

EVIDENCIAS DE EVOLUCIÓN DE UN FLUIDO BÁSICO A ÁCIDO A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LA ALTERACIÓN HIDROTHERMAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES, MICHOACÁN

Eduardo González-Partida*

RESUMEN

En el campo geotérmico de Los Azufres la zona de alteración hidrotermal está formada en su mayor parte por calcosilicatos (que definen una zona paragenética del tipo propilitico), los cuales muestran una deshidratación progresiva conforme se va profundizando e incrementándose la temperatura. Se puede generalizar un zoneamiento evolutivo para los calcosilicatos predominando las zeolitas hacia la cima y la epidota-clinozoicita en los niveles más profundos. Le sobreyace una zona de argilitización que domina las manifestaciones hidrotermales superficiales. En algunas zonas, se tiene la asociación caolinita-alunita-azufre nativo-cuarzo (zona argilica avanzada) formada por la interacción vapor-acuíferos someros.

En el sistema geotérmico de Los Azufres el protofluido está ligado a una salmuera clorurado-sódica de carácter neutro que propicia una alteración hidrotermal propilitica profunda (zonas productoras) y se caracteriza por tener una permeabilidad secundaria debido al fracturamiento. A profundidad el yacimiento es a líquido dominante presurizado para evolucionar a vapor en su parte más somera. El cambio gradual de la fase líquida a vapor se da por ebullición a profundidades del orden de 1,200 a 1,500 m, y está acompañado por cambios igualmente presentes en la mineralogía de alteración hidrotermal. Ella pasa de propilitica a argilica por un proceso de oxidación-acidificación, en donde la participación de gases, principalmente de CO₂, es importante.

De acuerdo a las características fisicoquímicas de la salmuera y la evolución en las fases paragenéticas, el yacimiento de Los Azufres pudiera ser un modelo de comportamiento hidrotermal en el depósito de las menas que se dan por ebullición y oxidación de los fluidos hidrotermales fósiles de baja sulfidación.

Palabras clave: Alteración hidrotermal, propilitización, argilitización, ebullición, oxidación-acidificación, baja sulfidación.

ABSTRACT

Hydrothermal alteration at the Los Azufres geothermal field is mostly composed of calc-silicate minerals that define a propylitic type alteration zone, which shows progressive dehydration with depth and temperature increase. A generalized zoning of the calc-silicate zone can be observed, with zeolites in the upper part and epidote-clinozoisite at the deepest levels. An argillic alteration zone overlies the calc-silicate zone and is the dominant surface manifestation of the hydrothermal alteration. In some parts, there is a mineral assemblage composed of kaolinite-alunite-native sulfur-quartz (advanced argillic zone) formed by the interaction of vapor and shallow groundwater.

The proto-fluid at the Los Azufres geothermal system is related to a neutral sodium chloride brine, which favors deep propylitic alteration (productive zone). This zone is characterized by secondary permeability due to fracturing. At depth the geothermal field is dominated by a pressurized liquid, yielding to vapor at more shallow zones. The gradual change from a liquid to a vapor phase occurs through boiling at depths between 1,200 and 1,500 m, and is accompanied by changes in the hydrothermal alteration mineralogy. The type of alteration passes from propylitic to argillic by means of an oxidation-acidification process, which includes the participation of a gas, particularly CO₂.

Considering the physicochemical characteristics of the brine and the evolution of the paragenetic sequence, the Los Azufres geothermal field could be considered a model for hydrothermal behavior at ore deposits which develop by boiling and oxidation of low sulfidation fossil hydrothermal fluids.

Keywords: Hydrothermal alteration, propylitization, argillitization, boiling, oxidation-acidification, low sulfidation.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas hidrotermales actuales aportan información valiosa que permite entender los mecanismos no evidentes en los sistemas hidrotermales extintos (Henley y Ellis, 1983). Dichos mecanismos (metalotectones) van desde los patrones magmáticos y estructurales regionales, hasta procesos de evolución termodinámica finos que intervienen en la distribución (tiempo-espacio) de fases en las salmueras y, por consecuencia, de las especies minerales.

