

Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones

Julio César Viggiano-Guerra¹, Magaly del C. Flores Armenta² y Germán R. Ramírez Silva²

¹Fac. de Ing. Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, E-mail: cesar.viggiano@live.com. ²CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.

Resumen

La zona geotérmica de Acoculco, Pue., se localiza a 180 km de distancia de la ciudad de México, DF. Exhibe dos áreas alteradas hidrotermalmente con descargas ácido-sulfatadas frías y algunas mofetas, asociadas a una red estructural compleja configurada en un espesor de 2000 m de rocas volcánicas del Cuaternario-Terciario, calizas metamorfozadas del Cretácico e incluso granitos del Cretácico. Esta particularidad parece encajar conceptualmente en los denominados yacimientos tipo kaipohan que no por ser tales son rentables, desde la premisa netamente hidrotermal. Dos pozos exploratorios se han perforado en la zona: en 1995 el EAC-1 a 1810 m de profundidad y en 2008 el EAC-2 a 1900 m de profundidad. En este reporte se discuten los resultados e interpretación de los estudios petrográficos del segundo pero se emplea parte de la información del primero para la interpretación de la evolución del sistema hidrotermal. De manera sintética se puede establecer que la zona geotérmica de Acoculco se encuentra en su etapa hidrotermal senil dado que se ha verificado, de acuerdo con los estudios de mineralogía hidrotermal y de otras consideraciones, un cambio en el régimen de convectivo hacia convectivo forzado o conductivo. Sobresale el hecho de que el sistema no se ha reciclado, quizá porque las rocas no lo han permitido y, por lo tanto, está feneciendo. Esto, naturalmente, no ha sido óbice para la presencia de un importante volumen de masa caliente (300° C) hornofélsica y granítica en el subsuelo que abre un espectro de posibilidades para la explotación de un sistema geotérmico mejorado (EGS, por sus siglas en inglés). Quedaría por investigar la factibilidad del proyecto en el tema de la vulnerabilidad de las rocas de yacimiento (hornfels y granito) para su mejora de permeabilidad por los medios convencionales experimentados en estos proyectos, ya que parece ser que la naturaleza fracasó en ese intento.

1. INTRODUCCIÓN

La zona geotérmica de Acoculco, Pue., se localiza 85 km al noreste de la Ciudad de Puebla y 180 km de la ciudad de México, D.F. El área, que abarca una superficie de 1290 km² e incluye 39 manantiales, casi todos “fríos” (Tello-Hinojosa, 1994) y algunas emanaciones frías de CO₂ (mofetas), se ubica en la zona limítrofe entre el Cinturón Volcánico Mexicano y la Sierra Madre Oriental (Fig. 1). Esta zona, constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, incluye dos áreas de interés alteradas hidrotermalmente por fluidos de tipo ácido sulfatado. Las áreas son: Los Azufres-El Potrero Colorado y La Alcaparroza y están asociadas a estructuras NW-SE, si bien en la región la red estructural es muy compleja incluyendo casi todas las orientaciones (Rocha-López *et al.*, 2006). Además, se caracteriza por ser el único campo geotérmico en México que presenta manifestaciones termales muy peculiares, ya que carece de termalismo evidente *caliente*. La manifestación más caliente tiene apenas 49°C y se ubica a unos 18 km al SE de Los Azufres-El Potrero y La Alcaparroza, ya en la parte sedimentaria de la Sierra Madre Oriental (Rocha-López *et al.*, 2006). Como podrá inferirse, esta manifestación está bastante distante del sitio donde se perforaron los dos pozos exploratorios, a saber, el EAC-1, perforado en 1995, y el EAC-2, perforado en 2008, este último objetivo de este estudio.

