

Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México

Eduardo González Partida

Universidad Nacional Autónoma de México

Enrique Tello Hinojosa

Comisión Federal de Electricidad

Mahendra Pal Verma

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Los manantiales aledaños al campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, son del tipo bicarbonatado-sódico. Este carácter geoquímico sugiere que se trata de aguas de origen meteórico de reciente infiltración que han circulado a través de roca de tipo volcánico. De acuerdo con el estado de equilibrio agua-roca, se encontró el sistema geotérmico de Los Humeros en desequilibrio. Esto ocurre en sistemas geotérmicos asociados con volcanismo reciente como el de este campo, de tal forma que los gases presentes en el reservorio geotérmico son de origen magmático y el HCl no ha sido totalmente neutralizado por la reacción con los feldespatos y micas. Esto también se confirma debido al alto contenido de H_3BO_3 y As, los cuales indican que el sistema de Los Humeros es reciente. Debido al desequilibrio agua-roca que presenta este campo, los tipos de agua que producen los pozos también son variables y dependen del tipo de pozo y la zona donde produzca. Los pozos más someros presentaron un carácter bicarbonatado-sódico, mientras que los pozos más profundos presentan un tipo geoquímico clorurado-sódico. De acuerdo con los datos de exceso de vapor, se encontró que el pozo H-1 produce en una zona de líquido dominante, mientras que el resto de los pozos producen en una zona de dos fases. De acuerdo con su composición isotópica, los pozos de Los Humeros presentan un corrimiento de oxígeno-18, característico de fluidos de origen geotérmico que se han equilibrado con la roca a altas temperaturas. La mayoría de los manantiales aledaños al campo se ubican en la llnea meteórica.

Palabras clave: manantiales, agua geotérmica, desequilibrio, origen meteórico.

Introducción

El campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, se encuentra ubicado en el centro-orienté del estado de Puebla, en límites con el centro-occidente del estado de Veracruz, a 53 kilómetros al noroeste de la ciudad de Jalapa, Veracruz. Actualmente el campo cuenta con 38 pozos perforados, de los cuales 22 son productores. También desde 1990 se inició la generación de electricidad en este sitio (Tello, 1994). Actualmente se cuenta con siete unidades de generación a boca de pozo de 5 MW cada una. Sin embargo, se tiene contemplada la instalación de dos plantas más de 25 MW cada

una en un futuro inmediato. En la ilustración 1 se puede ver la ubicación de los pozos perforados en este campo.

El objetivo del presente trabajo es definir mediante análisis químicos e isotópicos del agua la relación existente entre las aguas meteóricas de reciente infiltración y las del fluido geotérmico; mostrar sus características químicas y genéticos, y determinar el grado de equilibrio agua-roca. Para lograr lo anterior, después de años de trabajo de campo y análisis de muestras en laboratorio (Tello, 1984, 1988, 1989, 1992 y 1994), se procedió a su interpretación en diagramas triangulares Cl-SO₄-HCO₃ para definir el origen de las aguas. El

Ilustración 1. Geología y localización de pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla.

