particularmente importante en la etapa previa al depósito de la mena; está relacionada espacialmente con las alteraciones de argilización y potásica, y consiste de cuarzo criptocristalino introducido por hidrotermalismo, que logró que las rocas afectadas se tornaran más frágiles para que, con los eventos tectónicos o de fallamiento posteriores, se pudieran fracturar y hasta brechar con cierta facilidad, para formar los canales por donde se moverían los fluidos mineralizadores. 3).-Alteración potásica.- No todas las rocas presentan esta alteración; es más evidente en las de las formaciones Bufo, Losero, Conglomerado Rojo y las ígneas félsicas, sobre todo si se encuentran en el respaldo del alto, donde el fracturamiento es más intenso. Los minerales esenciales de esta zona son adularia y sericita; el primero de tamaño tan fino que para asegurarse de su existencia es necesario recurrir al teñido de la roca, para evidenciar los feldespatos potásicos y diferenciarlos de los feldespatos plagioclasa sódicos. En general, el feldespato alcalino muestra alteración a illita o sericita, siendo más resistente a ella la sanidina (Buchanan, 1979). Las rocas que presentan esta alteración son más frágiles. 4).-Alteración argílica.- Todas las rocas del distrito, en mayor o menor grados, presentan esta alteración, sobre todo hacia ambos lados de las fisuras, a veces por distancia hasta de 30 m. Su presencia en forma de “sombreros” sobre la Veta, y a los lados de ésta, es claro indicio de la presencia de clavos mineralizados y hasta es posible ver como al pasar de un clavo a otro, en la zona que los separa, prácticamente no existe la alteración que sobre ellos es tan notable. Los minerales distintivos de la zona son: caolinita, que es la más conspicua, montmorillonita, haloisita y cuarzo; este último, como accesorio. De las observaciones de campo se deduce que la formación de estas zonas de alteración fue posterior al depósito de las menas. 5).-Alteración Filica. Esta otra alteración está íntimamente asociada a la anterior, llegando a encontrarse sobrepuestas ambas, aunque, por lo general, ésta envuelve a la de argilización; en mina Las Torres esto es muy notorio. La mineralogía básica consiste de sericita, illita y pirita. Se interpreta la asociación de estas alteraciones como evidencia de relación genética común, probablemente causadas durante los episodios de ebullición de los fluidos hidrotermales, por la presencia de HCl y H₂S.

Se concluye que el yacimiento del distrito de Guanajuato es de los tipos epitermal y mesotermal, y aparecen principalmente como rellenos de fisura, aunque hay también importantes zonas

con redes de vetas y chimeneas brechadas. También pueden verse zonas de reemplazamiento, sobre todo, dentro del Clavo. En general, estas últimas son de dimensiones tan reducidas que representan más bien una curiosidad dentro del distrito, en el que también se encuentran algunos ejemplos de sulfuros masivos y al menos un depósito de oro diseminado. Estos no parecen tener, por su estilo de mineralización y mineralogía, íntima relación genética con los de los cuatro sistemas de vetas a los que nos hemos venido refiriendo. Volviendo a los cuerpos de la Veta Madre, habría que señalar que, tomando en cuenta sus mineralogías, tanto la de mena, como la de ganga y la de alteración, podrían clasificarse como del tipo adularia-sericita, o dentro del grupo de sulfuración intermedia (Camprubí y Albinson, 2006), como se muestra en el modelo esquemático de la figura 4.

Parece haber acuerdo generalizado entre quienes han estudiado el distrito, acerca de los eventos geológicos que precedieron a la formación de los depósitos: los esfuerzos tectónicos de compresión, asociados al período laramídico causaron el desarrollo de altos topográficos sobre los cuales se intensificó la acción erosiva que dio como consecuencia la formación del Conglomerado. Durante el lapso de relajación de esfuerzos que siguió, las rocas fueron extensamente fracturadas y falladas y, simultáneamente, debió ocurrir la intrusión del granito de Comamja y, con aporte de éste, se habría formado un sistema hidrotermal de considerable tamaño, el cual contribuiría a una primera fase de alteración de las rocas de la región que, por Silicificación, se harían frágiles. Posteriormente vendrían las actividades volcánica y subvolcánica del Terciario a las que ya hemos hecho referencia y, de nueva cuenta, en muchos lugares a lo largo de las fallas recién formadas (entre ellas la de la Veta Madre) se formarían brechas con poca salbanda, de manera tal que los espacios abiertos que quedaron entre fragmentos, o a lo largo de los planos, significarían zonas de porosidad y permeabilidad enormes, sobre todo las que se habrían desarrollado en flexiones del rumbo, en el bloque del alto. En lo que respecta a los fluidos mineralizantes, Henley (1985) señala que “los sistemas geotérmicos de la actualidad ocupan el mismo nicho tectono-volcánico que los sistemas hidrotermales del pasado que hospedan los yacimientos epitermales de formación cercana a la superficie (0 – 1,000 m), en terrenos volcánicos del Terciario, destacando la presencia de cuerpos ígneos calcialcalinos que habrían tenido que ver con fallas en bloque o colapsos de caldera que permitirían el movimiento lateral de fluidos por