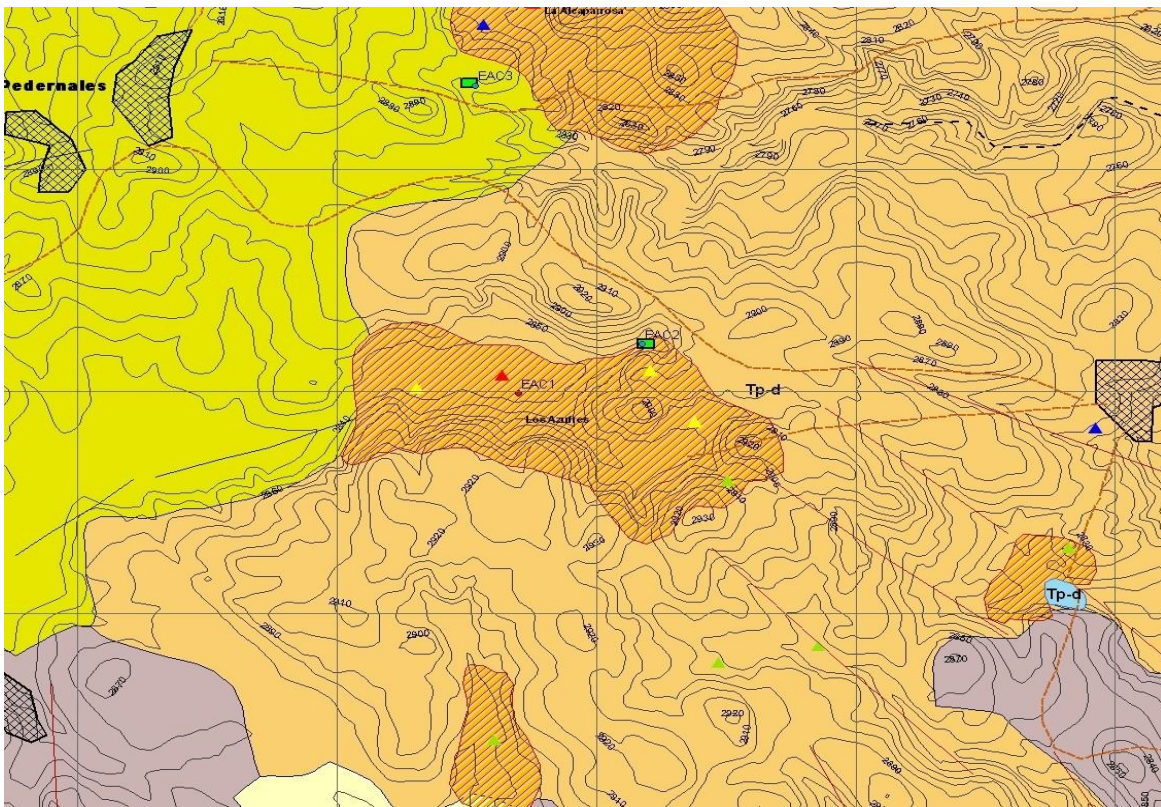


Fig. 1. Ubicación de los pozos EAC-1 y EAC-2 del área de Acapulco, Pue. (Mapa proporcionado por el ingeniero Germán Raúl Ramírez Silva).

2. ESTUDIOS PREVIOS

Los estudios de exploración geotérmica que incluyen reconocimientos preliminares de geología, geofísica y geoquímica de la zona geotérmica en cuestión se remontan a la década de los 80. Sin duda los estudios de geología y geofísica son cruciales en la exploración geotérmica; sin embargo, los estudios de geoquímica son el complemento ineludible y necesario cuando se interpretan de manera adecuada, sobre todo en términos de la evolución en tiempo y espacio del sistema geotérmico. Al respecto, en 1994 se elaboró un estudio geoquímico que aunque no daba cuenta exacta de la evolución del sistema (Tello-Hinojosa, 1994) sí contaba con las bases para llevar a cabo esta tarea, e incluso ya era una advertencia para calibrar las expectativas de la zona. Para la realización del estudio de geoquímica a detalle se muestrearon en total 39 manantiales, cuyas temperaturas varían de 13°C a 49°C (Tello-Hinojosa, 1994). A continuación se discuten sucintamente los puntos más importantes de dicho estudio.

a) Los fluidos ubicados dentro de la zona de Acapulco son de tipo sulfatado-ácido y se originan por la mezcla de H_2S de origen geotérmico con H_2O superficial (Fig. 2, Tello-Hinojosa, 1994). Cuando estos fluidos reaccionan con la roca circundante a temperaturas cercanas al punto de ebullición originan que se altere a caolinita, sílice residual, sulfuros, azufre nativo, etc. La baja temperatura actual de los manantiales hace suponer que ya no están reaccionando con la roca circundante.

b) La composición química de los gases de la zona de Acapulco corresponde a la esperada en un ambiente geotérmico, debido a que el CO_2 es el más abundante. La temperatura máxima estimada por medio del geotermómetro de gases es de 173°C y corresponde al manantial de La Alcaparroza (M14).

c) La composición isotópica del agua de los manantiales para las muestras de Los Azufres (M21 y M23) que se ubican también dentro de la zona de Acoculco presentan un enriquecimiento en oxígeno-18 producto de la interacción agua-roca a altas temperaturas. El resto de los manantiales presentan una composición isotópica característica de agua de origen meteórico.

d) De la relación entre el Log K/Ca versus el Log K/Mg en la que también se incluye la temperatura K/Mg y la presión parcial del CO₂ (P_{CO2}, Fig. 2) se deduce de manera simple que el sistema es de roca dominante, es decir, la roca predomina sobre el fluido, y se encuentra muy cerca del equilibrio total. Esto ocurrirá cuando la interacción agua-roca está por fenecer o ha fenecido. Los dos pozos que se perforarían posteriormente, corroborarían esta predicción.

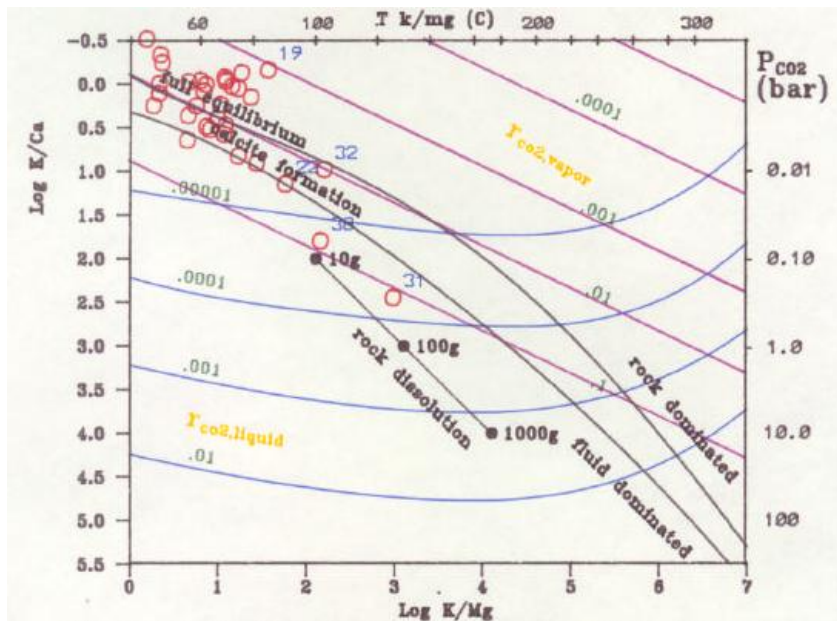


Fig. 2. Log K/Ca versus el Log K/Mg para muestras de fluidos de la región de Acoculco, Pue. (Tello-Hinojosa, 1994).