La metalogenia moderna exige grados de observación y de experimentación con diversas escalas de observación, mutuamente consistentes. Desde los fenómenos de escala regional (volcanismo, subvolcanismo, migración de fluidos, recarga de fluidos a los sistemas hidrotermales, etc.) hasta los procesos más locales que incluyen la identificación de facies paragenéticas, su sucesión, las temperaturas de formación de cada facies y su distribución espacial, las relaciones entre las facies y los minerales económicos, la zonificación en tipo y volumen metálico, la evolución térmica y de salinidad de los fluidos hidrotermales, el efecto termodinámico de la roca encajonante (especialmente la permeabilidad), y la presencia o no de procesos de ebullición.

Si bien el sistema hidrotermal que funciona en el campo geotérmico de Los Azufres es sólo uno de los muchos que se conocen en México en la actualidad, el grado de conocimiento que se tiene de este yacimiento nos permite reflexionar sobre los "metalotectones" que controlan o parecen controlar la distribución de menas en sistemas hidrotermales fósiles del país. Los "metalotectones" deben contemplar mecanismos que involucren el origen, transporte y depositación de las mineralizaciones, además de los controles magmáticos, estructurales, de herencia y permanencia metálica.

En este trabajo se considerará el papel que juegan los minerales neoformados en un sistema hidrotermal activo como una herramienta para el entendimiento del mecanismo de transporte y depósito en los sistemas fósiles, considerando que "el presente es la llave del pasado". Para ello, se presenta en una sección N-S del Campo de Los Azufres, las características mineralógicas y su relación con la evolución hidrodinámica (instalado en un medio volcánico). Los pozos estudiados fueron el 27-A, 44, 9, 23 y 16, con los cuales se integró un perfil. Los estudios consistieron en cuantificar la alteración hidrotermal presente en las esquirlas de perforación muestreadas cada 10 metros.

AMBIENTE TECTÓNICO DE LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO: CINTURÓN VOLCÁNICO TRANSMEXICANO

La República Mexicana se encuentra en la actualidad bajo la influencia de las placas de Norteamérica, del Pacífico y de Cocos. Si observamos la distribución geográfica de las localidades geotermiales de México surgen inmediatamente una

serie de agrupamientos y alineamientos que coinciden con algunos elementos tectónicos conocidos. Los campos geotérmicos más importantes de México son el de Cerro Prieto, localizado en la cresta oceánica de expansión activa del Golfo de California, y los de Los Humeros, Puebla, y Los Azufres, Michoacán, localizados en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). El CVT, es una zona volcánicamente activa que atraviesa al país de este a oeste, en la que se alojan el 79% de las anomalías termales conocidas en México. Por su importancia, Torres-Rodríguez y colaboradores (1993) propusieron el nombre de "Provincia Geotérmica del Cinturón Volcánico Transmexicano" para agrupar a las localidades geotérmicas de la región. Su origen está relacionado con la subducción oblicua de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica. El volcanismo es de tipo andesítico-basáltico con algunos centros de evolución de rocas ácidas. Los tipos de volcanismo dentro de la región incluyen: estratovolcanes poligenéticos, volcanes monogenéticos, calderas y derrames fisurales. La mayor concentración de focos termales se ubica en el borde norte del CVT, coincidiendo con la presencia de calderas y centros de evolución ácida. Como ejemplo se citan las calderas de La Primavera, Jalisco, Los Humeros, Puebla, Acapulco, Puebla, y Los Azufres, Michoacán. El borde sur se caracteriza por la presencia de los grandes estratovolcanes como los de Colima, Toluca, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, y un menor número de manifestaciones termales.

MARCO GEOLÓGICO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS AZUFRES

MARCO GEOLÓGICO

El basamento local del campo geotérmico de Los Azufres (Figuras 1 y 2) está constituido por un paquete de más de 2,000 m de derrames andesíticos con intercalaciones de paleosuelos, aglomerados y coladas basálticas. La edad del basamento es de 18 Ma (Dobson, 1984). Sobre las rocas anteriores se depositaron discordantemente un conjunto de rocas ácidas, formadas por ignimbritas, tobas y cenizas (Riolita Agua Fría) correspondientes a un ciclo volcánico de 1.05 a 0.84 Ma. Encima de ellas, se formaron depósitos lacustres del Pleistoceno (Garduño-Monroy, 1988), asociados al colapso de la caldera de Los Azufres de edad cuaternaria (Pradal y Robin, 1985). La Dacita San Andrés representa una fase volcánica importante, cuya edad es de 0.3 Ma, y es seguida de depósitos ignimbriticos de 0.28 Ma, e inyecciones riolíticas (Riolita Yerbabuena) que forman estructuras dómicas de 0.14 Ma. La última etapa volcánica en la región es de composición básica con afloramientos de derrames al este y oeste del campo, y cineritas en los alrededores. La geoquímica de roca total realizada en las diferentes unidades litoestratigráficas manifiesta una tendencia calcalcalina (Cathelineau et al., 1987).

