

Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán, México

Julio César Viggiano Guerra
Luis C.A. Gutiérrez Negrín

Comisión Federal de Electricidad, México

La integración e interpretación de los resultados de la exploración realizada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la zona geotérmica de Araró, Michoacán, particularmente de uno de los pozos profundos (el pozo Z-3), permite concluir que hay evidencias de que en el subsuelo de la zona existe un yacimiento geotérmico que ha venido profundizándose con el paso del tiempo. Presenta un régimen de flujo de bajo relieve en zona de fractura de tipo stock work, con temperaturas medias a altas (220 a 250°C), fluidos de tipo clorurado sódico y dimensiones limitadas a un conducto estrecho vinculado probablemente con la falla Araró-Zimirao y a profundidades superiores a la que tuvo el pozo Z-3. Las evidencias indican también que es un sistema convectivo de líquido dominante con salinidad del orden de 4,000 ppm y descarga rápida con escasa pérdida de calor, que ha estado sujeto a procesos de autosellamiento e hidrofracturamiento a lo largo de su existencia.

Palabras clave: alteración hidrotermal, Araró, fluidos geotérmicos, geotermia, Michoacán, régimen de flujo.

Introducción

La zona geotérmica de Araró se encuentra en la parte nororiental del estado de Michoacán, cuarenta kilómetros al noreste de la ciudad de Morelia. La principal zona de manifestaciones termales está ubicada a los 19°53'54" de latitud norte y a los 100°49'50" de longitud oeste, aproximadamente cuatro kilómetros al norte de la población de Zinapécuaro (ilustración 1).

La exploración geotérmica de la zona se llevó a cabo en dos etapas, culminando ambas con la construcción de un pozo profundo. El pozo Z-2, perforado en un área sin manifestaciones termales superficiales (ilustración 1), fue terminado en 1981 a una profundidad de 2,450 m. Los estudios previos de sustento para su localización habían empezado desde la década de los sesenta (Razo, 1965). Puesto que este pozo se ubicó fuera del área de interés, no se discuten sus resultados en este estudio.

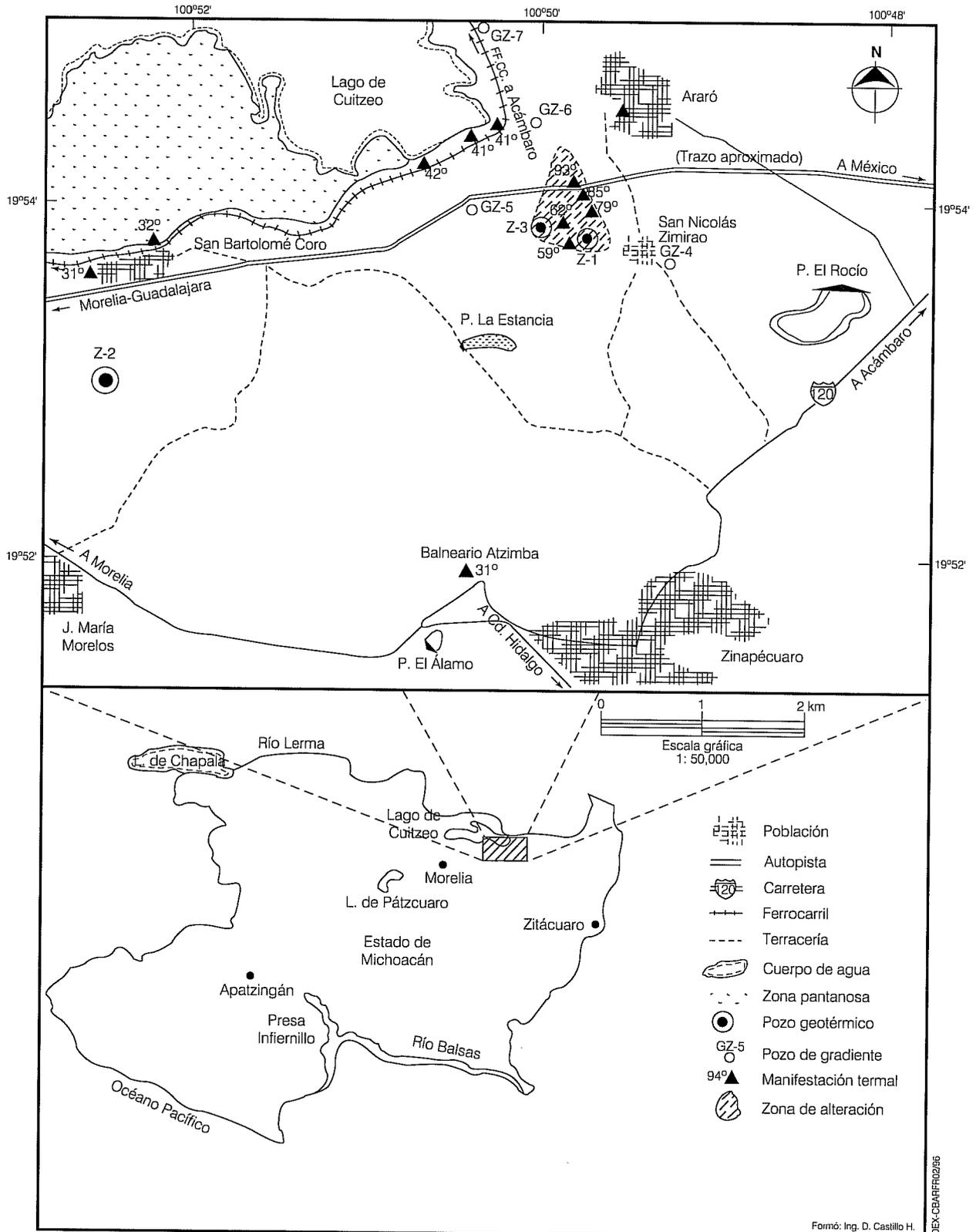
El siguiente pozo profundo, denominado Z-3, se finalizó en 1991 a una profundidad de 1,344 m, aunque estaba programado a dos mil metros. La construcción

de este pozo fue antecedida por una nueva etapa de exploración que se realizó hacia finales de la década de los ochenta, misma que incluyó la perforación de cinco pozos de gradiente, con el objetivo de medir el gradiente térmico y, en la medida de lo posible, estudiar la descarga de calor más superficial del área.

El estudio que se presenta a continuación tiene como objetivo recopilar y reinterpretar los estudios de geología, geoquímica, petrología y mineralogía realizados en las rocas y fluidos tanto de superficie como del pozo Z-3 para definir las características principales del régimen de flujo a profundidad.

Una de esas características es la semejanza del sistema hidrotermal de Araró con los yacimientos de tipo *stock work* que han sido documentados en ambientes geotérmicos activos (Hedenquist y Henley, 1985; Henneberger y Browne, 1988). El *stock work* se caracteriza por tener una serie de fisuras a grande y pequeña escala, ramificadas y rellenas de minerales a profundidades relativamente someras del orden de cientos de metros. Hay también una abundancia de brechas

Ilustración 1. Localización de la zona termal de Araró, Michoacán.