distancias considerables, de al menos 5 Km (ver esquema de la figura 4 la cual fue tomado y modificado de Camprubi et. al., 2006). Así pues, la consideración de Buchanan (1979) de que los yacimientos de la Veta Madre de Guanajuato habían tenido como controles de formación “un sistema geotérmico fósil”, parece correcta. Cálculos que se han hecho para este tipo de sistemas en varias partes del mundo (Yellowstone, USA y Waiotapu, Nueva Zelanda, entre otras) arrojan números tan descomunales de las cantidades de fluidos que se mueven en esos terrenos someros, que ya nadie duda de que se puedan formar yacimientos minerales habiendo disponibilidad de iones metálicos para ello. Se ha llegado a estimar que un solo punto de descarga en un sistema geotérmico, produce 10 l/seg de agua, la cual, si tuviera en solución tan sólo 14×10^{-6} g/l de Au, sería capaz de formar un yacimiento con unos 6 millones de onzas de oro, en sólo unos 50,000 años (Henley, 1985), parece que esto pudo haber sucedido en Guanajuato.

Bibliografía

- Clark, Kenneth F., Salas Guillermo A., (eds.), 2008, Geología económica de México, SGM. Segunda Edición 2009 editada por: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México y el Servicio Geológico Mexicano. Derechos del autor propiedad Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México y Servicio Geológico Mexicano ISBN 978-607-95292-1-5. 947 p.
- Orozco-V. F. J., 2014.- Mineralogía y génesis del “clavo de Rayas” de la zona central de la Veta Madre de Guanajuato, Gto. Tesis doctoral. CEGEO-UNAM, 150 p., Inédita.
- Wandke, A., Martínez, J., 1928. The Guanajuato Mining District, Guanajuato, Mexico: Economic Geology, Vol. 23, pp 1-44.
- Wisser, E., 1928. Report on the Chippendale, Murray-Thompson and Esperanza properties, Guanajuato, Gto. Informe privado, 29 p.
- Guiza, R., Rendón-C, Baltierra G., J. J., 1949. Estudio Geológico del Distrito Minero de Guanajuato, Gto. (zona de la Veta Madre): Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, Bol. No. 22, 75 p.
- Wilson, I. F., Milton, C. and Houston, J. R., 1950. A mineralogical study of the Guanajuato, Mexico, silver-gold ores: Geological Survey Open-file Report 75-70, 12 p.
- Edwards, J. D., 1955. Studies on some Early Tertiary red conglomerates of central Mexico: U. S. Geological Survey Professional Paper 264 – H, pp., 153-183.
- Echegoyén S. J., Romero-S. M. y Velásquez-S., S. 1970, Geología y Yacimientos Minerales de la Parte Central del Distrito Minero de Guanajuato, México, Consejo de Recursos Minerales no Renovables, Boletín 75, 36 p.
- Petruk, W. and Owens, D., 1974. Some Mineralogical Characteristics of the Silver Deposits in the Guanajuato Mining District, Mexico: Economic Geology, Vol. 69, pp. 1070-1085.
- Gross, W. H., 1975. New Ore Discovery and Source of Silver-Gold Veins, Guanajuato, Mexico: Economic Geology, Vol. 70, pp 1175-1189.
- Buchanan, L.J., 1979, The Torres mine, Guanajuato, Mexico. Ore controls of a fossil geothermal system: Doctoral Dissertation, Colorado School of Mines, 138 p. Inédito.
- Buchanan, L.J., 1980, Ore controls of vertically stacked deposits, Guanajuato, Mexico: Society of Mining Engineers, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Preprint 80-82, 27 p.
- Buchanan, L.J., 1981, Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest in W.R. Dickinson and W.D. Payne, (eds.), relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera: Arizona Geological Society Digest, v. XIV, p. 237-262.
- Randall-Roberts, J.A., 1978, Mineral Probabilidades de exploración y geología de las zonas de El Cubo, Villalpando, y El Monte de San Nicolás: Guanajuato, Guanajuato, Minera del Cubo, reporte (inédito).
- Randall-Roberts, J.A., 1979, Structural setting, emplacement of Veta Madre orebody using the Sirena and Rayas mines as examples, Guanajuato Mexico: Nevada Bureau of Mines and Geology Report 33, p. 203-212. Inédito.
- Randall-Roberts, J.A., 1982, Contacto entre el Terciario y el Mesozoico en el distrito minero de Guanajuato: Sociedad Geológica Mexicana, Convención Nacional, 6a., México, D.F., p. 89 (resumen).
- Randall-Roberts, J.A., 1987, Emplazamiento y origen del yacimiento auro-argentífero de —El Cubo, Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Simposio sobre la Geología de la Región de la Sierra Guanajuato, Guanajuato, Abril 28-30, 1987, p. 35-37 (resumen).
- Randall-Roberts, J.A., 1989, Cause of gold distribution in veins, Guanajuato, Mexico: Gold 89 in Europe, Toulouse, France, May 1989, p.15 (resumen).
- Randall-Roberts, J.A., 1990a, Gold overprint on silver veins, Guanajuato, Mexico: International Association on the Genesis of Ore Deposits, Ottawa, Canada, 8th August 1990, Proceedings, p. A109 (resumen).
- Randall-Roberts, J.A., 1990b, Geology of El Cubo mine area, Guanajuato, Mexico, in K.F. Clark, (ed.), Mexican Silver Deposits: Society of Economic Geologists Guidebook 6, p. 218- 227.
- Randall J.A., y Randall, R.M., 1990, Identification of hydrologic barriers in low angle oblique terrestrial photographs: International Association of Hydrogeologists, Symposium on Remote Sensing of Water Resources Proceedings, p. 579-583.
- Randall R., J.A.; Saldaña A., E., y Clark, K.F., 2002, Exploration in a volcanic-plutonic center at Guanajuato, Mexico, in