Los estudios estructurales de Garduño-Monroy (1988), y Ferrari y colaboradores (1991), muestran dos sistemas

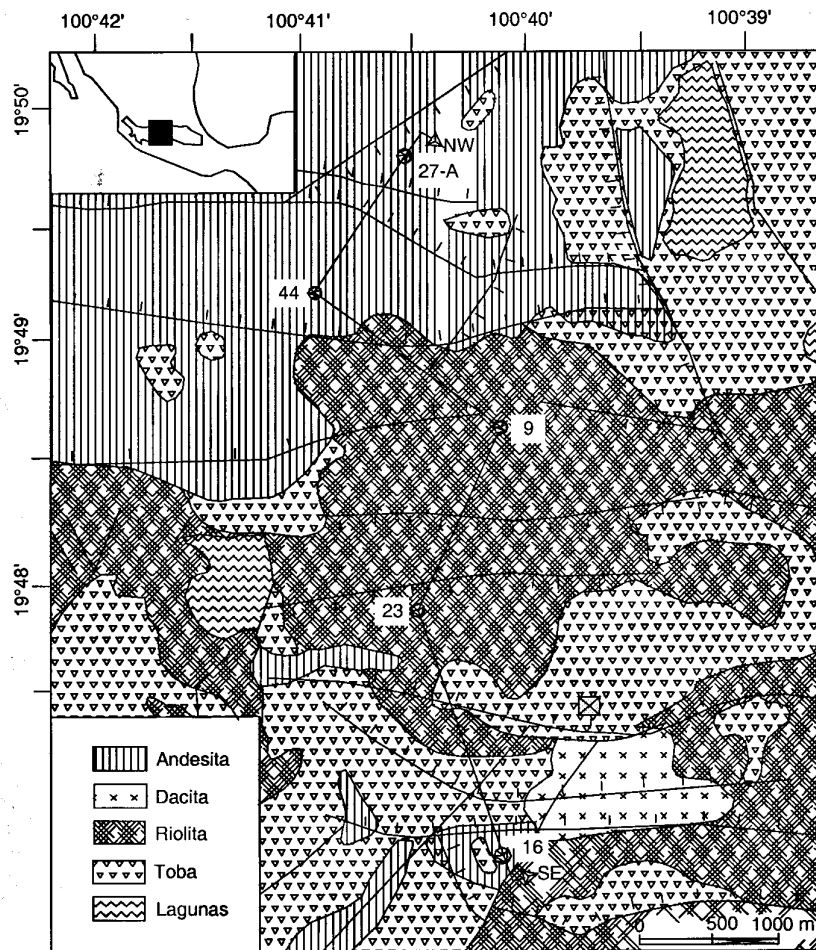


Figura 1. Mapa geológico-estructural del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán; la sección SE-NW se presenta en la Figura 2.

principales de fallas con inclinación casi vertical. El mayor tiene una dirección E-W y corta otros de menor importancia y más antiguos NE- SW. Las fallas E-W presentan desplazamiento lateral y se relacionan con el sistema regional activo "Acambay" del CVT. Ellas intersectan el borde sur de la caldera de Los Azufres. Las fallas se caracterizan por su porosidad secundaria.

La zona de Los Azufres presenta una gran cantidad de manifestaciones hidrotermales. Estas descargas naturales consisten únicamente de vapor. No existen descargas de líquido geotérmico en el campo y una intensa caolinización superficial se manifiesta claramente. La "Riolita Agua Fría" constituye un yacimiento actualmente en explotación por dicha sustancia. El predominio de azufre nativo (del cual la zona toma su nombre) en las manifestaciones con algo de sulfatos (alunita) y la caolinita definen una alteración

hidrotermal del tipo argilitización avanzada, y es una respuesta a la intensa interacción de roca-gases-acuífero colgado de los niveles someros del yacimiento.

FORMACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La formación de minerales de alteración hidrotermal incluyendo sulfuros metálicos está controlada no sólo por la temperatura del medio, sino también por la composición de la roca donde se ha instalado el sistema hidrotermal y las condiciones hidrológicas locales. Estas condiciones incluyen la concentración de especies iónicas, presión parcial de gases, la duración del flujo dentro de la roca y la ocurrencia de ebullición.

Las rocas encajonantes que contienen a los yacimientos (geotérmicos y minerales) están generalmente alteradas por los

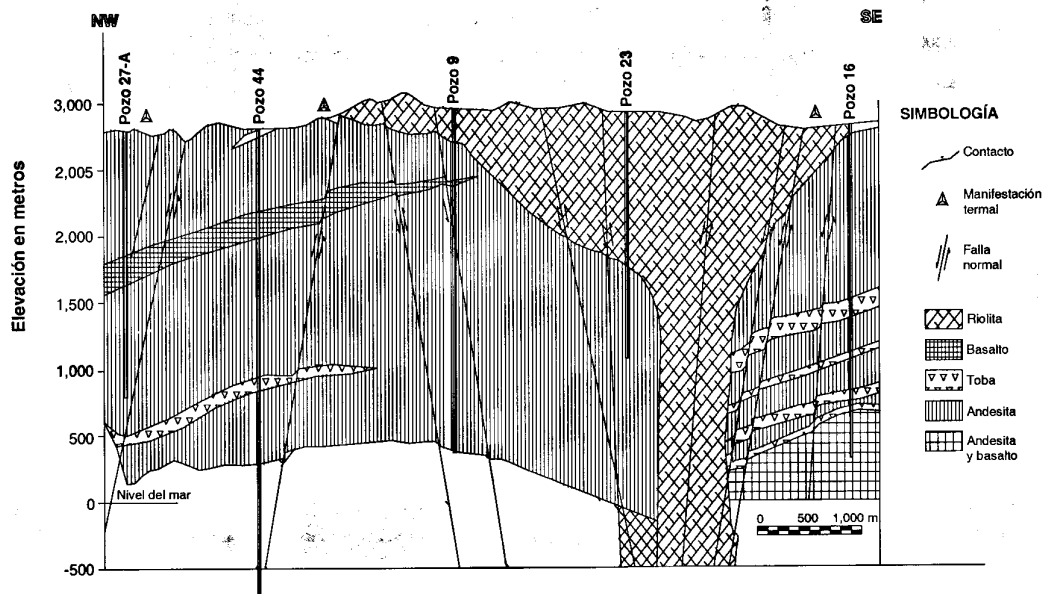


Figura 2. Sección geológico-estructural SE-NW del campo geotérmico de Los Azufres, donde se muestra la localización de los pozos.

fluidos calientes mineralizantes que han pasado a través de ellas. La naturaleza de los productos de alteración depende de las características de la roca original, del carácter de los fluidos que la invaden, —que determinan factores como el Eh, pH, presión y grado de hidrólisis—, y de la temperatura a la cual tuvieron lugar las reacciones. La alteración hidrotermal se ha usado como una guía en la exploración minera.

Los efectos de reacción que resultan de la interacción de los fluidos calientes para equilibrarse con las rocas que atraviesan, conforman la alteración hidrotermal de la roca encajonante. Un problema en la exploración minera es la interpretación que se le da a la alteración asociada con los procesos que causan la precipitación de metales en términos de “potencialidad metálica”. En los sistemas hidrotermales actuales, de manera generalizada, la alteración propilitica (caracterizada por la asociación cuarzo + calcita + clorita + epidota + piritita ± adularia) es producto de la circulación de fluidos clorurado-sódicos calientes, con temperatura entre 200 y 350°C, los cuales también están generalmente relacionados con la formación de yacimientos minerales someros polimetalicos. Por el contrario, la alteración argílica avanzada (asociación caolín + alunita + azufre nativo) es el producto de fluidos con un pH ácido (pH = 2 a 3). Esta última alteración se produce a baja temperatura (100-130 °C) y es consecuencia de la condensación superficial de H₂S, de su oxidación a sulfatos y su descarga final “ácido-sulfatada”.

Otro efecto común de los fluidos geotérmicos es el calentamiento de aguas someras por vapor, produciendo aguas termales de baja salinidad. En este caso, el vapor geotérmico se condensa en las aguas frías (marginales al

sistema hidrotermal), adquiriendo un pH ligeramente ácido y temperaturas de 100 a 180°C. Finalmente, las aguas así calentadas generarán “zonas argílicas” con la asociación montmorillonita + zeolitas (zaponita).