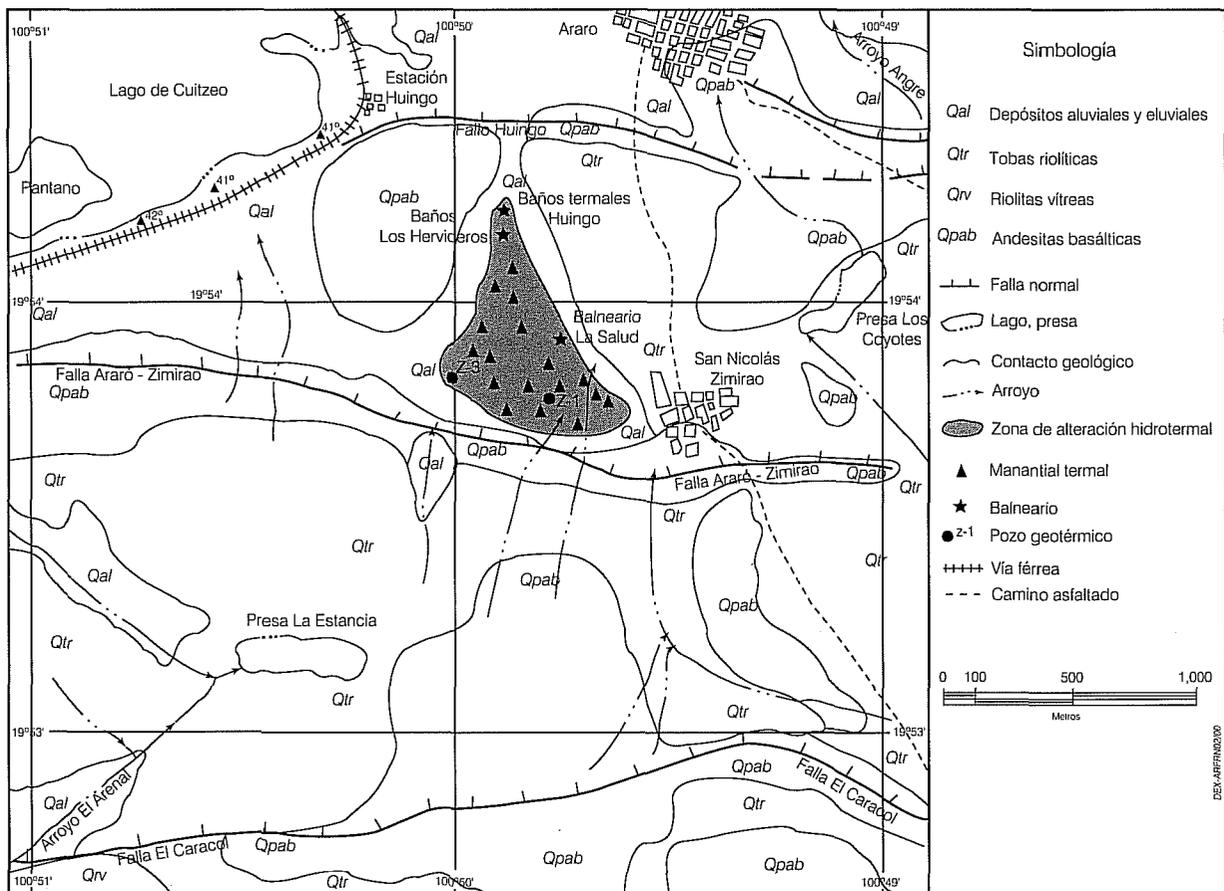
hidrotermales. En la base de la zona altamente fracturada y permeable se encuentra un estrecho conducto alimentador o "garganta" (*throttle*) (Hedenquist y Henley, 1985). Estos yacimientos se asocian comúnmente con los denominados yacimientos de zona de fractura (Hochstein, 1993), ubicados entre dos fracturas que se profundizan abruptamente y exhiben una permeabilidad vertical alta a través de algún segmento de la falla, en tanto que las rocas circundantes tienen baja permeabilidad. En estos sistemas los fluidos meteóricos penetran profundamente (hasta cinco kilómetros) y se calientan en la parte más profunda de la zona de fractura. Los fluidos calentados ascienden rápidamente por la garganta (*throttle*) o conducto alimentador, misma que puede extenderse por unos pocos kilómetros de longitud a lo largo del rumbo de la falla desde la zona donde se calienta. Las descargas superficiales de calor de estos sistemas son del orden de 10 a 30 MWt, en áreas donde la zona de fractura es más ancha de cien metros e incluso puede alcanzar dos kilómetros (Hochstein, 1993).

Geología

La zona geotérmica de Araró, Michoacán, se encuentra en la depresión de Cuitzeo, misma que es parte de una gran fosa tectónica de orientación este-oeste que se extiende desde el lago de Chapala hasta Tepetongo. Fisiográficamente se ubica en la porción oriental de la parte central de la Faja Volcánica Mexicana.

Las estructuras locales más importantes y aparentemente activas son las fallas Huingo y Araró-Zimirao, de tipo normal y orientación general este-oeste, con variaciones hasta noreste-suroeste (ilustración 2). A través de ellas aflora la mayor parte de las manifestaciones termales cuyas características se describen más adelante. Estas estructuras configuran un sistema de bloques escalonados hacia el norte (y en menor grado hacia el noroeste), con ligeros basculamientos hacia el sur (y en menor grado al sureste) (Departamento de Exploración, 1989). La falla Araró-Zimirao parece haber tenido

Ilustración 2. Geología de la zona geotérmica de Araró, Michoacán.



actividad reciente, ya que en su escarpe del bloque del piso se han reportado restos de alfarería de culturas precolombinas incluidos en sedimentos lacustres (Casarrubias *et al.*, 1990). Esto significa que no había expresión superficial del salto de la falla cuando estos grupos vivían en la zona, habiéndose activado (o reactivado) la falla posteriormente, es decir, dentro del último milenio.

La estratigrafía volcánica regional ha sido estudiada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) desde 1978 (Camacho y Ramírez, 1978). La secuencia volcánica es la que se presenta en el cuadro 1 (Casarrubias *et al.*, 1990; Quijano, 1992).

Estas unidades volcánicas son cubiertas por depósitos eluviales y de talud, así como por aluviones. En el área que comprende la ilustración 2 afloran tres de las unidades mencionadas: las andesitas basálticas (Qpab), las riolitas vítreas (Qrv) y las tobas riolíticas (Qtr).

En la región hay evidencias de un vulcanismo cuaternario, predominantemente riolítico, con edades que fluctúan entre 1.54 y 0.9 millones de años. Las fases finales de este vulcanismo fueron de composición basáltica, con edades aun más recientes de 0.9 millones de años.

Hidrología y termalismo

La zona geotérmica de Araró forma parte de la cuenca hidrográfica del lago de Cuitzeo, de forma ovalada y alargada en dirección este-oeste, en la cual descargan el Río Grande de Morelia y el Río Chiquito, así como los arroyos Queréndaro, Zinapécuaro y San Marcos. La cuenca tiene una sola descarga superficial, de tipo artificial, que es el dren La Cinta en la parte norte del lago (Departamento de Exploración, 1989).

En el ámbito local, el dren principal es el arroyo Zinapécuaro, de tipo perenne, cuyas aguas vienen de la sierra de Los Azufres y desembocan en la ciénaga de Queréndaro. Otros arroyos importantes que fluyen gran parte del año son El Arenal, que descarga en la presa de

La Estancia, y el Arroyo Angre (ilustración 2).

El acuífero superficial del valle de Araró está compuesto por fragmentos clásticos y sedimentos lacustres, con un espesor cambiante de cien a doscientos metros. El nivel freático es también variable, con elevaciones entre 1,870 y 1,830 msnm y profundidades de 0 a 25 metros, aflorando en el lago de Cuitzeo. La dirección del flujo subterráneo es de sur a norte, teniendo a la sierra de Mil Cumbres como área de recarga y en algunas porciones de este a noroeste la Sierra de San Andrés como área de recarga. En todos los casos, la zona de descarga es el lago de Cuitzeo (Departamento de Exploración, 1989).

Las manifestaciones superficiales de la zona geotérmica consisten en manantiales de agua caliente con escape de gases. Las temperaturas superficiales varían desde 30°C hasta la temperatura local de ebullición. Las manifestaciones más importantes son las de San Nicolás Zimirao, en las que se registran temperaturas entre 39 y 93°C, en una superficie aproximada de 100,000 m².

En esa zona de San Nicolás Zimirao el nivel freático es muy somero, de alrededor de un metro de profundidad, pero el acuífero está mezclado con agua termal procedente del subsuelo. Las aguas mezcladas brotan en la superficie en forma de manantiales calientes con gastos de diez a veinte litros por minuto. En el subsuelo de esa zona se infiere la presencia de una capa arcillosa, constituida por sedimentos lacustres, que actúa como capa sello. Pero en donde es interceptada por fracturas y fallas se rompe, permitiendo que se manifieste el termalismo y produciendo depósitos superficiales de sínter, calcita y cloruro de sodio (Departamento de Exploración, 1989; Casarrubias *et al.*, 1990).

Además de la de San Nicolás Zimirao, otras zonas con manantiales termales son las de la Estación Huingo, con 41°C; los Baños Huingo, con temperaturas entre 40 y 44°C, y los de Cal y Canto, con 42°C, todos en la ribera del lago de Cuitzeo (ilustración 2).

Cuadro 1. Secuencia cronoestratigráfica regional.

Unidad	Símbolo		Edad
Basalto y conos cineríticos	Qbc		
Tobas riolíticas	Qtr		
Riolitas fluidales vítreas	Qrfv	Cuaternario	Pleistoceno
Riolitas vítreas	Qrv		
Andesitas basálticas	Qpab		
Sedimentos lacustres	Qpl		Plioceno-Pleistoceno
Andesitas microcristalinas	Tpa	Terciario	Plioceno

Geoquímica y flujo de calor

Se realizaron análisis hidroquímicos de cincuenta manantiales ubicados en la parte central de la zona geotérmica, en una superficie de unos 100,000 m² localizada inmediatamente al noroeste de San Nicolás Zimirao (ilustración 2), así como del agua de dos pozos de uso agrícola cercanos a esa zona. En el cuadro 2 se presentan los resultados de esos análisis químicos (Tovar, 1991; Tello y Quijano, 1983).

Los manantiales de San Nicolás Zimirao (ilustración 2) tienen aguas salinas con conductividades eléctricas promedio de 4,600 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y salinidad del orden de los 2,340 miligramos por litro (mg/l) también en promedio. Las aguas son de tipo clorurado sódico, con concentraciones de cloruros de 825 mg/l en promedio y máximos de más de 1,000 mg/l, con concentraciones de boro promedio de 55 mg/l y máximos hasta de 79 mg/l (cuadro 2). Entre los gases desprendidos por algunos manantiales, el principal es el bióxido de carbono, con componentes menores de ácido sulfhídrico, hidrógeno, gases nobles (He, Ne, Ar) e hidrocarburos como metano, etano y benceno (Departamento de Exploración, 1989).