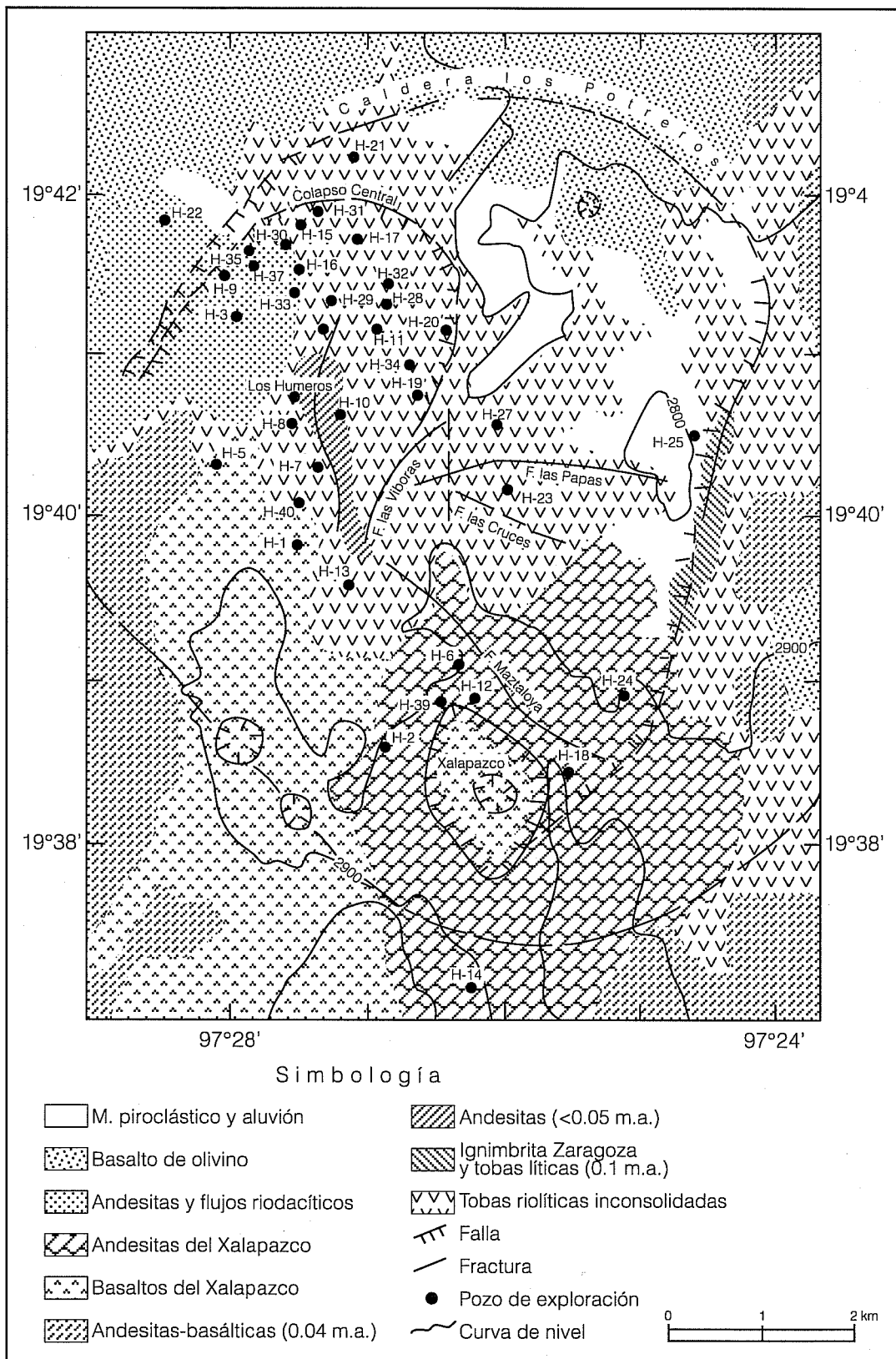


diagrama Na-K-Mg de Giggenbach (1988) se usó para definir el estado de equilibrio del fluido geotérmico y el comportamiento de los manantiales, así como un diagrama cuaternario complementario que relaciona al Na-Mg-K-Ca. Un tercer diagrama que relaciona al Log K/Mg-Log K/Ca-temperatura K/Mg-presión del CO₂ también se consideró en la determinación del equilibrio pozos-manantiales geotérmicos. Finalmente se usó la composición isotópica de las aguas de los manantiales y pozos geotérmicos para definir su origen y grado de interacción agua-roca. La metodología de trabajo y su sustento teórico puede ser consultada en Fournier (1977), D'Amore y Panichi (1980), Giggenbach (1988 y 1989) y Tello (1989, 1992 y 1994).

Geología

La información de la geología superficial ha sido reportada por Viniegra (1965); Meneses (1965) y Tarango (1967); Yáñez y García (1982); Ferriz (1984); Garduño *et al.* (1985); Cedillo (1984); Ferriz y Mahood (1984); Campos y Garduño (1987), y López (1997).

A partir del Jurásico Superior se inició el depósito de lutitas negras carbonosas, con intercalaciones de calizas arcillosas (Fm. Santiago), que posteriormente cambiaron a materiales cada vez con mayor influencia calcárea (Fm. Tamán). En general, la serie jurásica aflora en el norte del área.

A principios del Cretácico, como consecuencia del incremento de la transgresión marina, se favoreció el depósito de sedimentos calcáreos, representados por bancos potentes de calizas cristalinas con lentes de pederual negro (Fm. Tamaulipas Inferior). En el Cretácico Medio y Superior se depositaron calizas arcillosas de estratificación delgada y media, con bandas de pederual negro (Fm. Tamaulipas Superior). La acumulación continuó con calizas arcillosas en capas delgadas con algunas intercalaciones de lutitas (Fm. Agua Nueva). Posteriormente la sedimentación se hizo cada vez más arcillosa, como se observa en las calizas arcillosas con intercalaciones de bentonita de la Fm. San Felipe. La secuencia sedimentaria cretácica aflora en todas direcciones alrededor de la caldera de Los Humeros. Al suroeste forma las prominencias topográficas más importantes (Sierra de Tepeyahualco); algunos de los pozos perforados atravesaron las unidades cretácicas.

A fines del Cretácico y durante el Terciario Inferior tuvo lugar la orogenia Laramide, que generó esfuerzos compresivos en dirección noreste-suroeste, originando el plegamiento de la secuencia sedimentaria que conforma la Sierra Madre Oriental.