Zonación de las paragénesis mineralógicas

En el campo geotérmico de Los Azufres, la zona de alteración hidrotermal está formada en su mayor parte por calcosilicatos (que definen una zona paragenética del tipo propilitico), los cuales muestran una deshidratación progresiva conforme se va profundizando e incrementándose la temperatura. Le sobreyace una zona de argilitización avanzada que domina las manifestaciones hidrotermales superficiales. La Figura 3 presenta de manera integrada en zonas paragenéticas los resultados obtenidos de los estudios petrológicos.

Las paragénesis mineralógicas ocurren en rangos de temperaturas específicos (medidos por inclusiones fluidas). La zona III, con temperaturas entre 300-340°C, se caracteriza por la asociación epidota + clinzoicita + actinolita + tremolita + granate y esmectita + illita + clorita interestratificadas en la fracción arcillosa (con predominio en abundancia de la clorita, luego la illita y una menor proporción de esmectita); la zona II se definió entre 270 a 300 °C por la paragénesis epidota + clinzoicita; y entre 220 a 270 °C epidota + laumontita + wairaquita y esmectita + illita-clorita interestratificadas (con predominio de abundancia de la illita, luego la esmectita y poca clorita); y finalmente entre 150 a 220 °C se definió la zona I, representada por laumontita y la asociación laumontita + ptilolita + estilbita + thompsonita, y esmectita como arcilla

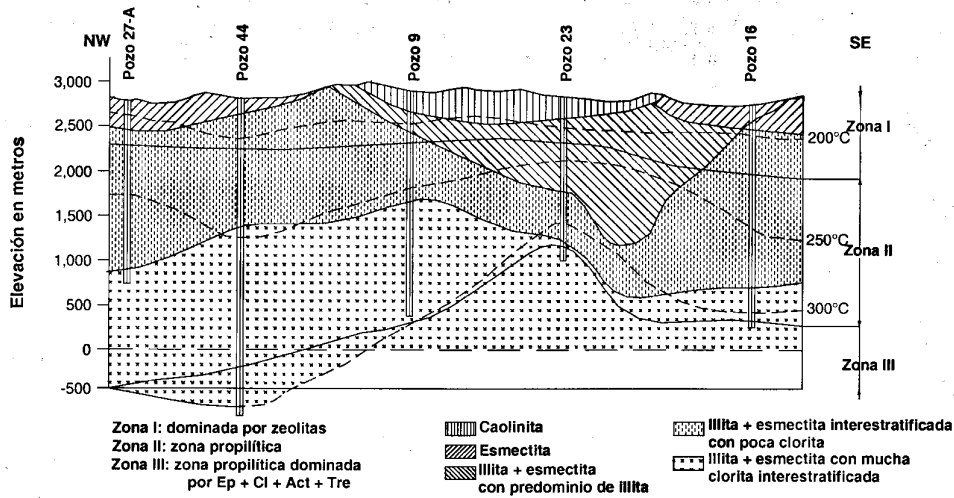


Figura 3. Zonación paragenética de los minerales transparentes de neoformación del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. La distribución de arcilla tomada de Izquierdo-Montalvo y Cathelineau (1987). 1. Equivale a la zona de argilitización avanzada. 2 y 3. Zona argilica. 4 y 5. Zona propilítica.

dominante entre 100 a 150 °C. En las rocas riolíticas con interacción de fluidos ácidos se tiene la asociación estilbita + chabasita + heulandita + escolecita + laumontita y estilbita + laumontita + thompsonita ($T = 100\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Someramente se tiene la asociación azufre nativo + caolinita + alunita + cuarzo + pirita.

De estos resultados obtenidos se puede generalizar un zoneamiento evolutivo para los calcosilicatos, predominando las zeolitas hacia la cima y la epidota-clinozoicita en los niveles más profundos. La presencia de caolinita se limita a zonas donde la roca primaria es de composición ácida, generalmente a profundidades someras. También puede transformarse a esmectita por transferencia de Ca y Mg por el aumento de la temperatura (200 °C). La aportación de estos elementos es posible si el fluido caliente cruza por zonas de volcanismo andesítico, lo que efectivamente ocurre en Los Azufres (Figura 2). La illita está presente en rocas tanto de composición ácida como intermedia, pero su abundancia depende esencialmente del contenido de K de la roca y la temperatura del medio. Finalmente, la presencia de clorita interestratificada con arcillas (illita + esmectita) se ve favorecida por el aumento de la temperatura del medio, así como por una composición más básica de la roca. Esta asociación predomina en los niveles más profundos del campo geotérmico.