La salinidad y composición de los gases sugieren que las aguas de los manantiales de San Nicolás Zimirao provienen de una mezcla entre aguas geotérmicas profundas con acuíferos dulces someros. Esto se corrobora por las temperaturas de equilibrio obtenidas mediante la aplicación de geotermómetros convencionales, varios de los cuales arrojan temperaturas de fondo superiores a los 200°C, como se observa en el cuadro 3, que presenta la temperatura de equilibrio mínima, máxima y promedio (Tello y Quijano, 1983). Debe notarse que las temperaturas de equilibrio reportadas en este cuadro provienen de un conjunto de varios análisis de muestras colectadas exclusivamente de manantiales del área de Zimirao.

Las variaciones en las temperaturas mínima y máxima para cada geotermómetro del cuadro 3 se deben a la mayor o menor conexión del manantial de que se tomaron muestras, con el probable fluido profundo y la consiguiente mayor o menor dilución de tales fluidos en el agua del acuífero somero con la que se ha mezclado. Conviene tener en cuenta que los geotermómetros son ecuaciones que tratan de sistematizar observaciones empíricas realizadas a lo largo de muchos años en ambientes geotérmicos de uno u otro tipo, por lo que no constituyen un método exacto para predecir una temperatura de fondo. Son, en cambio, otra herramienta útil de la cual echar mano al explorar una zona, cuyos resultados tienen que integrarse y ponderarse con los demás. Pueden consultarse mayores datos sobre algunos de los geotermómetros usuales en fluidos geotérmicos en

Fournier (1977), Swanberg y Morgan (1978), Giggenbach (1980, 1988), Arnorsson y Gunnlaugsson (1985), y D'Amore y Panichi (1980), entre otros.

Se configuraron en planta las temperaturas termométricas superficiales de los resultados obtenidos con la aplicación del geotermómetro de K/Na y del geotermómetro de sílice que asume enfriamiento conductivo (Tovar, 1991). En las configuraciones puede observarse la presencia de un decremento de temperatura hacia la zona norte, es decir hacia la falla Huingo, lo que, aunado a las demás características químicas de los manantiales, sugiere que las posibilidades de encontrar temperaturas altas a profundidad hacia la parte norte son menores (Tovar, 1991).

Se calculó también el valor de la relación atómica Cl/B en los manantiales. Esta relación, como se sabe, no es un geotermómetro del cual se puedan estimar temperaturas de fondo, pero el conocido origen profundo del boro es un buen indicador cualitativo sobre la probable existencia de un yacimiento geotérmico en el subsuelo. En Araró esta relación resultó con un promedio de 4.8. Como medida comparativa, en los fluidos de los pozos del cercano campo geotérmico de Los Azufres la relación es de 5.8 en promedio. Esto sugiere que las condiciones termales del subsuelo en Araró podrían ser similares a las de Los Azufres (Tovar, 1991).

Los estudios geoquímicos superficiales también sugieren que las aguas están en equilibrio, ya que los fluidos ricos en H₂S y CO₂ han sido neutralizados. La neutralización se lleva a cabo con la consecuente formación de especies minerales sulfurosas como pirita (FeS₂) y carbonatadas como calcita (CaCO₃) (Tovar, 1991). Se sugiere, asimismo, que el HCl ha sido neutralizado al formarse NaCl en la superficie a expensas del sodio de las plagioclasas sódico-cálcicas (Tello y Quijano, 1983). En la zona de interés de San Nicolás Zimirao se observan depósitos de cloruro de sodio que algunos lugareños suelen comercializar eventualmente como sal de mesa. También hay depósitos de calcita, sínter silícico y, con menos frecuencia, de pirita, en las rocas de los alrededores de la zona.

Otros manantiales cercanos, como los de Atzimba y San Bartolomé Coro (ilustración 1), son de baja salinidad, con aguas de tipo bicarbonatado sódico y concentraciones muy bajas de cloruros (un máximo de 15 mg/l), como se puede ver en el mencionado cuadro 2. Estos manantiales pertenecen a acuíferos termales someros sin relación directa con acuíferos geotérmicos (Departamento de Exploración, 1989), por lo que resultan de menor interés.

Los cálculos de flujo de calor arrojan resultados que varían de 4.4 a 6 unidades (UFC), considerándose como valores indicativos de buen potencial geotérmico todos

Cuadro 2. Resultados de análisis químicos en muestras de agua de la zona geotérmica de Araró.