Al término del proceso orogénico se produjeron intrusiones de composición granodiorítica, microgranítica

y sienítica, que afectaron localmente la secuencia sedimentaria. Para estas rocas se midieron edades de 31 hasta 14.5 millones de años (Yáñez y García, 1982), como se observa en la sierra de Tepeyahualco. Después de una etapa de quietud, donde predominó la erosión, se inició en el Mioceno Medio la actividad volcánica, principalmente de composición andesítica, representada por la andesita Teziutlán. Esta unidad constituye la base de los productos volcánicos de la caldera de Los Humeros. Se caracteriza por ser una andesita afanítica, de color gris oscuro; su espesor es muy variable. Se tienen edades radiométricas de 5.0, 3.2 y 1.5 millones de años, por lo que se sitúan principalmente en el Plioceno. En la zona del campo geotérmico forman parte del paquete andesítico inferior que cubre a las calizas del Cretácico.

Actividad eruptiva de la caldera

La actividad silíceá más importante se inició hace 0.46 millones de años con la emisión de la ignimbrita Xaltipan. Contiene abundante pómez de composición predominantemente riolítica, obsidiana y fragmentos de riolita. Por lo general se encuentra poco soldada en los afloramientos, salvo en la región de Xaltipan, donde se presenta medianamente soldada. Su distribución es muy amplia, rodea al anillo caldérico. La evacuación de esta ignimbrita produjo el colapso de la caldera de Los Humeros, cuyo diámetro mayor es de 21 kilómetros. Después del colapso de Los Humeros se emplazaron domos riolíticos sobre la zona de fractura anular, acompañados por tobas de caída aérea. Se obtuvo una edad de 0.24 millones de años (Ferriz, 1984).

La evacuación magmática continuó con derrames de andesitas, andesitas basálticas y basaltos, que se encuentran principalmente en la parte central de la caldera de Los Humeros y hacia el sur. Después de la evacuación de la mayor parte de la lavas (principalmente andesíticas), se produjo la erupción de pómez (depósitos de pómez postZaragoza), principalmente de composición riodacítica, que enmascaró los rasgos más antiguos. Se distribuyeron principalmente hacia el este y sureste.

A lo largo de la porción sur de la fractura anular de Los Humeros se formó un arco de conos de escoria; algunos centros de emisión alimentaron extensos derrames tipo AA, que se extienden hasta 15 kilómetros hacia el sur del complejo volcánico, cubriendo las calizas del Cretácico en la sierra de Tepeyahualco.

En el anillo sur de conos de escoria y sobre sus productos tuvo lugar el emplazamiento de nuevas coladas de menores dimensiones y de composición dacítica (dacitas y andesitas arenas).

Las manifestaciones termales superficiales en Los Humeros son de tipo gaseoso, presentándose en forma de fumarolas y de suelos calientes vaporizantes, así como zonas de caolinización. Estas manifestaciones liberan pequeñas cantidades de vapor a través de suelos porosos, con temperaturas de 50 a 89°C.

En el área estudiada existen deformaciones de origen tectónico y magmático. La deformación de origen tectónico generó dos tipos de estructuras: compresivas y tensionales. La primera y más antigua, de tipo compresional, actuó a fines del Cretácico y afectó a la secuencia sedimentaria del Jurásico-Cretácico; se generaron pliegues, cabalgaduras, fallas inversas y de rumbo. El segundo grupo se originó durante el Mioceno Superior, donde tuvieron lugar dos etapas de deformación de tipo extensional que actuaron en el ámbito regional, se generaron fallas normales y fracturas. A diferencia del anterior, este evento no afectó homogéneamente a todas las unidades, se encuentra sólo en zonas preferenciales asociadas con las fallas. En efecto, el sistema más antiguo es de dirección noroeste-sureste y comprende a todos los elementos estructurales de la Sierra Madre Oriental, incluyendo a la llamada Faja de Pliegues y Cabalgaduras; su edad es eocénica, por ser producto de la fase de deformación laramídica. Un segundo sistema estructural está representado por el mencionado Graben de Libres-Oriental, de edad probablemente oligocénica y de tendencia noroeste-suroeste (Garduño *et al.*, 1985). Las estructuras de este sistema son fallas normales y fracturas que eventualmente cortan a las estructuras del sistema precedente. El sistema más reciente tiene una dirección predominante norte-sur, siendo su principal elemento el lineamiento Tehuacán-Pico de Orizaba-Cofre de Perote, el cual parece comportarse como una falla lateral derecha; su edad es probablemente mio-poliocénica.