Es de recordar que hoy en día los manantiales son fríos, y las emanaciones de gas también. Sin embargo, en el pasado geológico no muy remoto fueron muy calientes si se toma en cuenta que el remanente reactivo es una vasta alteración hidrotermal de tipo ácido sulfatada representada por la existencia de una fuerte caolinización, silicificación (sínter) y oxidación, asociados con la precipitación de sulfosales, pirita y azufre nativo. Evidentemente este tipo de alteración ocurrió a temperaturas muy cercanas al punto de ebullición del fluido geotérmico, a presión atmosférica e incluso a mayor temperatura un poco debajo de la superficie. Para este tipo de reservorios se ha acuñado el término *kaipohan* (Bogie et al., 1986) sin que ello conlleve *per se* el hecho de que sean rentables.

A pesar de ello el interés geotérmico del área se ha basado, con mucho, en la existencia de la emanación de gases de origen magmático, tales como CO₂, H₂S, H₂, y He, N₂, Ar, Ne, así como la alta concentración isotópica de He en los manantiales de los Azufres (3He/4He = 8.5) considerada como de las más altas del Cinturón Volcánico Mexicano, lo que ha sugerido un alto potencial geotérmico, susceptible de explorarse (Rocha-López et al. 2006).

3. POZO ACOCULCO 1 (EAC-1)

En 1995 se perforó el pozo EAC-1 en la zona de Los Azufres-El Potrero Colorado, cuyos resultados fueron realmente preocupantes porque aunque la temperatura era muy atractiva (260°C a 1500 m de profundidad) la permeabilidad era literalmente nula: el binomio muy común en el tema de la exploración geotérmica. En la Figura 3 se observan la distribución de la temperatura y la presión con respecto a la profundidad, tanto para el pozo EAC-1 como para el EAC-2, que se discutirá más adelante.

Zona Geotérmica Acoculco
Perfil de Temperatura y Presión
Comparativo Pozo EAC-1 y EAC-2

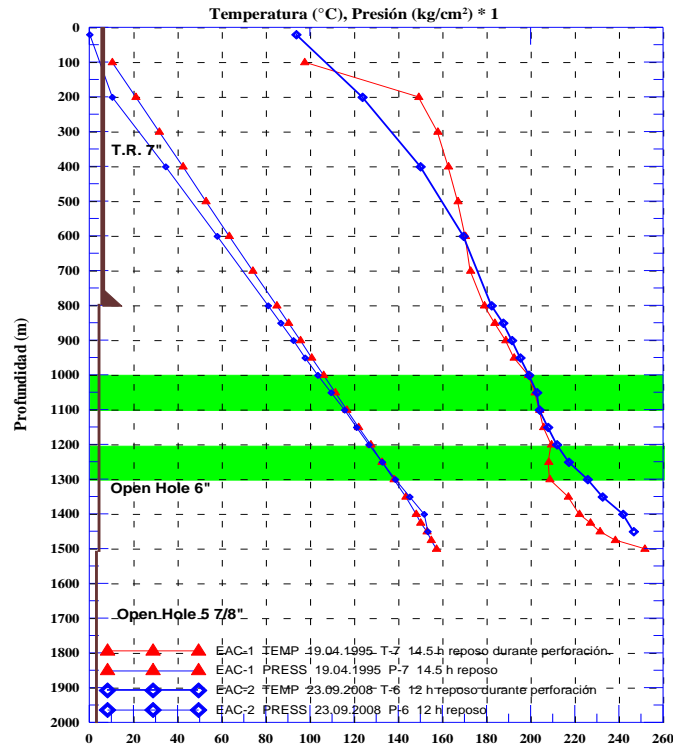


Fig. 3. Presión y temperatura en los pozos EAC-1 y EAC-2. Obsérvese que en ambos pozos la presión corresponde a una columna hidrostática y las temperaturas, muy parecidas, se ajustan a regímenes conductivos. Ambos pozos están ubicados casi a la misma altitud: entre 2840 y 2850 msnm.

Las características petrológicas de las rocas atravesadas por este pozo se proveen en la Tabla 1 (Rocha-López *et al.*, 2006).

4. POZO ACOCULCO 2 (EAC-2).

La ubicación de este pozo, que dista del EAC-1 unos 500 m hacia el NE (Fig. 1), se fundamentó en minuciosos levantamientos de geología estructural, principalmente en la zona del pozo EAC-1, es decir, en la zona de Los Azufres-El Potrero Colorado. También se propuso otra localización en la zona de La Alcaparroza para la perforación futura, si así fuese, del pozo EAC-3. Con la recopilación e integración de datos de campo y la elaboración de estereogramas se puede establecer la presencia de cuatro sistemas estructurales dentro de las zonas termales de Los Azufres-Potrero Colorado y La Alcaparroza, estructuras que crean las condiciones favorables de permeabilidad, que sin lugar a dudas controlan el

flujo de los fluidos termales a profundidad (Rocha-López et al., 2006). En la Tabla 2 se proporcionan los datos exactos de la ubicación del pozo EAC-2.