Lugar	Fecha	T (°C)	pH	Na	K	Ca	Mg	Li	HCO ₃	Cl	SO ₄	SiO ₂	B	Rb	Cs
Zimirao	Nov. 1990	63	7.48	751	55.9	43.6	0.5	5.8	285.5	909.5	108.1	226.8	58.7	0.60	1.50
Zimirao	Nov. 1990	56	8.41	780	54.2	43.1	42.8	6.0	444.5	903.6	120.1	220.4	55.3	0.60	1.60
Zimirao	Nov. 1990	51	7.43	766	46.1	46.1	0.9	5.8	288.5	974.5	103.1	220.4	62.1	0.74	1.55
Zimirao	Nov. 1990	70	7.60	746	33.9	33.9	1.2	5.8	143.3	880.0	106.1	229.0	52.0	0.67	1.50
Zimirao	Nov. 1990	80	8.15	730	48.5	26.1	0.4	6.0	65.6	856.0	118.5	252.5	60.4	0.70	1.40
Zimirao	Nov. 1990	76	7.26	672	43.4	28.0	9.5	5.6	139.0	785.5	120.5	244.0	53.7	0.50	1.20
Zimirao	Nov. 1990	66	7.97	753	49.0	21.2	0.2	6.2	69.0	868.2	121.0	246.1	62.1	0.70	1.40
Zimirao	Nov. 1990	90	7.65	746	47.8	28.2	0.3	5.6	100.7	844.6	119.5	231.1	57.0	0.63	1.50
Zimirao	Nov. 1990	84	7.49	169	18.6	25.8	3.0	0.8	12.8	177.2	105.6	119.8	3.4	0.17	0.00
Zimirao	Nov. 1990	80	7.56	763	52.0	23.3	0.3	5.9	127.8	974.5	100.2	244.0	58.7	0.70	1.60
Zimirao	Nov. 1990	78	7.92	750	43.6	20.1	0.1	6.0	74.1	868.2	101.7	248.2	30.2	0.60	1.40
Zimirao	Nov. 1990	83	7.78	719	49.3	36.8	0.4	5.8	148.8	844.6	104.6	218.3	55.3	0.60	1.40
Zimirao	Nov. 1990	82	7.73	737	49.9	21.3	0.3	5.6	92.1	856.4	115.5	226.8	60.4	0.65	1.50
Zimirao	Nov. 1990	66	7.51	757	48.5	19.8	0.1	5.8	38.3	921.3	94.7	222.6	62.9	0.60	1.50
Zimirao	Nov. 1990	70	7.57	761	49.6	22.3	0.0	6.0	74.8	865.2	126.4	229.0	53.7	0.70	1.40
Zimirao	Nov. 1990	93	7.91	685	51.3	19.0	0.0	5.7	69.5	862.3	112.0	220.4	56.2	0.70	1.40
Zimirao	Nov. 1990	90	7.57	773	53.0	34.3	0.5	6.1	196.0	939.0	107.6	218.3	72.1	0.58	1.60
Zimirao	Nov. 1990	71	7.76	715	51.5	23.0	0.1	5.8	75.6	844.6	119.0	211.9	62.1	0.70	1.50
Zimirao	Nov. 1990	68	8.16	715	50.9	40.8	0.5	5.8	128.6	844.6	101.2	211.9	52.0	0.70	1.50
Zimirao	Nov. 1990	81	8.06	730	54.0	39.0	0.7	5.5	192.5	880.0	100.7	237.5	58.7	0.70	1.60
Zimirao	Nov. 1990	92	7.70	724	44.6	20.7	0.1	5.6	71.5	850.5	122.0	237.5	63.7	0.63	1.30
Zimirao	Nov. 1990	85	7.75	688	44.3	29.6	0.0	5.6	60.0	880.0	103.1	235.4	62.1	0.60	1.30
Zimirao	Nov. 1990	83	7.45	717	50.0	41.8	2.7	5.4	247.2	838.6	93.7	216.1	60.4	0.54	1.40
Zimirao	Nov. 1990	76	7.65	738	53.8	17.4	0.3	5.7	110.1	891.8	90.3	231.1	63.7	0.70	1.55
Zimirao	Nov. 1990	92	8.04	742	51.4	19.4	0.0	5.6	33.9	885.9	100.7	237.5	50.3	0.70	1.50
Zimirao	Nov. 1990	80	7.69	785	52.5	41.1	0.5	6.2	131.8	918.4	120.5	216.1	65.4	0.70	1.50
Zimirao	Nov. 1990	74	7.39	760	52.5	17.1	0.0	6.0	103.7	968.6	100.2	244.0	72.1	0.68	1.60
Zimirao	Nov. 1990	85	7.59	732	49.0	23.1	0.3	5.6	133.8	868.2	115.0	186.2	67.1	0.60	1.60
Zimirao	Nov. 1990	92	7.64	711	46.4	15.2	0.1	5.6	108.6	874.1	102.2	226.8	47.0	0.61	1.70
Zimirao	Nov. 1990	60	8.02	706	51.2	41.9	0.3	5.5	227.9	832.7	89.8	235.4	63.7	0.66	1.40
Zimirao	Nov. 1990	39	7.95	715	52.8	42.7	1.1	5.5	267.5	823.9	90.8	214.0	58.7	0.70	1.50
Zimirao	Nov. 1990	52	8.24	670	48.8	41.6	0.3	5.3	194.9	803.2	92.2	256.8	50.3	0.69	1.40
Zimirao	Nov. 1990	62	7.53	690	47.1	42.0	1.1	5.4	291.1	832.7	88.8	145.5	58.7	0.60	1.40
Zimirao	Nov. 1990	50	7.40	686	46.6	45.4	1.1	5.4	280.6	800.3	84.3	139.1	26.8	0.60	1.30
Zimirao	Nov. 1990	71	7.94	668	47.9	47.1	2.9	5.6	312.7	820.9	94.2	139.1	52.0	0.60	1.30
Zimirao	Nov. 1990	60	8.03	756	53.2	34.6	1.3	6.1	168.9	880.0	123.9	211.9	60.4	0.68	1.40
Zimirao	Nov. 1990	92	7.85	756	49.2	24.6	0.1	5.8	50.1	891.8	94.7	250.4	78.8	0.63	1.50
Zimirao	Nov. 1990	59	8.12	696	48.2	42.9	1.0	5.5	248.3	797.3	100.7	160.5	58.7	0.60	1.30
Zimirao	Nov. 1990	41	7.59	348	32.5	23.7	5.5	1.7	250.0	413.4	41.2	169.1	53.7	0.33	0.30
Zimirao	Nov. 1990	40	8.05	185	20.5	16.2	5.2	1.1	191.0	206.7	20.3	139.1	15.1	0.19	0.00
Zimirao	Nov. 1990	53	7.67	776	55.6	45.4	1.1	5.9	257.1	927.2	122.5	224.7	45.3	0.80	1.60
Zimirao	Nov. 1990	62	7.71	821	55.0	44.3	0.6	6.5	266.8	945.0	120.0	134.8	53.7	0.73	1.50
Zimirao	Nov. 1990	84	7.75	757	53.1	38.2	0.9	5.9	149.9	891.8	105.6	237.5	67.1	0.56	1.50
Zimirao	Nov. 1990	54	7.89	673	41.0	42.4	1.3	5.4	198.3	797.3	92.7	126.4	55.3	0.50	1.20
Zimirao	Nov. 1990	87	8.07	853	52.5	44.3	1.3	5.8	158.3	1027.6	112.1	128.4	72.1	0.70	1.45
Zimirao	Nov. 1990	52	7.58	757	50.3	31.5	0.5	6.1	197.4	927.2	120.0	229.0	58.7	0.70	1.60
Zimirao	Nov. 1990	87	8.02	670	48.1	23.8	1.4	5.2	193.3	815.0	107.0	169.6	50.3	0.60	1.20
Zimirao	Nov. 1990	86	7.41	694	48.9	35.4	0.9	5.4	205.8	844.6	117.5	171.2	58.7	0.70	1.45
Zimirao	Nov. 1990	64	7.84	743	55.1	41.4	1.4	6.1	208.5	885.9	133.4	231.1	65.4	0.70	1.45
Zimirao	Nov. 1990	40	8.27	199	21.0	13.1	4.6	1.1	185.6	224.4	18.7	134.8	33.5	0.20	0.00
Promedios de Zimirao		71	7.78	693	47.5	31.7	2.0	5.4	165.4	825.3	102.5	207.5	55.5	0.62	1.35
Araró (Pozo 1)	Nov. 1990	37	7.96	25.8	7.6	20.0	6.5	<0.1	112.6	35.0	17.3	70.6	1.7	0.06	0.00
Araró (Pozo 2)	Nov. 1990	36	8.23	16.3	8.3	14.3	5.2	<0.1	100.1	20.0	5.7	77.0	0.0	0.03	0.00
Baños Huingo	Ene. 1983	41	6.80	316	30.0	27.0	2.2	2.5	189.0	293.0	60.0	187.0	<0.1	0.20	0.20
S. B. Coro	Ene. 1983	29	6.60	27	4.2	13.8	5.6	0.5	104.0	15.0	0.8	120.0	<0.1	0.00	0.00
S. B. Coro	Ene. 1983	32	7.10	21.2	4.8	13.8	4.8	0.5	129.0	10.1	0.0	120.0	<0.1	0.00	0.00
Baños Alzimba	Ene. 1983	35	6.10	17.0	5.0	6.4	5.7	<0.1	75.0	3.0	0.0	110.0	<0.1	0.00	0.00

Datos de noviembre de 1990, tomados de Tovar (1991). Datos de enero de 1983, tomados de Tello y Quijano (1983).

Cuadro 3. Geotermómetros de los manantiales de San Nicolás Zimirao.

Geotermómetro	Temperaturas (°C)		
	Mínima	Máxima	Promedio
Potasio-magnesio	129	192	160
Potasio-sodio	202	228	205
Sodio-potasio	182	195	188
Sodio-potasio-calcio	174	185	180
Cuarzo conductivo	202	234	220
Cuarzo adiabático	183	212	201
Calcedonia	170	182	175

aquellos superiores a 3.5 UFC (Tovar, 1991). Un cálculo de la descarga de calor en la zona geotérmica, considerando un área de 4.2 km² (es decir, 42 veces mayor que la zona de San Nicolás Zimirao) estima una descarga total de 19.8 MW térmicos, de los cuales el 43% proviene de aportes de tipo convectivo y el restante de aportes conductivos (García y Tovar, 1989).

El área de actividad hidrotermal superficial o de descarga de San Nicolás Zimirao parece coincidir con la única zona de ascenso del fluido procedente de mayor profundidad, esto es, con el sitio del *up flow* (el área de ascenso y descarga vertical). Este *up flow* no emerge por otros sitios cercanos porque el flujo podría estar restringido debido a autosellamientos periféricos.

Por tanto, la limitada extensión superficial de las alteraciones hidrotermales y depósitos de sínter, así como el gasto reducido de los manantiales permite suponer una descarga másica reducida y, consecuentemente, un sistema de dimensiones superficiales muy pequeñas.

Pozo Z-3

Temperaturas y presiones

El pozo Z-3 se localiza aproximadamente a ochocientos metros al occidente de San Nicolás Zimirao, dentro de la zona de manifestaciones termales (ilustraciones 1 y 2). Fue programado para alcanzar una profundidad total de dos mil metros, con el objetivo de explorar el *up-flow* del probable sistema hidrotermal del subsuelo, interceptando a profundidad a la falla Araró-Zimirao. Pero al llegar a los 1,344 metros de profundidad se decidió suspender la perforación debido a que la temperatura medida apenas rebasaba los 100°C.

Los primeros tres metros del pozo Z-3 son un depósito de sínter que incluye sedimentos lacustres (de acuerdo con la presencia de diatomeas), junto con fragmentos de

rocas andesíticas procedentes del subsuelo —debido a explosiones hidrotermales— muy cerca de la superficie y de fragmentos de cortezas de vegetales. Todo ello configura probablemente una antigua descarga superficial del sistema.

Durante la perforación se detectaron tres zonas principales de pérdida de fluidos de circulación: la primera ocurrió a los 29 metros de profundidad, donde se presentó una pérdida mayor de 60 m³ por hora, así como un flujo de agua y gases a 92°C; la segunda se presentó entre los 348 y 353 metros de profundidad, también con más de 60 m³ por hora, donde fue necesario colocar un tapón de cemento; finalmente, a partir de los 1,340 metros de profundidad se detectó una nueva pérdida mayor de 60 m³.

Durante la perforación se tomaron tres series de registros de presión y temperatura. La primera se corrió a los 375 metros de profundidad, midiéndose 92°C a cien metros de profundidad y una temperatura máxima de 102°C al fondo del pozo. La segunda serie registró un máximo de 111°C a 830 metros de profundidad. La última serie, tomada a 1,340 metros de profundidad, registró una temperatura máxima de 101°C al fondo del pozo.

Al decidir concluir la perforación y después de lavar el pozo con agua, el pozo fluyó por sí solo con un caudal calculado en 3.6 m³ por hora de agua a 92°C de temperatura en superficie. Catorce días después, mientras el pozo continuaba fluyendo, se tomó un último registro de temperatura, que marcó un máximo de 135°C a 550 metros de profundidad, y una temperatura de 111°C que se mantuvo desde los 1,050 metros hasta el fondo del pozo.