Los procesos de deformación más recientes se encuentran en el sitio donde se emplazó la caldera de Los Humeros y se relacionan con el magmatismo que generó la actividad volcánica de esta zona. Las estructuras más importantes son las fallas anulares de 21 kilómetro de diámetro (Caldera de Los Humeros) y 10 kilómetros (Caldera de Los Potreros, ver ilustración 1). Ambas estructuras se originaron debido a la extrusión de un importante volumen de magma, lo que produjo un hueco en la cámara magmática y causó el desplome de su techo. Los colapsos se inician en el subsuelo, sobre el techo de la cámara, y se desarrollan hacia arriba. Cuando los colapsos alcanzaron la superficie se produjeron deformaciones de trazo circular, lo que explica por qué estas fallas anulares son de gran penetración y con frecuencia se encuentran re-

llenas por magma solidificado, que forma los diques anulares.

Geoquímica del agua

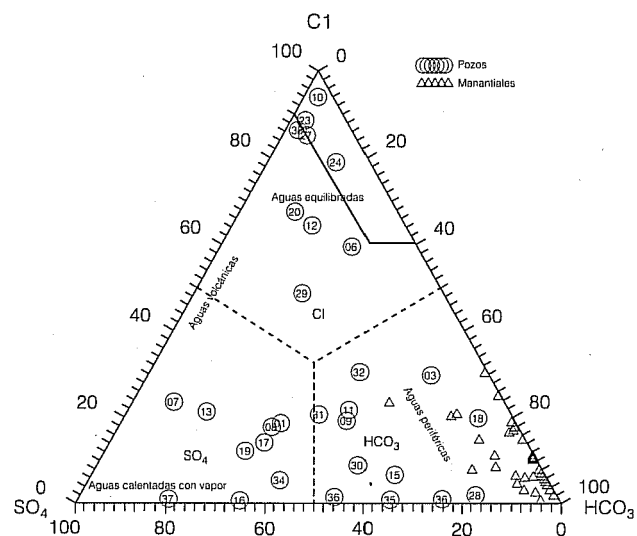
Agua separada de los pozos

En el cuadro 1 está referida la composición química del agua separada de los pozos productores de Los Humeros, Puebla.

La ilustración 2 relaciona el contenido relativo de SO_4 , Cl , y HCO_3 . Los pozos H-6, H-10, H-12, H-20, H-23, H-24, H-29 y H-33 presentan un carácter clorurado-sódico. Este tipo geoquímico es característico de agua proveniente de un yacimiento geotérmico. Normalmente en un yacimiento geotérmico el equilibrio agua-roca se lleva a cabo a profundidad y a altas temperaturas. El agua de los pozos H-10, H-23, H-24, H-27 y H-33 cae en la zona de aguas maduras.

El agua proveniente de los pozos H-3, H-9, H-11, H-15, H-18, H-28, H-30, H-32, H-35 y H-36 presenta un carácter geoquímico bicarbonatado-sódico. Estas características son adquiridas debido a que se está produciendo en la parte más somera del yacimiento. Esta zona del yacimiento se comporta como un área de condensación (Tello, 1994). Cuando los pozos están produciendo en una zona de condensación, normalmente se descubren bajas concentraciones de cloruros. Sin embargo, se detectan altos contenidos de bicarbonatos y sulfatos. Esto se debe a que el vapor que transporta consigo CO_2 y H_2S se condensa en el acuífero (zona de condensación). Bajo estas condiciones,

Ilustración 2. Contenido relativo de Cl - SO_4 - HCO_3 para agua separada y manantiales del campo de Los Humeros, Puebla.



Cuadro 1. Composición química del agua separada producida por los pozos de Los Humeros, Puebla.