Profundidad	Litología	Mineralogía	Origen	Alteración
0-130m. Textura piroclástica	Toba vítrea dacítica alterada	Vidrio, feldespatos potásico, líticos de dacita.	Freatomagmático Explosivo freático.	Arcillas, calcita cuarzo, pirita
50-150m	Sistema Falla	Chignahuapan	NW-SE	
140-200m Textura holocristalina microporfídica	Dacita microporfídica matriz microlítica	Fenocristales de oligoclasa, en una matriz microlítica, feldelato, plagioclasa, y cuarzo.	Volcanismo efusivo	Arcilla, calcita, pirita, cuarzo y hematita.
210-230m Textura piroclástica.	Ignimbrita dacítica	Vidrio, fragmentos cristales y roca	Base de formación brechosa. Explosivo.	Oxidación rojiza
240-390m	Riodacita porfídica y microporfídica.	Cuarzo, feldespatos potásico y plagioclasa. Holocristalina	Volcánico a subvolcánico Explosivo.	Cuarzo, calcita arcillas, pirita hematita.
400-790m	Pórfido riodacítico. De grano fino. 740m metamorfismo incipiente	Oligoclasa-andesina, ortoclasa y cuarzo	Subvolcánico. Domo Pórfido Riodacítico	Disminuye alteración. A partir de los 580m Óxidos
790-1660	Skarn calcáreo. Mezcla calcita, micrita, microespatita, espatita, y fragmentos de pórfidos riodacíticos y cuarzo. Aplitas.	FACIES Calcárea: 790-900m.: calcita, cuarzo, microespatita, micrita Granate: 910-1010m. Diopsida-epidota (1010-1200m) Mármol: 1210-1290m Diopsida-epidota	Metamorfismo Contacto (termal). De carácter local	Sobreposición de eventos metasomáticos. Wollastonita, reacción del $\text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$

Tabla 1. Petrología del pozo EAC-1 (Rocha-López et al., 2006).

Pozo EAC-2	
UBICACION:	PLATAFORMA: Nueva
COORDENADAS ORIGEN	COORDENADAS OBJETIVO
X: 590,200	X: 590200
Y: 2203240	Y: 2203240
Z: 2850 m.s.n.m.	Z: 850 m.s.n.m.
TIPO POZO: Vertical	RUMBO DESVIACION: No aplica
DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL: No aplica	
PROFUNDIDAD TOTAL VERTICAL: 1900m	
PROFUNDIDAD TOTAL DESARROLLADA: 1900m.como máximo.	
OBJETIVO: Interceptar cruce de los Sistemas E-W, NW-SE: Chignahuapan y NE-SW, a partir de los 900 m*	
ZONA DE INTERÉS: 900-1900 (fracturamiento)	

Tabla 2. Características topográficas del pozo EAC-2, Acoculco, Pue. (Rocha-López et al., 2006)

Este pozo se perforó a 1900 m de profundidad. Durante su perforación se obtuvieron 183 muestras de canal colectadas a intervalos de 10m mismas que fueron analizadas bajo el microscopio petrográfico con el fin de:

- Caracterizar los rasgos mineralógicos primarios y texturales de las rocas.
- Caracterizar la mineralogía hidrotermal y así poder interpretar el fenómeno hidrotermal con miras ingenieriles. En este rubro se determinaron parámetros como: temperatura e historia térmica, permeabilidad, pH, presión, ebullición (o flasheo), etc.

5. PETROGRAFÍA PRIMARIA EN EL POZO EAC-2 (UNIDADES LITOLÓGICAS): BREVE HISTORIA GEOLÓGICA.

Las unidades litológicas encontradas y descritas petrográficamente se distribuyen de la siguiente manera:

De 2 a 340 m de profundidad el intervalo es una secuencia de rocas ácidas o silíceas fuertemente alteradas por fluidos hidrotermales. Se trata de ignimbritas vítreas desvitrificadas y fuertemente alteradas, dacitas alteradas e incluso rocas menos ácidas como andesitas, también fuertemente alteradas. Debido a la enorme intensidad de alteración de este intervalo las texturas son relictas y por lo tanto sólo fueron inferidas.

De 350 a 450 m de profundidad se atravesó un paquete sedimentario del Cretácico constituido por rocas calcáreas arcillosas y limolíticas cuya apariencia esquistosa es muy rara quizá porque se encuentran en el borde de la influencia del cuerpo intrusivo, es decir en el borde de la aureola de metamorfismo, además de que están afectadas por el hidrotermalismo reciente. En todos los casos las arcillas montmorilloníticas están recrystalizadas por el metamorfismo de contacto originado por el intrusivo más profundo y por el hidrotermalismo reciente. En algunos especímenes se observó la alternancia de calcita recrystalizada con arcillas sedimentarias tipo hidrotermales.

De 450 a 1580 m de profundidad se presenta el cuerpo metamórfico de contacto propiamente dicho. Se trata de un hornfels de calcita-wollastonita-granate-cuarzo y diópsida de textura granoblástica que se originó por metamorfismo de contacto de rocas calcáreo-silíceas (por ejemplo calizas arenosas, pero no margas). El metamorfismo de contacto se genera por la influencia calorífica de la roca intrusiva en la roca calcárea encajonante y de los cuerpos diasquísticos de cuarzomonzonita porfídica (véase adelante). A partir de 470 m de profundidad se detectaron con bastante frecuencia unos cuerpos intrusivos cuarzomonzoníticos de textura porfirítica (probablemente corresponden a las mal clasificadas riodacitas del pozo EAC-1 que aparecen a 400 m, ver Tabla 1) cuyos minerales contienen abundantes inclusiones de vapor del estadio neumatolítico-magmático, pero no del hidrotermal reciente. Las fases mineralógicas máficas (como la hornblenda) de estas rocas, están ausentes debido a procesos de alteración hidrotermal. Estos cuerpos cuarzomonzoníticos están relacionados genéticamente con el granito subyacente y fueron derivados de él por diferenciación magmática e inyectados en forma de sills o láminas (a través de los planos de estratificación) y/o diques (a través de fallas o fracturas). Una roca ígnea con estas características se denomina diasquística, es decir, tiene una composición diferente a la del plutón del cual se deriva.

En términos de diferenciación magmática, se podría especular respecto a la incongruencia genética de un cuerpo ígneo relativamente más básico (la cuarzomonzonita) sobreyaciendo a su magma parental menos básico (el granito). Los fenómenos de diferenciación magmática son muy complejos y, paradójicamente, muy versátiles, de tal suerte que pueden facilitar la explicación: aun no bien estático

el cuerpo magmático, es decir, aun en ascenso, y por lo tanto no bien diferenciado, intrusionó a las rocas más someras con una composición cuarzomonzonítica. Ya después, estacionado, evolucionó a granito.