En general, los registros de temperatura muestran un perfil con valores mayores de los normales, pero con un gradiente nulo o casi nulo. Desde la segunda serie pudo detectarse una zona de aporte, permeable, alrededor de los 550 metros de profundidad. A partir de esta distancia las condiciones térmicas del pozo variaron notoriamente, ya que se presentó un gradiente nulo o ligeramente negativo y la temperatura decreció a valores del orden de 111°C, permaneciendo constante hasta el fondo, lo que sugiere la existencia de un sistema convectivo.

Los registros de presión, por su parte, muestran indefectiblemente un perfil hidrostático con el nivel del agua en el brocal del pozo.

Litología y mineralogía hidrotermal

La columna litológica atravesada por el pozo Z-3 incluye principalmente andesitas y rocas piroclásticas, con brechas de origen hidrotermal intercaladas (cuadro 4, ilustración 3). También se observan a lo largo de casi toda la columna paleosuelos distribuidos irregularmente en el paquete de rocas volcánicas.

Durante el estudio petrográfico de las muestras de canal del pozo se encontraron algunas evidencias de esfuerzos de tensión, probablemente indicativos de zonas de falla, a diferentes profundidades (ilustración 3). Estas evidencias incluyen texturas cataclásticas y extinción ondulante que revela cierto grado de deformación en algunos minerales. De acuerdo con tales evidencias, las probables zonas de falla principales se observan hacia los 300 a 400, 550, 700 a 800, 1,000 y 1,200 a 1,250 metros de profundidad, coincidiendo de manera aproximada los cuatro primeros intervalos con intercalaciones abundantes de brechas hidrotermales (ilustración 3).

Los minerales producto de la alteración hidrotermal encontrados en el pozo son los típicos de áreas donde han circulado fluidos clorurados sódicos de pH cercano al neutral. Sin embargo, el estilo de la alteración y el modo de emplazamiento son bastante sui géneris en este pozo.

Los únicos minerales secundarios presentes en todo el pozo son las arcillas, la calcita y, en menor medida, el cuarzo, con intensidades de alteración aproximadamente constantes y relativamente altas. Las variedades de minerales arcillosos, definidas al microscopio petrográfico a partir de las asociaciones encontradas, son la smectita-illita y la illita. El cuarzo se manifiesta en dos variedades: una criptocrystalina de baja temperatura de formación y acompañada de escamas de hematita y otra microcrystalina de temperatura más alta (ilustración 3).

Otros minerales tienen una distribución espacial más irregular, como la clorita (incluyendo su variedad de alta temperatura, la peninita), la epidota tanto incipiente como cristalina y generalmente reemplazando plagioclasas y augita, y la pirita, formada a expensas de la epidota incipiente y a menudo hematizada. La distribución a profundidad de estos minerales es semejante entre sí y también coincide parcialmente con los intervalos con presencia de brechas hidrotermales (ilustración 3).

Minerales aún más escasos que los descritos son las zeolitas (con variedades de baja temperatura, como

laumontita, pero sin wairakita), que se encuentran en las partes superior e inferior del pozo, así como la anfíbola y el talco. Estos últimos se presentan únicamente a profundidades entre 200 y 250 metros, lo mismo que unas inclusiones fluidas de tipo gaseoso, que pueden representar amplias tasas de ebullición (ilustración 3).

La gran cantidad de brechas hidrotermales coincide de forma aproximada con la aparición de la epidota. Estas son rocas de textura clástica formadas por la presión de los fluidos hidrotermales sobre la roca encajonante y entre los 939 y los 1,140 metros de profundidad predominan sobre las rocas piroclásticas con las que se intercalan (ilustración 3).

Hidroquímica de fluidos profundos

Análisis químicos del agua producida por el pozo Z-3 resultaron en un agua de tipo clorurado sódico muy similar a las aguas de los manantiales cercanos del área de Zimirao. La salinidad total es ligeramente más alta que la de los manantiales, lo mismo que el contenido de cloruros y de boro (cuadro 5). En general, esas mayores concentraciones salinas del agua del pozo se deben a que proviene de la parte más profunda del acuífero somero y es menos ebullicida (Tello y Moreno, 1992).

Las temperaturas de equilibrio agua-roca para los fluidos del pozo oscilan entre los 220 y los 240°C, de acuerdo con el geotermómetro de Na/K para la fase líquida y el geotermómetro de gases H₂/Ar que resultan muy consistentes entre sí (cuadro 6). La relación molar H₂/Ar contra CO₂/Ar sugiere que los gases están en equilibrio con la fase líquida a temperaturas del orden de los 200°C (Tello y Moreno, 1992).

Se estudiaron inclusiones fluidas encontradas en cristales de cuarzo y calcita de profundidades entre 900 y 1,080 metros. Las temperaturas de homogeneización (Th) promedio son muy similares entre sí, entre 218 y 247°C (izquierdo, com. per.), y están en el rango de las calculadas con la geotermometría líquida y gaseosa (cuadro 7).

Cuadro 4. Columna litológica del pozo Z-3.

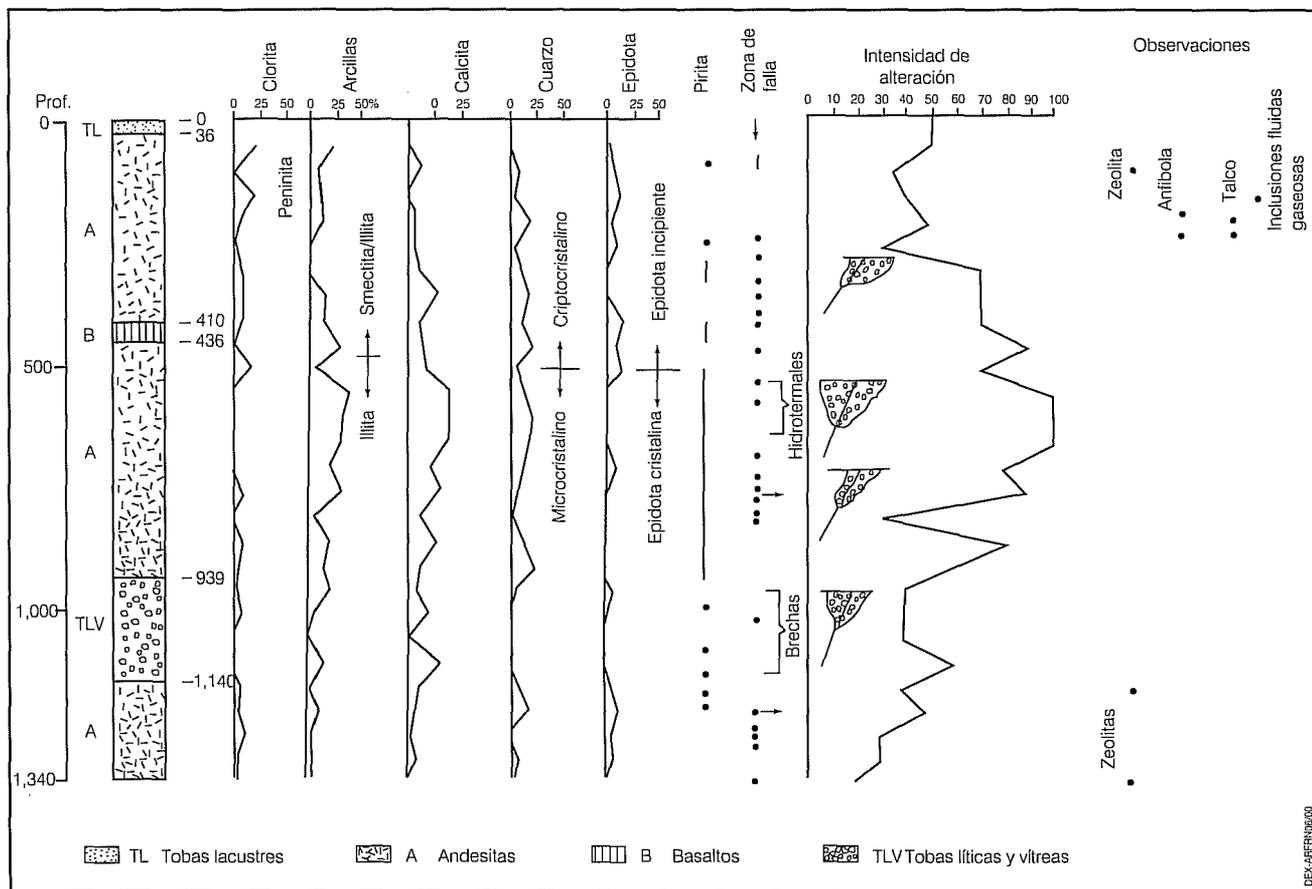
Profundidad (m)	Litología
0 a 36	Tobas de caída depositadas en ambiente lacustre.
36 a 410	Andesitas con intercalaciones de brechas hidrotermales.
410 a 436	Basaltos de augita y olivino.
436 a 939	Andesitas con intercalaciones de brechas hidrotermales.
939 a 1,140	Tobas líticas y vítreas con intercalaciones de brechas hidrotermales.
1,140 a 1,340	Andesitas porfídicas de augita.