Pozo	Fecha dd/mm/aa	Ho kJ/kg	Cond. elec. μmhos/cm	Orificio mm	pH	Las concentraciones están dadas en ppm										
						Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	SiO ₂	Li	As
H-1	04-ene-96	1179	1270	50.8	8.3	267.0	44.80	2.04	0.119	90.2	233.48	161.55	218.0	1005.0	0.47	2.79
H-3	05-oct-94		1420	50.8	8.2	420.0	48.90	1.60	0.019	174.8	70.98	334.4	477.0	556.4	1.60	4.00
H-6	04-ene-96	2441	780	63.5	8.1	142.0	30.50	1.60	0.180	104.1	22.53	47.70	345.3	946.0	0.42	27.41
H-7	04-ene-96		950	127.0	7.6	177.0	36.30	2.24	0.180	83.3	239.28	34.17	946.3	915.0	0.41	8.50
H-8	04-ene-96	1981	1150	76.2	8.1	243.0	47.70	2.04	0.219	76.3	213.12	138.82	453.0	1120.0	0.30	3.10
H-9	03-ene-96	2726	1160	127.0	7.5	250.0	52.30	2.08	0.080	50.3	89.47	121.90	1822.8	838.0	0.49	73.62
H-10	19-jul-89	2662			6.0	141.9	19.10	1.80	0.400	982.7	33.30	28.20	1716.0	909.0	0.83	N.A.
H-11	05-ene-96		1030	50.8	7.9	207.0	32.40	2.56	0.160	74.5	112.96	156.11	443.4	844.0	0.45	7.60
H-12	04-ene-96		530	50.8	7.6	87.0	18.50	0.22	0.119	41.6	11.96	10.91	694.9	688.0	0.30	16.35
H-13	05-oct-95	1332	2300		8.4	341.0	53.99	3.61	0.070	140.1	408.76	116.99	219.3	1006.0	1.37	N.A.
H-15	03-ene-96	2551	540	76.2	8.3	113.0	21.30	1.20	0.219	6.9	30.27	60.83	199.8	797.0	0.39	0.50
H-16	06-ene-96		2400	76.2	9.0	549.0	23.50	1.20	0.080	4.1	407.56	215.69	402.2	580.0	0.45	7.90
H-17	03-ene-96		500	50.8	7.8	91.0	18.60	1.40	0.160	24.3	90.93	55.22	332.7	893.0	0.37	24.41
H-18	13-oct-89	1747	1645	50.8	8.0	123.0	23.00	0.92	0.04	112.3	42.81	396.61	118.1	229.1	0.37	N.A.
H-19	05-ene-96	2141	700	63.5	6.9	140.0	20.60	2.18	0.141	23.8	111.58	57.10	1873.0	485.8	0.41	21.71
H-20	09-ene-96		760	50.8	7.9	159.9	19.60	1.80	0.180	114.5	34.50	20.20	446.6	837.9	0.40	5.53
H-23	13-nov-87	2064	2700	50.8	6.3	290.0	22.00	37.00	0.401	622.0	57.00	20.69	194.0	114.0	0.40	
H-24	18-may-89	2491	1500	38.1	7.6	285.0	46.00	1.50	0.109	324.6	27.29	58.18	422.5	406.4	0.90	
H-27	14-feb-89	2314	1025	76.2	7.4	68.0	3.00	1.80	0.4	232.8	26.27	13.98	135.7	99.9	0.17	
H-28	05-ene-96		1000	50.8	8.7	228.0	18.80	0.60	0.299	7.6	56.00	266.89	66.9	424.0	0.46	1.90
H-29	10-ene-92		220		6.6	220.0	6.00	0.20	0.001	36.0	21.00	16.99	513.0	80.0	0.03	
H-30	03-ene-96		820	50.8	7.8	205.0	29.30	1.74	0.160	9.7	38.52	55.47	1202.5	747.0	0.44	37.31
H-31	08-ene-96	2689	530	76.2	8.3	115.0	21.00	2.00	0.119	8.3	15.66	16.02	420.6	869.0	0.38	7.60
H-32	05-ene-96		380	50.8	7.6	64.0	12.00	0.22	0.241	26.8	23.20	37.97	591.9	710.0	0.24	18.71
H-33	03-ene-96		2300	76.2	7.7	363.0	32.60	2.24	0.141	399.6	49.03	13.12	977.9	458.0	0.47	29.51
H-34	05-ene-96	2436	830	38.1	8.5	177.0	23.60	1.00	0.080	9.0	90.79	66.61	202.0	1130.0	0.30	0.50
H-35	09-ene-96		340	63.5	5.8	30.0	5.40	1.60	0.100	1.4	43.21	80.40	2929.7	230.7	0.19	10.60
H-36	08-ene-96	2663	5500	44.4	6.8	1201.0	52.40	3.16	0.520	60.4	1132.90	3498.05	3168.7	16.4	0.50	0.50
H-36	08-mar-96	2663	1330	44.5	7.6	266.0	17.00	2.40	0.321	10.6	299.57	347.29	1863.8	304.0	0.48	6.44
H-37	11-mar-96	2547	2500	50.8	8.2	466.0	56.00	4.60	0.010	4.3	406.76	101.70	1660.0	594.0	0.47	0.96

la reacción con la roca produce soluciones bicarbonatadas-sulfatadas con pH ácido o alcalino.

Los pozos H-1, H-7, H-8, H-13, H-16, H-17, H-19, H-34, H-36 y H-37 presentan un carácter sulfatado-sódico, el cual también es adquirido cuando el pozo está produciendo en la parte más somera del yacimiento, la cual corresponde a una zona de condensación. Esto hace que al interaccionar el H₂S de origen geotérmico con el agua de la zona de condensación, parte del H₂S, se disuelve en la fase líquida, con lo que se enriquece en sulfatos. Esto sólo puede ocurrir en la parte más somera de un yacimiento geotérmico o bien en manantiales superficiales (Tello, 1992).