Así, estos cuerpos cuarzomonzoníticos fueron inyectados desde el granito subyacente durante su etapa pneumatolítica adquiriendo incluso texturas quasi-fluidales al alojarse en la caliza a través de planos de estratificación o fallas o fracturas quebradizas que no se difundieron más arriba por la naturaleza arcillosa y menos quebradiza del paquete previo, es decir de las rocas calcáreo-lutíticas (350-450 m), o simplemente por falta de ímpetu del líquido magmático intrusivo.

La ausencia de un zoneamiento metamórfico de contacto gradual a partir de la aparición de las rocas calcáreas (350 m) y en cambio una súbita aparición del hornfels de calcita-wollastonita-granate-diópsida (450 m), cuya mineralogía pertenece a una zona de alto grado de metamorfismo de contacto, se debe a la presencia de los cuerpos diasquísticos. El intervalo comprendido entre 1130 y 1590 m está cubierto por las mismas rocas metamórficas de contacto de tipo hornfels pero ahora atravesadas por rocas graníticas de grano muy fino (microgranitos). Estrictamente hablando ya no es un cuerpo diasquístico porque su composición es la misma que la del granito del cual se deriva y que la subyace, aun cuando su emplazamiento sea similar a las cuarzomonzonitas de más arriba. La roca microgranítica también se inyectó en los planos de fallas o en fracturas asociadas y debe ser la parte marginal del cuerpo intrusivo granítico propiamente dicho, que fue encontrado a mayor profundidad (1580 m). Su enfriamiento brusco en ese espacio relativamente reducido le ha conferido ese tamaño tan fino de grano, casi como el de una riolita o riolacita microcristalina. Estas rocas tampoco muestran la fase máfica.

De 1580 a 1900 m de profundidad se cortó el cuerpo intrusivo. Es una roca de textura granular alotriomórfica constituida por feldespato potásico, hornblenda muy abundante y reactiva con el feldespato circundante y cuarzo, mostrando una gran variedad de texturas como la gráfica, mirmequítica, micropegmatítica, etc. Estas rocas contienen abundantes trozos de caliza que al ser asimilada se metamorfizó y dio como resultado el susodicho hornfels. En este paquete, como es de esperarse, desaparecen los cuerpos diasquísticos, pero la evidencia de fallamiento de acuerdo a la identificación de texturas cataclásticas continúa vigente.

La Orogenia Laramide desarrollada a finales del Cretácico y a principios del Terciario deformó las rocas calcáreas marinas depositadas en los mares mexicanos mesozoicos, que de hecho predominaban en el territorio. De manera concomitante, las rocas fueron intrusionadas por cuerpos plutónicos silíceos o ácidos que dieron lugar al metamorfismo de contacto en sus bordes o aureolas y a la mineralización terciaria. El primer fenómeno ocurrió en el pozo pero el segundo no, aunque en el área está presente. Después, ya durante el Plioceno, se formó el Cinturón Volcánico Mexicano originando grandes centros eruptivos y sus sistemas hidrotermales asociados cuya vigencia es hasta el presente, como el caso del hidrotermalismo de Acoculco. En la Tabla 3 se sintetiza la geología del área. La Figura 3 es la columna litológica, basada en estudios petrográficos, del pozo EAC-2.

6. MINERALOGÍA HIDROTHERMAL E INTERPRETACIÓN EN EL POZO ACOCULCO-2 (EAC-2)

Los minerales hidrotermales encontrados en las rocas y su distribución porcentual relativa se muestran en la Tabla 4. Las asociaciones y su evolución se explican enseguida.

Profundidad (m)	Descripción petrográfica simplificada	Observaciones
2-340	Ignimbritas, dacitas y andesitas de rasgos primarios relictos por exceso de alteración.	Vulcanismo terciario-cuaternario e hidrotermalismo reciente.
350-450	Calizas lutítico-limolíticas metamorfizadas y alteradas.	Borde del cuerpo metamórfico de contacto cretácico sin intrusiones diasquísticas salvo en la parte superior.
450-1580	Hornfels de calcita-wollastonita-granate y diópsida intrusionado por cuerpos cuarzo-monzoníticos y micrograníticos	Metamorfismo de calizas silíceas del Cretácico producto del intrusivo subyacente y por abundantes cuerpos diasquísticos cuarzo-monzoníticos y por microgranitos.
1580-1900	Granito de hornblenda intrusionando a las calizas. Contiene fragmentos de hornfels derivados de las calizas asimiladas.	Granito post-cretácico o cretácico.

Tabla 3. Unidades litológicas y evolución simplificada en el pozo EAC-2, Acoculco, Pue.