- W.E. Elston, y G.S. Plumlee, (eds.), A special issue on volcanic centers as targets for mineral exploration: *Economic Geology*, v. 89, pp. 1722-1751.
- Nelson, C. E., 1981 A partial paragenético study of the mineralization of the Rayas Ore Shoot, Rayas mine, Guanajuato, Mexico, Final term report for the Ore Microscopy course, at CSU, 11 p. Inédito.
- Mango, H. N., 1988. A fluid inclusion and isotope study of the Las Rayas mine, Guanajuato, Mexico; Unpublished M. Sc. Thesis, Darmouth Colege, 109 p.
- Mango, H., Zantop, H, and Oreskes, N., 1991. A Fluid Inclusion and Isotope Study of the Rayas Ag-Au-Cu-Pb-Zn Mine. Guanajuato, Mexico: *Economic Geology*, Vol. 86, pp 1554-1561.
- Mango, H., 1992. Origin of Epithermal Ag-Au-Cu-Pb-Zn mineralization on the Veta Madre, Guanajuato, Mexico: Unpublished Ph. D. dissertation, Darmouth Colege, Hanover, NH, pp 200 220.
- Davis-J. B, 2002. Relation of a caldera in the Guanajuato mining district, Mexico to the distribution of magmas and mineral deposits: unpublished M. Sc. Thesis, The University of Texas at El Paso, 142 p.
- Abeyta, R. L., 2003. Epithermal gold mineralization of the San Nicolas vein, El Cubo mine, Guanajuato, Mexico: Trace element distribution, fluid inclusion microthermometry and gas chemistry: New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro NM, unpublished M. Sc. Thesis, 130 p.
- Moncada-de la Rosa, J. D., 2008. Application of fluid inclusions and mineral textures in exploration for epithermal precious metals deposits: unpublished M. Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 31 p. Inédito.
- Aguire-Diaz., G. J. Labarthe-Hernandez., G. 2003. Fissure ignimbrites: fissure source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationships with Basin and Range faulting. *Geology*, 31, pp 773-776.
- Aranda Gómez. J. y Vassallo, L. F., 2007. Field Trip Guidebook "Geology of the Guanajuato Mining District and Sightseeing in the Old Town of Guanajuato: Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro. MEXICO, 29 p. Inedito.
- Aranda Gómez y McDowell 1998, extension in the southern Basin and Range Province of Mexico; syndepositional tilting of Eocene Red Beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District: *International Geology Review*, v. 40, p. 116–134.
- Vassallo, I. F., 1988. Características de la composición mineralógica de las menas de la Veta Madre de Guanajuato: Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista*, vol. 7, núm. 2, pp 232-243.
- Vassallo, L. F., Martínez-R., Paris, J. P., 1996. Estructuras Circulares y Lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, Mexico y su Significado Geológico en la Prospección Minera: Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 13, Núm. 2, pp 252-257.
- Vassallo, L. F., Reyes-Salas, M. 2007. Selenian polybasite from the Guanajuato Minig District, Mexico: Universidad Autónoma de México, Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, Bol-e, Vol. 3, No. 2, pp 1-16.
- Camprubí, A., González-P., Levresse, G., Tritlla, J. y Carrillo Ch. 2003, Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVI, Núm. 1, pp. 10-18.
- Camprubí, A. y Albinson, T. 2006. Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVIII, Núm. 4, pp. 27-81.
- Canet-M., y Camprubí, A. 2006. Yacimientos minerales: los tesoros de la Tierra. Fondo de Cultura Económica, Mexico, 227 p.
- Canet-M., Camprubí, A, González-P., E. et al 2009a, The Francisco I. Madero Zn- Cu-Pb-(Ag) deposit, Zacatecas, Mexico: Mineral chemistry and fluid inclusión data. *Journal of Geochemical Exploration*. P 20.
- Canet-M., Camprubí, A, González-P., E. et al 2009b, Mineral Assemblages of the Francisco I. Madero Zn- Cu-Pb-(Ag) deposit, Zacatecas, Mexico: Implications for ore deposits génesis. *Ore Geology Reviews* 35, pp 413-435.
- González P., E. 1981, La province filonienne Au-Ag de Txco-Guanajuato (Mexique): Nancy, France, Universite de Nancy. Institut National Politechnique de Lorraine, Tesis de doctorado, 234 p. (Inédita).
- Velásquez, S. S., 1964. Estudio Geológico Superficial de la Porción Central del Distrito Minero de Guanajuato (tesis profesional): IPN, 84 p. Inedita.