Iglesias-Rodríguez y Arellano-Gómez (1988a, b) definieron el yacimiento de Los Azufres como del tipo "VAPLIQ" (vapor-líquido). El perfil de presiones presenta un gradiente típico de sistemas predominados por vapor en su parte más somera, y un gradiente aproximadamente "hidrostático por ebullición" en su parte más profunda. El cambio gradual de la fase líquida a vapor se da por ebullición a profundidades del orden de los 1,200 a 1,500 m, y está

acompañado por cambios igualmente presentes en la mineralogía de alteración hidrotermal. Por otro lado, el sistema geotérmico de Los Azufres está gobernado por aguas clorurado-sódicas a profundidad (zonas productoras; Nieva-Gómez *et al.*, 1987) y se caracteriza por tener una permeabilidad secundaria debida al fracturamiento (Nieva-Gómez *et al.*, 1986). El flujo de fluidos desde la matriz de la roca hacia las fracturas (en continuo suministro) asegura la transferencia de la salmuera líquida a vapor aun en condiciones micrométricas, según las observaciones de Pruess y Narasimhan (1982). Este proceso garantiza la migración de volátiles en la medida en que la ebullición prosiga. Suárez y colaboradores (1997) muestran claramente la fuerte concentración de gases, principalmente de CO_2 , en la zona dominada por vapor en Los Azufres. Esta migración vertical de gases tiene como consecuencia el desarrollo de una zona de argilitización y de argilitización avanzada muy somera, que se sobreimpone a la zona propilítica.

Modelos de zonación de alteración hidrotermal

La formación de yacimientos minerales hidrotermales es consecuencia de la instalación de celdas convectivas o fluidos migrantes, ligados comúnmente a anomalías térmicas magmáticas cuyos radios de afectación son de kilómetros. El conjunto de estructuras mineralizadas guardará relaciones mutuas en cuanto a temperaturas de formación, mecanismo de precipitación y evolución de las salmueras.

La mineralización hidrotermal refleja el carácter de los fluidos y la relación con un pH ácido y/o neutro ha servido de base para la clasificación de los yacimiento hidrotermales fósiles. Heald y colaboradores (1987) usan los términos de "adularia-sericita" y de "ácido-sulfatado" en yacimientos

epitermales. White (1991), White y Hedenquist (1990), Hedenquist y Lowenstern (1994), definen las características de los yacimientos denominados de baja sulfidación y los de alta sulfidación, en donde el carácter fisicoquímico del “protofluido” condiciona una herencia mineralógica. Los yacimientos de “alta sulfidación”(HS) han demostrado la existencia de un medio ácido para los fluidos mineralizantes que participan durante el proceso de mineralización. Los modelos genéticos sintetizados por Arribas (1995) sugieren la existencia de una salmuera de origen magmático, en donde la fase gaseosa es la predominante. Los vapores magmáticos desprendidos son muy ácidos, con pH = 2-3. Estos fluidos en su trayecto hacia la superficie van propiciando una zonación en la alteración hidrotermal, en donde se tiene una formación secuencial de sericita-caolinita-alunita-cuarzo (“argilitización avanzada”). Los fluidos magmáticos tardíos se separan en dos tipos: los de baja salinidad, caracterizados por la fase vapor (gaseosa) “a vapor dominante”, y los hipersalinos. El vapor magmático, que es oxidante y de alta temperatura, alcanza profundidades someras con poca reacción con la roca encajonante. Este vapor puede ser diluido por aguas subterráneas profundas y, aunado a la baja presión relacionada a lo somero de las intrusiones, se favorece igualmente la degasificación para este tipo de yacimientos. Los yacimientos de baja sulfidación se relacionan a centros magmáticos diferenciados. El “protofluido” es de carácter meteórico, clorurado-sódico, con pH neutro. La mayor alteración es propilítica y contiene adularia y fluorita. En las zonas periféricas se puede presentar una zona de alteración argílica (White y Hedenquist 1990, Hedenquist y Lowenstern 1994, Heald et al., 1987), o “ácido-sulfatada”, en donde la oxidación del H₂S produce los sulfatos (Rye et al., 1992).