Interpretación de los resultados

La presencia de minerales de alto rango de alteración en el pozo Z-3, tales como epidota, anfíbola y talco, indica temperaturas que fluctúan entre 250 y 300°C a una profundidad entre doscientos y trescientos metros. Estas temperaturas de formación son cercanas a las obtenidas por inclusiones fluidas a mil metros de profundidad (hasta 247°C) y por la geotermometría de la fase líquida.

Sin embargo, esos rangos de temperatura son superiores a las temperaturas actuales medidas durante

Ilustración 3. Litología y mineralogía secundaria en el pozo Z-3.



Cuadro 5. Resultados de análisis químicos en muestras de agua del pozo Z-3.

Lugar	Fecha	pH	Na	K	Ca	Mg	Li	HCO ₃	Cl	SO ₄	SiO ₂	B	Rb	Cs	As
Pozo Z-3	Oct. 1991	7.67	742	66.0	71.5	0.11	6.8	222.2	1,045	163.1	-	68.2	0.6	2.0	9.0
Pozo Z-3	Oct. 1991	8.22	784	86.2	93.0	0.20	7.4	214.6	1,148	161.2	-	76.7	1.1	2.6	9.0
Pozo Z-3	Oct. 1991	7.78	708	63.4	70.5	0.10	6.8	132.6	1,031	157.3	-	76.7	0.6	2.0	8.0
Pozo Z-3	Oct. 1991	8.15	714	65.2	61.0	0.11	7.0	165.0	1,031	153.4	-	63.9	0.6	2.0	7.0
Promedio		7.96	737	70.2	74.0	0.13	7.0	183.6	1,064	158.8	-	71.4	0.7	2.2	8.3

Datos de Tello y Moreno (1992). No se reporta el contenido de SiO₂.

la perforación del pozo. Las temperaturas sugeridas por la mineralogía y por las inclusiones fluidas son en realidad paleotemperaturas, es decir, temperaturas que se presentaron en algún momento de la historia del sistema hidrotermal, pero que evidentemente no corresponden a las temperaturas actuales. En cambio, las temperaturas de equilibrio deducidas por los geotermómetros de fase líquida y gaseosa sí son temperaturas actuales, pero

sugieren profundidades mayores que las alcanzadas por el pozo.

Esta falta de correspondencia térmica puede explicarse mediante la profundización del sistema hidrotermal. En efecto, el sistema debió presentar en sus inicios temperaturas entre los 250 y 300°C a profundidades someras (doscientos a trescientos metros), como lo evidencia la presencia actual de epidota, anfíbola y talco

Cuadro 6. Temperaturas de equilibrio de los fluidos producidos por el pozo Z-3.

Muestra	Geotermómetros líquidos (°C)		Geotermómetros de gases (°C)	
	Na-K	Na-K-Ca	H ₂ /Ar	H ₂ /Ar-CO ₂ -Ar
1	223	183	226	160
2	240	193	241	200
3	224	183	--	--
4	225	185	--	--
Promedio	228	186	234	180

Cuadro 7. Temperaturas de homogeneización y de fusión en el pozo Z-3.

Profundidad (m)	Cristal	Th promedio (°C)	Tm promedio (°C)
900	Cuarzo	247	+ 0.1
1,000	Calcita	218	-
1,080	Calcita	233	+ 0.2

a esas profundidades. Procesos de autosellamiento deben haber ido restringiendo el paso de fluidos calientes hacia esos niveles de profundidad, por lo que en una etapa posterior de la evolución del sistema quedaron limitados a profundidades del orden de los mil metros, como lo indican las inclusiones fluidas atrapadas a esa profundidad. La continuación de esos procesos parece haber desembocado en la etapa actual, en la cual los fluidos de mayor temperatura se encuentran a una profundidad aún mayor (por lo menos mayor que la profundidad del pozo Z-3), como lo sugiere la geotermometría de los fluidos.

El régimen hidrotermal parece haber venido profundizándose con el paso del tiempo, pero no ha sido un proceso uniforme, como lo indica la intermitencia de la epidota y la pirita y, especialmente, la abundancia de brechas hidrotermales, las cuales se forman porque las fracturas y fallas originalmente abiertas se rellenan de minerales de alteración y se sellan. La acumulación de más fluidos hidrotermales en las zonas de falla va generando una presión que llega a superar a la presión del agua de poro, provocando la extensión de la falla por fracturamiento hidráulico. La abrupta caída de presión que sigue al fracturamiento provoca, a su vez, pequeños colapsos dentro de la roca de la cual la solución hidrotermal ha migrado, formando de esta manera brechas angulares (Browne, 1991). La mayor cantidad de fracturas y microfracturas se acumula cerca del ápice de la falla sellada.

Así, aunque el resultado neto actual ha sido la profundización del sistema, parecen haber ocurrido procesos de autosellamiento seguidos de procesos de hidrofracturamiento que se van repitiendo a profundidades cada vez mayores. Cuando la presión hidráulica decrece debido al funcionamiento intermitente de la zona de alimentación del sistema geotérmico, también las fracturas y microfracturas se colapsan en forma de fragmentos angulosos para ser acarreados nuevamente por reactivaciones del flujo y ser incluso introducidas dentro de las fisuras. Este funcionamiento alternante puede explicar el estilo de mineralización intermitente observado en el pozo Z-3.

De manera ocasional pueden generarse explosiones hidrotermales superficiales con sus respiraderos resultantes, rasgo que caracteriza a algunos sistemas hidrotermales activos de bajo relieve (Browne, 1984). En la zona de Araró no se han observado estos respiraderos, pero sí las brechas del pozo Z-3, que son productos líticos típicos de explosiones hidrotermales. Además, durante la perforación del pozo Z-3 ocurrió una explosión hidrotermal a los 37 metros de profundidad que levantó una columna de agua y fragmentos de roca.

La distribución intermitente de algunos minerales hidrotermales —y específicamente de la epidota—, junto con la presencia de brechas hidrotermales y de fallas según textura cataclástica, son rasgos de un estilo de alteración propio de los yacimientos de tipo *stock work*.

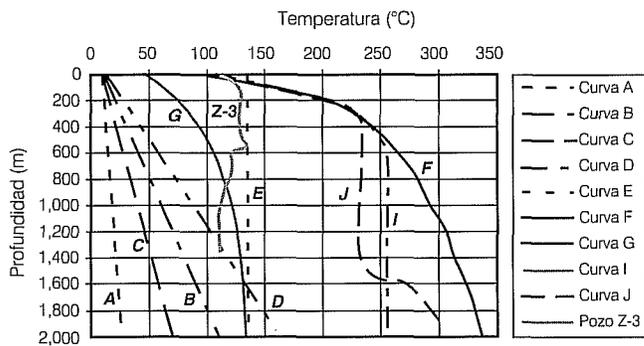
Otras analogías entre los yacimientos de ese tipo y el sistema de Araró son que éste se encuentra entre dos fallas, la de Araró-Zimirao y la de Huingo, cuya distancia horizontal es de 1.25 kilómetros (ilustración 2), con un régimen tectónico probablemente activo. El control del sistema geotérmico parece ser netamente estructural. Los fluidos calientes ascienden por algún conducto restringido a través de la falla Araró-Zimirao y se alojan cerca de la superficie por medio de fracturas ramificadas, donde se mezclan con agua de acuíferos someros fríos para finalmente descargar fluidos casi en ebullición en la

superficie, donde también pueden ocurrir pequeñas descargas laterales (*out flows*). La descarga total de calor en el área es de 19.8 MWt (García y Tovar, 1989), valor coincidente con el rango postulado por Hochstein (1993) para los yacimientos de zona de fractura.

El sistema geotérmico de Araró puede ser considerado, por lo tanto, como un sistema de tipo *stock work* en zona de fractura, que además presenta características de los sistemas convectivos de temperatura moderada y baja salinidad, con descarga rápida, cercano a la presión hidrostática y con escasa pérdida de calor.

En particular, el último perfil de temperatura del pozo Z-3, corrido a la profundidad total con el pozo fluyendo, es muy parecido al perfil característico de los sistemas geotérmicos convectivos de salinidad baja y temperatura moderada, de acuerdo con la recopilación de los perfiles de temperatura típicos en varias clases de sistemas geotérmicos (ilustración 4) (Elders, 1991). En la ilustración 4, Elders (1991) recopiló los perfiles de temperatura típicos de cinco tipos de sistemas geotérmicos predominantemente conductivos y de cuatro tipos de sistemas principalmente convectivos, mostrándose también la curva de ebullición para el agua pura. Como se aprecia, una de tales curvas, la curva E, correspondiente a sistemas convectivos de baja salinidad y temperatura

Ilustración. 4. Perfiles de temperatura en sistemas geotérmicos.



Gradientes conductivos:

- Curva A: gradiente térmico bajo, flujo térmico normal.
- Curva B: gradiente térmico moderado, flujo térmico normal.
- Curva C: gradiente térmico promedio, flujo térmico normal.
- Curva D: gradiente térmico alto, flujo térmico alto.