Características de las aguas de los manantiales

En cuanto a los manantiales aledaños al campo, los cuales están referidos en el cuadro 2, en su totalidad son del tipo bicarbonatado-sódico. Este carácter geoquímico sugiere que se trata de aguas de origen meteóri-

co de reciente infiltración que han circulado a través de roca de tipo volcánico. Las bajas concentraciones de cloruros y boro, y altas concentraciones de calcio y magnesio permiten suponer que están interaccionando con roca a bajas temperaturas (ilustración 2).

Equilibrio agua-roca

Agua separada de los pozos

En la ilustración 3 está graficado el contenido relativo de Na, K y Mg para el agua de los pozos y manantiales de Los Humeros. Los análisis de agua separada de casi todos los pozos se sitúan en la zona de equilibrio parcial, a excepción del H-37, que está en equilibrio a una temperatura de 250°C. El pozo H-29, el cual se localiza más arriba de la línea teórica, indica pérdida de vapor e incremento del contenido absoluto del soluto (Giggenbach, 1989). Los pozos H-10, H-27, H-32 y H-35 se ubican en la región de aguas someras.

Cuadro 2. Composición química e isotópica del agua de manantiales termales del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla.

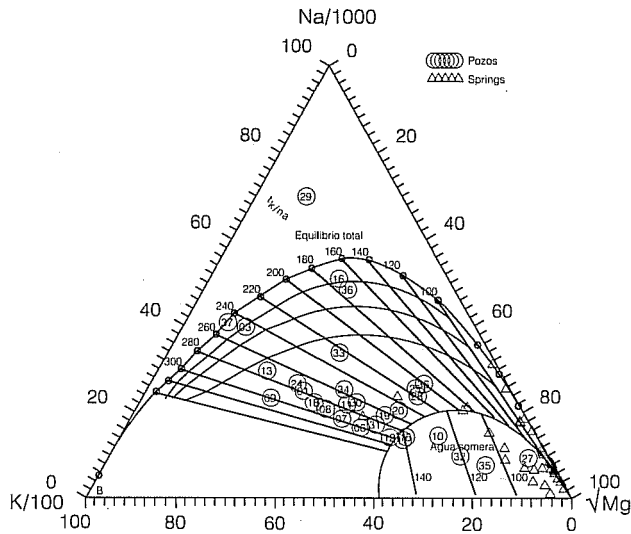
Núm.	Nombre	Fecha dd/mm/aa	Tm °C	pH	C.E. µmhos/cm	Las concentraciones están dadas en ppm									Composición isotópica		
						Cl	B	HCO ₃	SiO ₂	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	Deuterio	Oxígeno-18	Tritio
1	Huichotita	24-ene-96	0	7.22	88	2.12	0.000	25.40	63.50	0.05	5.60	4.60	5.90	0.80	-68.5	-10.6	9.7
2	Atoluca	24-ene-96	13	6.89	65	2.12	0.000	28.08	12.30	0.05	4.20	2.80	4.50	0.90	-64.8	-9.8	8.3
3	Mixquiapan	24-ene-96	17	8.37	100	0.80	0.000	33.74	21.92	0.05	7.20	2.10	6.00	2.10	-67.1	-10.2	0.7
4	Chagchar	24-ene-96	0	7.75	137	1.41	0.000	53.30	31.50	0.05	9.50	0.50	12.20	1.60	-72.2	-11.0	8.4
5	Zotola	25-ene-96	12	6.69	110	3.54	0.000	8.71	21.92	6.10	6.50	4.70	5.20	1.50	-82.6	-12.0	11.7
6	Huitzilpopoca	25-ene-96	8	7.21	107	3.54	0.000	28.16	50.35	0.05	7.80	4.00	4.40	1.40	-80.4	-12.4	
7	Xicalahua	25-ene-96	18	8.27	530	24.10	0.000	218.04	21.90	23.30	20.00	14.50	33.00	21.00			
8	San Miguel	25-ene-96	16	7.75	430	14.18	0.000	173.36	21.90	11.40	26.00	15.70	23.30	13.00			
9	San Roque	26-ene-96	11	8.25	420	17.72	0.000	121.70	12.30	11.50	45.00	5.60	20.00	19.00	-72.2	-10.8	
10	Cuyoaco	26-ene-96	18	8.18	300	5.67	0.000	82.45	50.35	0.05	15.00	4.00	28.30	4.80			
11	El Trébol	26-ene-96	17	8.03	370	5.67	0.000	131.80	23.90	8.40	41.00	6.50	22.00	2.30			
12	San Ignacio	27-ene-96	16	7.94	380	6.38	0.000	179.18	37.14	6.83	48.90	4.20	23.90	3.40			