En los Azufres, estudios hidrológicos e isotópicos de Birkle (1998) indican la recarga del depósito por aguas magmáticas y CO₂ de una cámara magmática somera, mezclada con una componente joven de agua superficial (meteórica).

Existen diferencias fundamentales en cuanto al origen y transporte de los gases “acidificantes” causantes de alteraciones ácidas entre yacimientos hidrotermales y de los relacionados a fluidos magmáticos tardíos. En los primeros, el “protofluido” está ligado a una salmuera clorurado-sódica de carácter neutro, que propicia una alteración hidrotermal propilítica. La ebullición acompañada de un proceso de oxidación-acidificación, demostrada en el campo geotérmico de Los Azufres, permite el desarrollo de zonas de alteración argílica y la posible precipitación de elementos metálicos y sulfurosos. El modelo de Buchanan (1981) parece tener una gran coincidencia para este tipo de evolución de fluidos a nivel de fractura y/o fallas mineralizadas. En este modelo de zonación de alteración hidrotermal para vetas hidrotermales (“modelo de fluidos en ebullición”), la evolución de los fluidos hidrotermales se refleja en zonas de alteración hidrotermal que envuelven la mineralización. Del exterior hacia el interior se

tiene la zona de propilitización, la zona argílica y filica. En la zona de concentración metálica predomina la silicificación. Para Buchanan (1981), el depósito de las menas se da por ebullición y oxidación de los fluidos hidrotermales. También se contempla como una consecuencia de este fenómeno un brechamiento en la estructura. La presión que gobierna estos fenómenos es hidrostática (sistema abierto). La evolución de un fluido neutral a ácido debido a la ebullición (pérdida de presión y temperatura) se refleja en la naturaleza de los productos de alteración hidrotermal.

CONCLUSIONES

El sistema geotérmico de Los Azufres está gobernado por aguas neutras clorurado-sódicas a profundidad (zonas productoras). A profundidad es a líquido dominante para evolucionar a vapor en su parte más somera. El cambio gradual de la fase líquida a vapor se da por ebullición a profundidades del orden de los 1,200-1,500 m, y está acompañado por cambios igualmente presentes en la mineralogía de alteración hidrotermal.

La zona de alteración hidrotermal está formada en su mayor parte por calcosilicatos. Le sobreyace una zona argílica y de argilitización avanzada que domina las manifestaciones hidrotermales superficiales. La evolución de las alteraciones hidrotermales en Los Azufres, pudiera ser un modelo de comportamiento hidrotermal en el depósito de las menas que se dan por ebullición y oxidación de los fluidos hidrotermales en sistemas de baja sulfidación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco particularmente a Mireya Maples, Peter Birkle y Luca Ferrari por su colaboración en la revisión final del manuscrito, y sus atinadas observaciones en el arbitraje.

BIBLIOGRAFÍA

- Arribas, A., 1995, Characteristics of high sulfidation epithermal deposits and their relation to magmatic fluid, in *Magmas, fluids and ore deposits of C.*, v. 23 MDRU-UBC, p. 419 - 455.
- Birkle P. 1998, Herkunft und Umweltauswir Kungen der Geothermalwasser von Los Azufres, Mexico: Saxony, Germany, Tecnical University of Freiberg, Disertación doctoral, 226 p. (inérita).
- Buchanan L. J. 1981, Precious metal deposits associated with volcanic environment in the southwest, in Dickson y Payne, eds., *Relations of tectonics to ore deposits in the southern Cordillera*: Arizona Geological Society, Digest, v. XIV, p. 237 - 262.
- Cathelineau, Oliver-Hernandez, R., y Nieva-Gómez, D., 1987, Geochemistry of volcanic series of the Los Azufres geothermal field (Mexico): *Geofísica Internacional*, v. 26, p. 273-290.
- Dobson, P., 1984, Volcanic stratigraphy and geochemistry of the Los Azufres: Stanford, California, Tesis de Maestría en Ciencias, 59 p. (inérita).
- Ferrari, Luca, Garduño, V.H., Pasquaré, G., y Tibaldí, A., 1991, Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 47, p. 129-148.
- Garduño-Monroy, V., 1988, La Caldera de Los Azufres y su relación con el