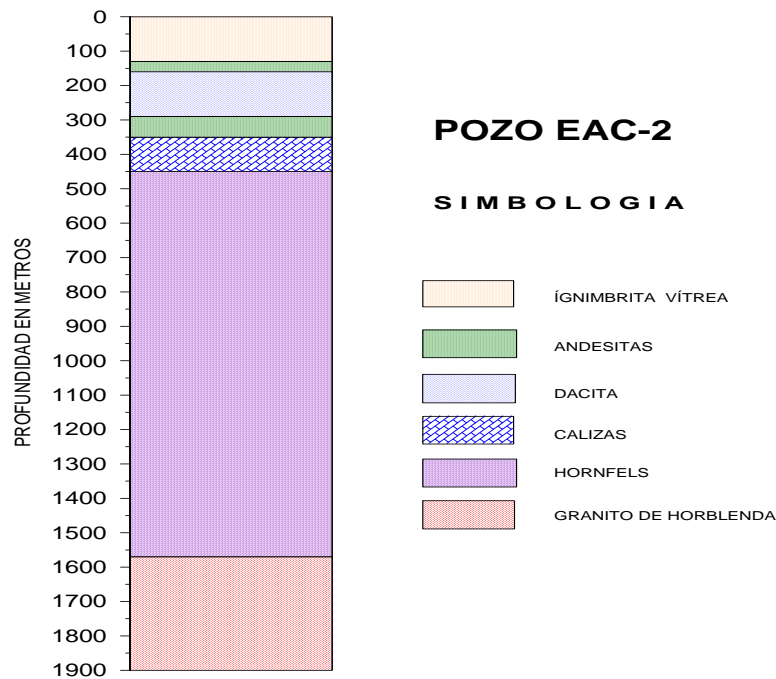


Fig. 3. Columna litológica basada en estudios microscópicos del pozo EAC-2

El paquete de rocas silíceas más somero está fuertemente alterado a cuarzo+pirita+arcillas de tipo caolinítico hasta la profundidad de 190 m. Esta alteración se debe a fluidos generados por vapores ricos en H_2S mezclados con agua meteórica, es decir, se ha originado en la zona vadosa a temperaturas de al menos $100^\circ C$. A partir de 200 m hace su aparición la calcita, para hacerse omnipresente a lo largo del pozo, lo cual significa que, a partir de ahí, inicia la zona bifásica, todavía en las rocas más recientes. Las arcillas gradualmente se transforman en montmorillonita sola o en montmorillonita/illita interdigitadas o bien en illita sola.

A partir de 390 m de profundidad aparece la anhidrita si bien desaparece a 520 m y después ya es muy esporádica su presencia. La wairakita sólo se detectó a 640, 650 y quizá a 990 m de profundidad. El

cuarzo hojoso (*bladed*), que es una típica evidencia de ebullición, se encontró en las siguientes profundidades: 670, 710, 1160, 1170, 1190, 1200 y 1210 m, asociados a fallas mineralizadas y por lo tanto activas.

La epidota asociada a calcita+cuarzo=pirita aparece a 70 m pero en los cuerpos diasquísticos cuarzomonzónicos que intrusionan al hornfels y que están comúnmente asociados a fallas. En la medida que desaparecen los cuerpos cuarzomonzónicos o micrograníticos desaparece la epidota al grado de que en el intrusivo granítico sólo se presenta en fallas activas, predominando la asociación CA+PY.

El único mineral verdaderamente omnipresente y abundante es la pirita (PY) que muy a menudo se observa como post-impresiones (*overprints*) de otros minerales férricos tanto primeros como hidrotermales, tal es el caso de la epidota. También se le encuentra diseminado con profusión y de manera fortuita sin aparente conexión con otros minerales. Esto se debe a que algo de H_2S líquido puede estancarse en algunas oquedades y así reaccionar con el hierro de algunos minerales para dar lugar a la formación de pirita. Su presencia, por lo tanto, no siempre es indicativa de buena permeabilidad ya que puede derivarse de un fluido tardío quizá remanente y estancado que reacciona de manera aislada con algún mineral férrico primario o incluso secundario, en cuyo caso muy a menudo se encontraría reemplazada por pirrotita.

Así la alteración hidrotermal que está representada por calcita+cuarzo+pirita+epidota cristalina y esporádicamente anhidrita, se ha originado en el microgranito y a través de los planos de falla que son abundantes. De esta manera el hornfels sufrió una incipiente alteración hidrotermal. Es decir, primero se inyectó el granito en las fracturas del hornfels y después sufrió la alteración hidrotermal referida debido a la reacción de sus minerales primarios con los fluidos hidrotermales actuales que aprovecharon la permeabilidad generada por los sills o diques al haberse contraído por enfriamiento. Lo que querría decir que la cuarzomonzonita, el microgranito, y por supuesto las fallas activas son la clave de la permeabilidad por su asociación genética con fallas, fracturas y planos de estratificación.

También se observó granate hidrotermal a 960, 1010 y 1020 m de profundidad asociado a calcita+cuarzo+pirita+epidota. Este mineral es uno de los minerales calcosilicatados de mayor temperatura ($>300^\circ C$) en los ambientes hidrotermales donde ya el líquido está casi ausente y el tenor CaO es predominante.

La presencia contradictoria de eventos de alta permeabilidad, como la ebullición, con eventos de baja permeabilidad, como los *overprints* de pirita y el granate, podría significar que las condiciones han cambiado y que el área se ha autosellado, es decir, se ha reducido significativamente su permeabilidad.

Los minerales más recientes como los *overprints* de pirita y el granate podrían estarse formando por fluido remanente de baja movilidad y de condiciones diferentes al original, rico en H_2S y en CaO. En respuesta a este fenómeno se podrá verificar que el perfil de temperaturas medidas (Fig. 4) presenta una disminución promedio de unos $150^\circ C$ con respecto a las esperadas por las isogradas de la primeras ocurrencias tanto de epidota como de granate.

En la Tabla 5 se simplifica la interpretación basada en la presencia de los minerales hidrotermales encontrados en el pozo EAC-2.