- González R., J., 1965. Influencia del Intrusivo Granítico de Arperos en la Mineralización de Guanajuato, Gto.: Minería y Metalurgia, No. 35, pp 79-89.
- Gross, W. H., 1975. New Ore Discovery and Source of Silver-Gold Veins, Guanajuato, Mexico: Economic Geology, Vol. 70, pp 1175-1189.
- Ruvalcaba D. C., 1976. Cálculo de Reservas de la parte SE de la Mina de Rayas, en Guanajuato (tesis profesional): Universidad Autónoma de San Luis Potosí . Inédita 100p.
- Taylor, P. S., 1975 Mineral variations in the silver veins of Guanajuato, Mexico. Unpublished Ph. D. dissertation, Dartmouth College, Hanover, NH, 136 p. Inédita.
- Frankenberg, E. W., 1988. A detailed Mineralogical Description of "Deep" Ore in the Rayas Mine, Guanajuato; Mexico: Unpublished M. Sc. Thesis, Dartmouth College, Hanover, NH, 27 p.
- Querol-S. F., Lowther, G. K. and Navarro, R., 1991. Mineral deposits of the Guanajuato District, Guanajuato: The Geology of North America, Vol. P-J Economic Geology. The Geological Society of America, pp 403-414.
- Martínez-M., J. A., 1993. Magmatismo Oligocénico, una Guía para la Exploración por Oro y Plata en Guanajuato, Mex.: Trabajo integrador para obtener el grado de Especialista, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 15 p. Inédito.
- Lester, K. E., 1994. A Potencial link between the Peregrina Intrusive and the Chichindaro Formation, Guanajuato, Mexico: Unpublished Senior Honor Thesis, Hanover, NH, 42 p.
- Orozco-V. F. J., 1975-1983. Informes geológicos - mineros periódicos a la Gerencia General y sub-gerencias de Operación, sobre los trabajos mineros y de exploración en la minas de la sociedad Cooperativa Min-Met. Santa Fe de Gto. 40 p. Inédito.
- Labarthe-Hernández, Tristán-González, Margarito; y Aranda-Gómez, 1995, Cartografía 1:25,000 de la sierra de Guanajuato: Investigación no publicada por Compañía Minera Las Torres, Guanajuato, Gto., 112 p.
- Labarthe-Hernández, Guillermo; Tristán-González, Margarito; y Aranda-Gómez, J.J., 1982, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico Núm. 85, 208 p.
- Álvarez-M., V. M., 1997. Comportamiento de la Veta Madre en el Basamento Mesozoico, Distrito Minero de Guanajuato: Trabajo integrador para obtener el grado de Especialista, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 58 p.
- Henley, R. W., 1985 The Geothermal framework of Epithermal Deposits: Economic Geology Series, Chapter 1, pp 1-21.