- sistema regional E-W: Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, v. 4, p. 49-61.
- Heald, P., Foley K. N., Hayba O. D., 1987, Comparative anatomy of Volcanic-Hosted Epithermal Deposits: Acid-Sulfate and Adularia-Sericite Types. *Economic Geology* v. 82, p. 1-26.
- Hedenquist, W. J., y Lowenstern, B. J., 1994, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits: *Nature*, v. 370 p. 519-527.
- Henley, R. W., y Ellis, A.J., 1983, Geothermal Systems Ancient and Modern: A Geochemical Review: *Earth Science Reviews*, v. 19, p. 1-50.
- Iglesias-Rodríguez, E., y Arellano-Gómez, V., 1988, El Campo Geotérmico de los Azufres; prototipo de los sistemas hidrotermales "VAPLIQ": *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 4, núm. 1, p. 24-36.
- Iglesias-Rodríguez E., y Arellano-Gómez, V., 1988b, VAPLIQ hydrothermal systems, and vertical permeability of Los Azufres, Mexico, geothermal reservoir, in *Proceedings: 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering: Stanford, California, Stanford University, memoria SGP-TR -113*, p. 19-82.
- Izquierdo-Montalvo, G., y Cathelineau, M., 1987, Evolución de minerales arcillosos en el yacimiento de los Azufres Michoacán y su uso como termodindicadores, in *Memorias, International Symposium on Development and Exploitation of Geothermal Resources: Cuernavaca, Morelos, Instituto de Investigaciones Eléctricas- Comisión de Comunidades Europeas*, v. I, p. 189-193.
- Nieva-Gómez, D., Iglesias-Rodríguez E., Arellano-Gómez, V., Contreras-López E., Cathelineau-Miguel., y Quijano-De León, J., 1986, Developments in Geothermal energy in Mexico part Four—Evaluation of geothermal resources, multidisciplinary studies of the Los Azufres field: *Heat Recover Systems*, p. 201-207.
- Nieva-Gómez, V., Barragán-Reyes R., Cathelineau-Miguel., González-Partida, E., Oliver-Hernández, R., y Verma-Pal, M., 1987, Estudio de la estructura hidrológica y de la distribución de parámetros físico-químicos del yacimiento de Los Azufres, in *Informe Final: México, Comisión Federal de Electricidad*, p. 1-356.
- Padilla-Sánchez, R., Martínez-Serrano, R., Torres-Rodríguez, V., y González-Partida, E., 1994, Carta Tectónica de Mexico, Primera Edición: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Pradal, E., y Robin, C., 1985, Découvert d'une caldéra majeure associée au champ géothermique Los Azufres Mich: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Serie II, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, v. 301, núm. 14, p. 1,069-1,074.
- Pruess, K., y Narasimhan, N., 1982, On fluid resources and the production of superheated steam from fractured vapor-dominated geothermal reservoir: *Journal of Geophysical Research*, v. 87. p. 9,329-9,339.
- Rye, O.R., Bethke, M.P., y Wasserman, D.M., 1992, The stable isotope geochemistry of acid sulfate alteration: *Economic Geology*, v. 87, p. 225-262.
- Suárez, A. M. C., Samaniego, F.V., y Tello, R. M., 1997, An updated survey of non-condensable gases evolution at Los Azufres, Mexico, geothermal reservoir, in *Proceedings 22 Geothermal Reservoir Engineering: Stanford, California, Stanford University*, p. 27-34.
- Torres, R., Nieva-Gómez, D., Barragán-Reyes, R., y González-Partida, E., 1993, Geotermia en México—Distribución de aguas termales y su relación con la tectónica reciente en México, in *La Geotermia en México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Programa Universitario de Energía*, 140 p.
- White, N.C., 1991, High sulfidation epithermal gold deposits characteristics and a model for their origin: *Geological Survey of Japan Report*, núm. 227, p. 9-22.
- White, N. C., y Hedenquist, J. W., 1990, Epithermal environments and styles of mineralization—variations and their causes, and guidelines for exploration: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 36, p. 445-474.
- Manuscrito recibido: Octubre 16, 1998
 Manuscrito revisado recibido: Febrero 20, 1999
 Manuscrito aceptado: Febrero 25, 1999