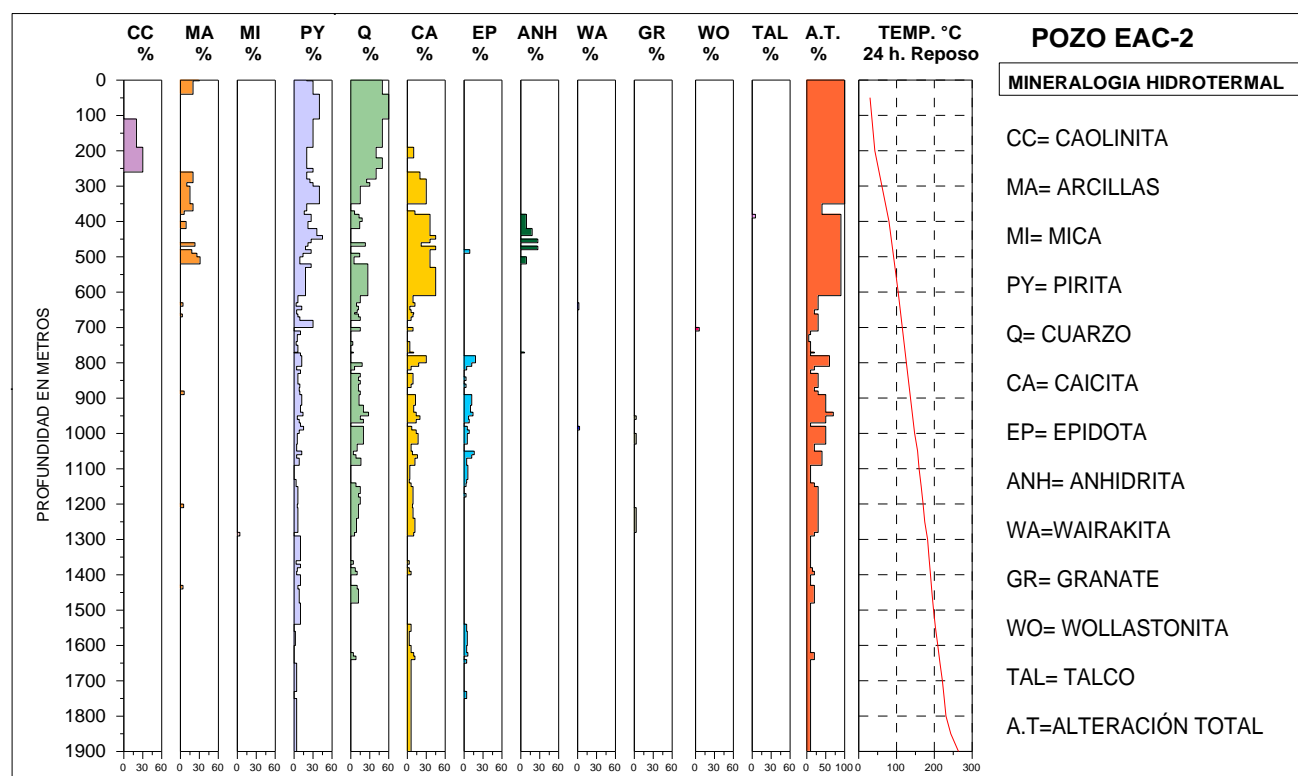


Fig. 4. Distribución porcentual y gradual de la mineralogía hidrotermal, analizada microscópicamente, y de las temperaturas (24 horas de reposo) contra la profundidad en el pozo EAC-2.

7. CONCLUSIONES

La alteración hidrotermal superficial del sistema de Acoculco, Pue., específicamente donde se han perforado los dos pozos EAC-1 y EAC-2, es ácido-sulfatada en la descarga (*up-flow*), debido a la separación de H_2S desde la zona bifásica que al mezclarse, o no, con fluido meteórico ha producido minerales como arcillas caoliníticas, cuarzo calcedónico y pirita, entre otros. Probablemente el área fue muy activa superficialmente en vapor y gases (fumarolas) desprendidos desde abajo y mezclados con agua meteórica, lo cual dió como resultado la vasta alteración hidrotermal superficial detectada incluso a la profundidad de 200 m. Lamentablemente no se cuenta con un mapeo preciso de las zonas alteradas como tampoco se tiene una caracterización mineralógica de las mismas. La importancia de tales tareas radica en que las zonas alteradas representan los “puntos” de descarga (*up-flows*) del yacimiento que se ubica directamente debajo de estos cerca de los mismos. Su caracterización junto con la geoquímica contribuye al conocimiento de la evolución del sistema.

Esta alteración tan intensa ha confeccionado una potente capa sello que detuvo el remanente y quizá exiguo fluido bifásico profundo hasta antes de la perforación del pozo. Una característica típica de esta detención del flujo a expensas de la susodicha capa sello es la formación de la brecha hidrotermal detectada a 300 m de profundidad. Hoy en día, sin embargo, el fenómeno de interacción agua-roca a nivel superficial y también profundo, parece no estar vigente debido a que los manantiales están “fríos”. Esto significaría que los gases geotérmicos arriban a la superficie solos y fríos (de ahí la formación de mofetas en el lugar), es decir, sin vapor lo que conlleva que los acuíferos superficiales meteórico ya no se calienten y no reaccionen con el H_2S . Vale decir que estas características conceptuales encajan muy bien con las de los denominados *kaipohanes* sin que esto signifique que son

sistemas hidrotermales activos y por lo tanto rentables, desde el ángulo netamente hidrotermal, como ya se apuntó.

Mineral o asociación	Litología y profundidad	Interpretación
Q+PY+CC+CL/SM	Ignimbritas, dacitas y andesitas de rasgos primarios relictos por exceso de alteración. Hasta 200 m.	Zona vadosa, fluido ácido-sulfatado. La presencia de CL/SM indica neutralización del fluido pero puede ser meteórica. Constituye una capa sello que detuvo el fluido bifásico remanente hasta antes de perforación.
Pirita en <i>overprints</i>	Casi en toda la columna.	Fluido tardío rico en H ₂ S probablemente estancado, o de movilidad restringida, reactivo con hierro de otros minerales. Oxidada a menudo por ebullición.
Calcita- <i>in</i>	Idem, 200 m.	Inicio de zona bifásica sódico-clorurada. Ebullición eventualmente.
Anhidrita	A partir de 390 m. Véase descripción petrográfica.	Reacción H ₂ S con H ₂ O por ebullición. Puede oxidar la pirita previa (?).
Q <i>bladed</i>	670, 710, 1160, 1170, 1190, 1200, y 1210 m	Ebullición en el momento de su formación.
Wairakita	640, 650 y quizá a 990 m.	Idem, fluido sódico clorurado de neutro a ácido. Temperaturas >230°C.
Epidota cristalina	A partir de 490m y después variable pero en los cuerpos diasquísticos y en fallas activas.	Fluido sódico clorurado de neutro a ácido. Temperaturas > 250
Granate	960, 1010, 1020, 1220 y 1230	Fluido sódico clorurado alcalino rico en CaO. Reacción anhidra. Temperatura > 300° C