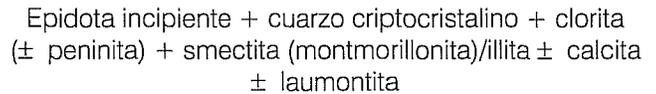
Gradientes convectivos:

- Curva E: sistema de baja salinidad y temperatura moderada con descarga rápida y poca pérdida de calor.
- Curva G: sistema de muy alta salinidad y baja temperatura.
- Curva I: sistema de baja salinidad y alta temperatura.
- Curva J: sistema de vapor dominante hasta 1,400 m, con presiones menores que la hidrostática, alimentado por una salmuera caliente al fondo.
- Curva F: es la curva de referencia de ebullición del agua pura.

moderada, resulta ser bastante similar al último perfil de temperatura registrado en el pozo Z-3.

Interacción agua-roca en el sistema de Araró

La interacción agua-roca ocurrida en el sistema Araró puede deducirse a partir de las asociaciones paragenéticas de minerales hidrotermales en el pozo Z-3. Una de estas asociaciones es la siguiente:

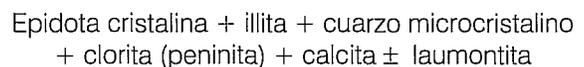


Esta asociación indica la presencia de fluido sódico clorurado a temperatura inferior a 230°C, con un pH neutro en condiciones altamente ebulientes, que pertenece al sistema CaO - Al₂O₃ - SiO₂ - K₂O - H₂O +/- CO₂. La adición de MgO favorece la formación de clorita. Todos los componentes pueden haber sido aportados por la roca huésped, a excepción del CO₂ y, en su caso, del H₂S, que habrían sido aportados por los fluidos hidrotermales.

Dado que la ebullición y la mezcla de fluidos son los procesos principales que afectan la concentración de dióxido de carbono acuoso en los primeros dos kilómetros de profundidad de un sistema geotérmico, la formación de calcita en este ambiente es susceptible a la variación de ambos procesos (Simmons y Christenson, 1994).

No se descarta la posibilidad de la influencia de aguas meteóricas para el depósito de calcita, sobre todo en las zonas periféricas cercanas a la superficie, una vez abiertos los conductos que facilitaron la ebullición. En tal caso, un fluido alcalino rico en carbonatos pudo haber estado depositando calcita en forma alterna a otro fluido rico en especies sulfurosas que depositaba sulfuros como la pirita (FeS₂), por ejemplo. Ambos fluidos habrían ido neutralizándose al depositar calcita y pirita, respectivamente, hasta llegar actualmente a descargar únicamente fluidos sódico clorurados con pH cercano al neutral.

Otra asociación mineralógica encontrada en el pozo es la siguiente:



La formación de esta asociación se explica por los mismos procesos químicos de la anterior, pero con una importante transición de temperatura. Las variedades cristalinas tanto de la epidota como del cuarzo y la presencia de illita y peninita (variedad de alta temperatura de la clorita) indican un incremento de temperatura

superior a 230°C. Sin embargo, la presencia eventual de laumontita, especialmente en la parte inferior del pozo (ilustración 3), podría ser un producto de metamorfismo hidrotermal retrógrado, es decir, de una inversión de la temperatura por el enfriamiento paulatino más reciente. La wairakita, común dentro de esta asociación en otros sistemas del mundo y de México, está ausente en el pozo de Araró, lo que se puede explicar por las grandes tasas de ebullición que inhibieron su formación, favoreciendo en cambio la de la calcita.

Una tercera asociación paragenética es la que sigue:

Cuarzo microcristalino (ferrífero, con escamas de hematita) + illita / montmorillonita + pirita + hematita

En este caso, la asociación no es indicadora de temperaturas específicas sino de procesos de ebullición. Esta asociación mineral se formó de modo consustancial a la ebullición y de manera paulatina o alternada a las asociaciones anteriores. Durante la ebullición de los fluidos geotérmicos, los ácidos volátiles tales como el CO₂ y el H₂S experimentan partición dentro de la fase de vapor, incrementando el pH del líquido residual. Además, los volátiles reducidos tales como el H₂S y el CH₄ sufren partición dentro de la fase de vapor más rápidamente que los volátiles oxidados como CO₂, SO₂ y H₂SO₄. Como consecuencia, el líquido residual

se oxida más durante el *flasheo*, lo que significa que la ebullición conlleva un incremento en el pH y en el estado de oxidación (McKibben, 1981). Esto explica que a menudo algunas fases férricas tanto hidrotermales como magmáticas se cubran de una mancha más reciente de óxidos, pero también coexistan con fases sulfurosas.

En el sistema de Araró, un fluido altamente ebuliente con cantidades apreciables de H₂S se oxidó, dando lugar a H₂SO₄, el cual tiene una amplia capacidad de disolución de los silicatos, lo que a su vez ocasionó la sobre-saturación en sílice del fluido. La sílice finalmente precipitó en forma de cuarzo micro y criptocristalino en las rocas subsuperficiales como en forma de sínter silíceo en la superficie, después de la mezcla del fluido geotérmico con aguas frías del acuífero somero.

Otra respuesta a la oxidación por influencia de la ebullición es la formación de cantidades considerables de escamas de hematita que acompaña a la sílice criptocristalina. Si el grado de oxidación es muy grande, aun en presencia de H₂S, el hierro de los ferromagnesianos se oxida y forma hematita (Fe₂O₃) metasomática o lixiviada, en vez de pirita (FeS₂). De esta manera, el CO₂ y el H₂S quedaron neutralizados, como sugiere la interpretación geoquímica.

En el cuadro 8 se resumen los datos mencionados sobre los fluidos que dieron origen a los principales minerales de alteración.

Cuadro 8. Algunas características de los minerales hidrotermales del pozo Z-3.

Mineral de alteración	Tipo de fluido del cual precipita	Temperatura de formación	pH	Fase estable de oxidación o reducción
Sínter		< 100°C	Neutro a alcalino	Hematita estable
Clorita/smectita	Sódico clorurado y	< 200°C	Neutro a ácido	Hematita estable
Smectita/illita	también mezcla de			
Clorita (peninita)	fluidos ácido sulfatados.	> 200°C	Neutro a ácido	Hematita estable
Illita		> 220°C	Neutro a ácido	Pirita estable
Calcita	Fluido ebuliente rico en CO ₂	Rango no definido	Neutro a alcalino	?
Cuarzo criptocristalino		< 200°C	?	Hematita estable
Cuarzo ferrífero				
Cuarzo microcristalino	Sódico clorurado	> 200°C	?	Pirita estable
Epidota		> 220°C	Neutro a ácido	?
Pirita	Fluido ebuliente rico en H ₂ S	> 200°C	Neutro a ácido	?

Conclusiones

Hay evidencias de que en el subsuelo de la zona geotérmica de Araró existe un sistema geotérmico activo, cuyo régimen de flujo presenta las siguientes características:

- Las temperaturas actuales del sistema son inferiores a las que tuvo en el pasado, ya que las asociaciones mineralógicas del pozo Z-3 indican temperaturas superiores a los 250°C a profundidades menores de trescientos metros, mientras que las temperaturas de homogeneización de inclusiones fluidas sugieren temperaturas del orden de 250°C a mil metros de profundidad. Ello parecería indicar que el sistema geotérmico se ha ido profundizando con el paso del tiempo debido al relleno y autosellamiento de las zonas fracturadas más someras. Esta interpretación es consistente con las temperaturas calculadas con los geotermómetros de fase líquida y gaseosa aplicados a los fluidos del pozo Z-3, que revelan temperaturas de fondo del mismo orden. Por lo tanto, es factible esperar temperaturas actuales de 220 a 250°C en el sistema de Araró, pero a profundidades superiores a las alcanzadas por el pozo Z-3.
- El hundimiento o profundización del sistema no ha sido continuo. Es probable que se hayan alternado procesos de autosellamiento con procesos de hidrofracturamiento en diversas etapas de la historia del sistema. Primero el depósito de minerales hidrotermales va rellenando y sellando las fracturas, después la acumulación de fluidos en esas zonas tiende a incrementar la presión hasta provocar un fracturamiento hidráulico, reabriendo los canales permeables y propiciando después un nuevo depósito de minerales hidrotermales para repetir el ciclo. Este mecanismo alternante explica el estilo de mineralización intermitente del pozo Z-3 y la coexistencia actual de minerales de temperaturas de formación distinta. Por ejemplo, la peninita con zeolitas de baja temperatura, la anfíbola y el talco con smectita/illita y calcita, la epidota y el cuarzo cristalinos y la illita con la laumontita, etcétera.
- El sistema de Araró es, en todo caso, un sistema restringido y probablemente limitado a profundidad a la estrecha zona de ascenso de los fluidos que constituiría la garganta del mismo. Es un sistema convectivo de líquido dominante, con temperaturas medias a altas y baja salinidad (del orden de 4,000 ppm), de descarga rápida, con presiones cercanas a la presión hidrostática y escasa pérdida de calor.
- Desde el punto de vista topográfico es un sistema geotérmico de bajo relieve ubicado en un valle. Como todo sistema de bajo relieve carece de una zona vadosa subterránea con descarga de fluidos ácidos sulfatados. En Araró, en cambio, el nivel freático es muy somero y su descarga directa la constituyen los manantiales de San Nicolás Zimirao, con aguas de composición clorurada sódica.
- Los fluidos clorurados sódicos de Araró llegan a la superficie sobresaturados en sílice y sodio, por lo que depositan sínter y cloruro de sodio. Son fluidos de alta ebullición, gracias a la apertura de canales de descarga debido a la alta presión de los fluidos, según lo sugiere la presencia de brechas hidrotermales detectadas en varios niveles del pozo Z-3. Actualmente, al parecer, este proceso ha terminado por sellar los conductos de descarga.
- La ebullición produjo un incremento en el pH y en la tasa de oxidación, lo que explica que algunas fases férricas se cubran de una mancha más reciente de óxidos, pero también coexistan con fases sulfurosas. La oxidación del fluido del sistema de Araró (que presentaba cantidades apreciables de H₂S) dio por resultado H₂SO₄ que a su vez disolvió a los silicatos. Posteriormente, estos fluidos enriquecidos en sílice depositaron cuarzo cripto y microcristalino en las rocas del subsuelo. Después de mezclarse con agua de acuíferos someros también depositaron sínter en la superficie. La oxidación debida a la ebullición dio lugar, asimismo, a la formación de una gran cantidad de hematita escamosa que acompaña a la sílice criptocristalina.
- El sistema geotérmico de Araró presenta características de los sistemas tipo *stock work* con una serie de fisuras ramificadas y rellenas de minerales a profundidades relativamente someras y con abundancia de brechas hidrotermales. En la base de la zona altamente fracturada y permeable debe de haber un estrecho conducto alimentador o garganta asociado con la falla Araró Zimirao. El sistema se ubica en una zona entre dos fallas importantes (las fallas Araró-Zimirao y Huingo) y su descarga de calor es de dimensiones similares a los sistemas en zona de fractura.

Reconocimiento

Los autores expresan su reconocimiento por la exhaustiva y cuidadosa revisión a que fueron sometidas las primeras versiones de este artículo por parte de dos árbitros anónimos, cuyas valiosas sugerencias y comentarios permitieron organizar mejor las principales ideas que se exponen en el mismo, ampliar y clarificar los conceptos vertidos en él y lograr una presentación más acorde con los estándares técnicos de *Ingeniería Hidráulica en México*. La discusión epistolar posterior con uno de los árbitros, fuerte pero respetuosa, sin duda ha permitido mejorar sustancialmente el trabajo. Vaya nuestro agradecimiento público por ello.

Recibido: 01/03/2001

Aprobado: 04/03/2002

Referencias

- ARNORSSON, S. y GUNNLAUGSSON, E. A new gas geothermometer for geothermal exploration. Calibration and application. *Geochem. cosmochem. acta*. 1985, vol. 49, pp. 1307-1325.
- BROWNE, P.R.L. *Lectures on geothermal geology and petrology*. Report 1984-2. Iceland; UNU Geothermal Training Programme, 1984, 128 pp.
- BROWNE, P.R.L. Mineralogical guides to interpreting the shallow paleohydrology of epithermal mineral depositing environments. *Proceedings of the 13th New Zealand Geothermal Workshop*. Auckland, 1991, pp. 263-269.
- CAMACHO A., F. y RAMÍREZ C., J. *Informe geológico del área geotérmica de Araró-Estación Queréndaro, estado de Michoacán. Informe técnico 3-78*. México: CFE, 1978. 15 pp.
- CASARRUBIAS UNZUETA, Z., IZUNZA G., M.L. y CONTRERAS V., J.A. *Estudio geológico de detalle en la zona geotérmica de Araró-Zimirao, Michoacán. Informe técnico 1-90*. México: CFE, 1990. 23 pp.
- D'AMORE, F. y PANICHI, C. Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas geothermometer. *Geochem. cosmochem. acta*. 1980, vol. 44, pp. 549-556.
- DEPARTAMENTO DE EXPLORACIÓN. *Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Araró, Michoacán. Informe técnico 10-89*. México: CFE, 1989. 18 pp.
- ELDERS, W.A., Geologic models of geothermal reservoirs. *Geothermal resources council bulletin*. Julio de 1991, vol. 20, núm. 7, pp. 231-243.
- FOURNIER, R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*. 1977, vol. 5, pp. 41-50.
- GARCÍA ESTRADA, G.H. y TOVAR AGUADO, R. *Evaluación de la descarga térmica superficial de la zona geotérmica de Araró, Michoacán. Reporte GQ 06-89*. México: CFE, 1989. 24 pp.
- GIGGENBACH, W. Geothermal gas equilibria. *Geochem. cosmochem. acta*. 1980, vol. 44, pp. 2021-2032.
- GIGGENBACH, W. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochem. cosmochem. acta*. 1988, vol. 52, pp. 2749-2765.
- HEDENQUIST, J.W. y HENLEY, R.W. Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: their origin, associated breccias and relation to precious metal mineralisation. *Economic geology*. 1985. vol. 80, núm. 6, pp. 1640-1668.
- HENNEBERGER, R.C. y BROWNE, P.R.L. Hydrothermal alteration and evolution of the Ohakuri hydrothermal system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Journal of volcanology and geothermal research*. 1988, vol. 34, pp. 211-231.
- HOCHSTEIN, M.P. *Geothermal systems and technology*. Course 86.100/8.401. Auckland: Geothermal Institute, University of Auckland, N.Z., 1993. 35 pp.
- IZQUIERDO, G. *Comunicación personal de resultados de estudios de inclusiones fluidas en minerales de cuarzo y calcita del pozo Z-3*.
- MCKIBBEN, M.A. *Hydrothermal mineral assemblages, oxide and sulfide systems*. Pennsylvania: Department of Geosciences, Pennsylvania State University, Course Notes 16802, 1981. 48 pp.
- QUIJANO LEÓN, J.L. *Evaluación de los trabajos exploratorios de la zona geotérmica de Araró, Michoacán. Informe técnico DEX-AR-001-92*. México: CFE, 1992. 27 pp.
- RAZO MONTIEL, A. *Levantamiento geológico regional de las hojas Morelia y Maravatío. Informe interno*. México: CFE, 1965. 9 pp.
- SIMMONS, S. F. y CHRISTENSON, B.W. Origins of calcite in a boiling geothermal zone. *American journal of science*. 1994, vol. 294, pp. 361-400.
- SWANBERG, A. y MORGAN, P. *The linear relation between temperatures based on silica content of groundwater and regional heat flow*. New Mexico: Department of Earth Sciences and Physics, New Mexico State University, 1978, vol. 117.
- TELLO HINOJOSA, E. y QUIJANO LEÓN, J.L. *Reconocimiento y evaluación geoquímica de las zonas termales del lago de Cuitzeo. Informe técnico 33-83*. México: CFE, 1983. 33 pp.
- TELLO HINOJOSA, E. y MORENO OCHOA, J. *Geoquímica de los fluidos producidos por el pozo Z-3 de la zona geotérmica de Araró, Michoacán. Informe técnico OGQ-AR-003-92*. México: CFE, 1992. 16 pp.
- TOVAR AGUADO, R. *Geoquímica del agua de manantiales termales de Araró, Michoacán. Reporte GQ-02/91*. México: CFE, 1991. 15 pp.

Abstract

VIGGIANO GUERRA, J.C. and GUTIÉRREZ NEGRÍN, L.C.A. Hydrothermal flow regime at the Araro, Michoacan, Mexico, geothermal zone. Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish). January-March, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 39-53.

A recent integration and interpretation of the exploration results obtained by the Federal Electricity Commission on the Araró, Mich., geothermal zone, especially those from one of the deep wells (well Z-3), allows to conclude that there is evidence of a geothermal reservoir at the subsurface of the zone. The geothermal reservoir has been deepening and presents a low relief flow regime in a stock work type fracture zone. It also presents middle to high temperatures (220 to 250 °C), sodium chloride type fluids, and its extension is limited by a narrow conduit (throttle), probably related to the Araró-Zimirao fault, at depths below the current depth of the Z-3 well. The flow regime is probably a convection, liquid-dominant system, with salinity around 4,000 ppm, and fast outflow with little heat loss. Some self-sealing and hydro-fracturing processes seem to have occurred in the system.

Keywords: Araró, flow regime, geothermal fluids, geothermics, hydrothermal alteration, Michoacán.

Dirección institucional de los autores:

Julio César Viggiano Guerra
Luis C.A. Gutiérrez Negrín

Comisión Federal de Electricidad
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Alejandro Volta 655, 58290 Morelia, Michoacán, México.
Correos electrónicos: cvg17912@cfe.gob.mx,
luis.gutierrez03@cfe.gob.mx