13	Pochintoc	27-ene-96	11	8.27	330	12.05	0.000	26.59	21.90	12.09	24.00	5.10	20.00	5.80			
14	Temoxixa	27-ene-96	0	7.62	98	1.41	0.000	22.70	21.90	0.05	7.00	2.50	7.80	1.10	-68.3	-10.6	
15	Mazapa	29-ene-96	16	7.32	145	7.09	0.000	53.40	90.00	0.05	13.00	4.30	7.10	2.90	-68.5	-10.6	3.5
16	El Tesoro	29-ene-96	23	8.07	900	75.16	0.000	352.70	90.00	5.70	94.00	13.60	27.00	25.00	-77.3	-11.2	0.8
17	Chignautla	29-ene-96	17	7.41	135	1.41	0.000	25.67	63.57	0.05	12.10	2.30	9.00	2.00	-68.2	-10.6	4.0
18	Xiutetelco	30-ene-96	16	7.86	106	2.12	0.000	36.68	10.71	0.05	12.00	3.70	6.20	1.70	-71.4	-10.1	2.6
19	Zoatzingo	30-ene-96	17	7.57	116	3.54	0.000	14.51	21.92	0.05	6.80	5.00	6.50	1.50	-53.3	-8.6	
20	Tres Ocotes	30-ene-96	12	7.40	45	2.12	0.000	16.88	116.42	0.05	3.40	3.40	5.00	0.30	-67.9	-10.2	
21	Cuatlamingo	31-ene-96	0	7.29	88	1.41	0.000	22.60	63.50	0.05	7.30	3.60	3.50	0.90	-67.5	-10.5	
22	El Rancho	31-ene-96	13	6.67	118	2.83	0.000	44.90	21.90	0.05	5.00	3.80	8.20	3.20	-52.7	-7.9	
23	La Barranca	31-ene-96	16	7.62	93	2.83	0.000	6.19	103.20	0.05	5.90	2.80	5.80	1.80	-66.8	-10.3	
24	Ahuacatlán	01-feb-96	0	7.79	75	1.41	0.000	11.69	31.53	0.05	6.00	4.40	4.80	1.90	-45.9	-8.1	
25	La Pasada	01-feb-96	13	6.65	81	2.12	0.000	22.70	21.90	0.05	4.30	3.80	4.60	0.80	-53.7	-8.6	
26	La Cueva	01-feb-96	0	6.90	128	3.50	0.000	11.50	21.90	2.01	6.90	5.10	6.00	1.50	-65.5	-9.8	
27	Acuaco	02-feb-96	0	7.30	200	2.83	0.000	67.30	37.14	0.05	10.00	3.00	18.70	3.10	-73.2	-10.9	2.5
28	Huitzilapa	02-feb-96	0	7.42	185	8.50	0.000	42.11	76.78	5.02	10.30	5.00	12.70	3.10	-75.0	-10.6	2.5
29	Xaltipanapa	02-feb-96	21	7.82	310	11.35	0.000	153.90	76.78	7.13	27.00	1.60	23.00	5.60	-66.3	-10.1	
30	Calzacateno	03-feb-96	0	7.29	73	2.12	0.000	16.96	10.71	0.05	6.00	3.80	3.70	0.60	-66.3	-10.3	
31	PGH 5	03-feb-96	15	7.55	163	4.25	0.000	69.96	12.30	5.08	11.00	3.10	14.10	1.00			
32	El Cisne	03-feb-96	15	7.58	2400	60.27	0.400	790.00	142.80	21.90	32.10	23.00	30.00	78.00			
33	VPH 1	06-feb-96	0	8.20	730	61.70	0.000	332.80	31.50	0.80	61.00	8.20	28.00	25.00			
34	Santa Rosa	06-feb-96	17	7.82	380	11.34	0.000	104.30	63.57	18.17	31.00	3.80	25.00	9.00			
35	La Calera	06-feb-96	16	7.76	380	22.00	0.000	70.15	76.78	10.83	20.00	5.20	27.00	13.00			
36	Tepepongo	07-feb-96	17	7.64	330	5.17	0.000	162.21	12.30	6.83	41.00	3.80	22.00	1.80			
37	Loma Larga	07-feb-96	0	8.36	930	75.10	0.200	347.80	31.50	8.70	93.00	13.70	22.00	28.00			
38	Pepsi Cola	07-feb-96	18	7.68	190	7.09	0.000	92.30	21.90	0.05	13.00	4.20	12.80	5.90			
39	PGH 4	08-feb-96	0	7.74	380	2.12	0.000	229.05	31.53	9.30	30.00	5.10	27.00	10.40			
40	El Atrio	08-feb-96	16	7.00	169	9.92	0.000	28.31	10.71	0.05	6.90	4.70	13.70	4.30	-62.0	-9.6	4.2
41	Colelo	08-feb-96	15	7.03	71	1.40	0.000	6.18	50.35	0.05	5.70	3.00	2.70	0.70			