TABLA 5. Minerales hidrotermales clave e interpretación.
Claves: Q= Cuarzo, PY=Pirita, CC=Caolinita, CL=Clorita, SM= Smectita.

Después de 200 m de profundidad la alteración es de tipo clorurada sódica supeditada en general, en términos de flujo, a la permeabilidad generada por el emplazamiento de los cuerpos cuarzomonzoníticos y micrograníticos en la caliza, ahora hornfels, junto con las fallas asociadas. Y esto es más obvio cuando se verifica la vigencia de actividad de estas últimas por la presencia de minerales hidrotermales deformados debido al efecto de cizalla de la falla. En el cuerpo granítico la alteración es muy reducida y está ligada sólo a fallas activas. Por ejemplo (pero no únicamente) después de 1740 m (ya en el granito) se identificó epidota deformada alojada en fallas.

El zonamiento hidrotermal relativamente caótico (sin una progresividad evidente) por la heterogeneidad geohidrológica del medio rocoso alcanzó temperaturas tan altas como de 250°C (epidota) a partir de 400 m y de más de 300°C (granate) desde 900 m. La actividad tectónica provocó una importante estimulación de la permeabilidad lo que trajo como consecuencia una intensa ebullición y entoces un brusco depósito de minerales con la consecuente reducción de la permeabilidad. La presencia de cuarzo hojoso y de wairakita representan la ebullición (entre 670 y 1210 m de profundidad) en tanto que la pirita en *overprints* y el granate podrían representar el fluido remanente de flujo restringido ya en la etapa final de la actividad hidrotermal.

La pirita oxidada y asociada a calcita es síntoma de ebullición y los pseudomorfos de pirita según pirrotita son consecuencia de la reducción de la permeabilidad. Estos últimos no fueron verificados

pero se podrían identificar con un estudio mineragráfico. La primera ocurrencia de epidota franca a ~400 m de profundidad, que representa temperaturas de 250°C comparada con la temperatura medida que es de ~100°C, implica *grosso modo* un enfriamiento de unos 150°C, que ciertamente no significa nada (desde la perspectiva de los EGS) si se toma en cuenta que el área tiene conexión con cuerpos magmáticos en enfriamiento (según lo dicta la emanación de gases), aunque el sistema hidrotermal no se haya restablecido o reciclado por las características mecánicas de la roca y seguramente porque el plutón en enfriamiento ya no se mueve hacia arriba (?). En otras palabras, el sistema hidrotermal parece poco longevo aunque el termalismo profundo parece muy atractivo.

La gráfica de la Figura 2 era una infalible alerta de que las condiciones hidrotermales del subsuelo se encuentran en su etapa climáctica: la mayoría de los manantiales se encuentran muy cerca de la región de roca dominante (es decir, la roca predomina sobre el fluido y así el régimen ya no es convectivo), además la presión parcial del CO₂ es muy baja y se ha formado calcita, seguramente la fase sellante más abundante.

Pero el hallazgo de epidota deformada en fallas es una evidencia de tectonismo activo del área y este rasgo podría servir de base para una estimulación de la permeabilidad en el pozo a través de un frente de agua fría, abriendo así la posibilidad de la explotación de un sistema geotérmico mejorado (EGS, por sus siglas en inglés). No exactamente del tipo de roca seca caliente (*hot dry rock*) porque en el caso de Acoculco, las estructuras no están del todo ausentes y podrían, presumiblemente, estimularse. En este punto, conviene considerar las características petrofísicas de las rocas tales como resistencias, conductividad térmica, etc. De ser posible valdría la pena experimentar con modelos reales con el fin de verificar la verdadera vulnerabilidad de las rocas del yacimiento a ser fracturadas (*cracked*) por inyección de agua fría. En este renglón es preciso recalcar que la naturaleza ya no alcanzó este cometido.

Las condiciones térmicas y litológicas de los dos pozos perforados en el área (EAC-1 y EAC-2) son muy similares, salvo la enorme discrepancia litológica (por ejemplo, obsérvese la profundidad de la roca metamórfica: skarn en el EAC-1 y hornfels en el EAC-2) muy a pesar de su cercanía y de la inexistencia de desplazamiento vertical entre ambos. Para tal situación, convendría la unificación de criterios a través de una revisión, por quien suscribe, de las secciones delgadas del pozo EAC-1, las cuales fueron estudiadas en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al ingeniero J. Guadalupe Gómez López del Departamento de Exploración de la GPG/CFE la elaboración de las figuras 3 y 4.

REFERENCIAS

- Bogie, I., J.V. Lawless and J.B. Pornuevo, 1986. Kaipohan: An apparently nonthermal manifestation of hydrothermal systems in the Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 31, No. 3-4, pp. 281-292.
- Rocha-López, S., E. Jiménez-Salgado y H. Palma-Guzmán, 2006. Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Acoculco, Pue. CFE, informe interno No. OGL-ACO-03/06. Inédito.

Tello-Hinojosa, E., 1994. Química de los fluidos hidrotermales de la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Pue. CFE, informe interno No. GQ-013/1994, Octubre/1994. Inédito.