La interacción agua-roca de fluidos producidos dentro de un sistema volcánico asociado con fluidos de origen magmático puede ser también evaluada en términos de dos procesos hipotéticos, pero bien definidos (Giggenbach, 1988): a) disolución inicial de la roca, y b) reequilibración final de las fases agua-roca. En la ilustración 4 se graficó el contenido relativo de Na-K-Ca-Mg del agua separada de los pozos. En esta ilustración se puede ver que la composición química del agua de los pozos no presenta un contenido similar al de la roca primaria, pero tampoco está en equilibrio con ella, excepto el H-37, nuevamente. Esto reafirma claramente que los fluidos provenientes del

magma están en la etapa de reequilibración con la fase roca, lo cual se debe a que el equilibrio químico agua-roca requiere de una velocidad y un cierto tiempo para que se logre. Como se puede ver en la ilustración 4, el agua de los pozos tiende a equilibrarse con la roca a temperaturas de 260 a 300°C.

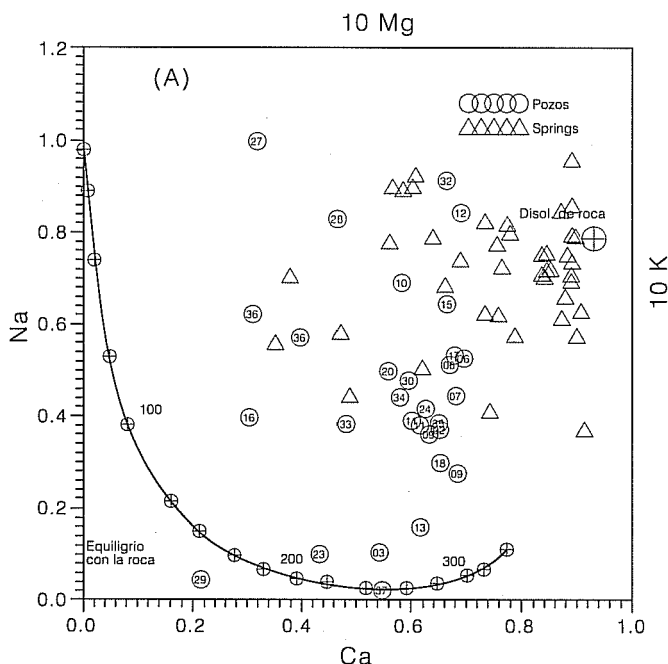
En un estudio realizado por Tello (1992), donde se presentan los isovalores de temperaturas medidas en los pozos a condiciones de equilibrio, se observó que las temperaturas más altas se encontraron en la parte norte de la zona perforada, concretamente en pozos localizados dentro del colapso central; los pozos H-4, H-11, H-20 son los que presentan estas temperaturas,

Ilustración 3. Evaluación de temperaturas y estado de equilibrio para Los Humeros, Puebla.



las cuales son mayores a 300°C. En los pozos localizados en la zona sur del campo, en el Jalapasco Mastaloya, también se detectan temperaturas mayores a los 300°C. Es importante hacer notar que los pozos H-13, H-1, H-7 y H-8 están ubicados en la Falla de Los Humeros y presentaron temperaturas del orden de 300°C.

Ilustración 4. Estado de interacción soluto-mineral en términos de dos procesos (disolución inicial-equilibrio mineral) para Los Humeros, Puebla.



Agua de los manantiales

Las aguas que corresponden a manantiales están todas desplazadas hacia la esquina del Mg. Esto indica que se trata de aguas de reciente infiltración bicarbonatadas-sódicas que se han equilibrado con roca de origen volcánico a temperaturas inferiores a 100°C, lo que reafirma que se trata de aguas de circulación somera, que se han estabilizado con la roca a bajas temperaturas.

Se puede decir que la composición química del agua de los manantiales es producto de la disolución de la roca con la que estuvo en contacto antes de aflorar a la superficie. Esto se debe a que al graficar el contenido relativo de Na-K-Ca-Mg casi todos los manantiales se agrupan en la zona de "disolución de roca" (ilustración 4). Para evaluar la última temperatura de equilibrio del agua de manantiales se utilizó la ilustración 5. En esta ilustración se puede ver que las temperaturas estimadas por el geotermómetro K/Mg son inferiores a 100°C. Esto reafirma que el agua de los manantiales es de origen meteórico. Por esta razón no se recomienda aplicarles el resto de los geotermómetros de fase líquida.

Las entalpías de descarga de los pozos del campo geotérmico de Los Humeros varían de 1,179 a 2,662 kJ/kg. En el cuadro 1 está referida la entalpía (H_0) de mezcla de los pozos de Los Humeros, en ella se observa que la entalpía de descarga del pozo H-1 corres-

Ilustración 5. Evaluación de presiones K-Ca-CO₂ y temperaturas K-Mg para los pozos y manantiales de Los Humeros, Puebla.

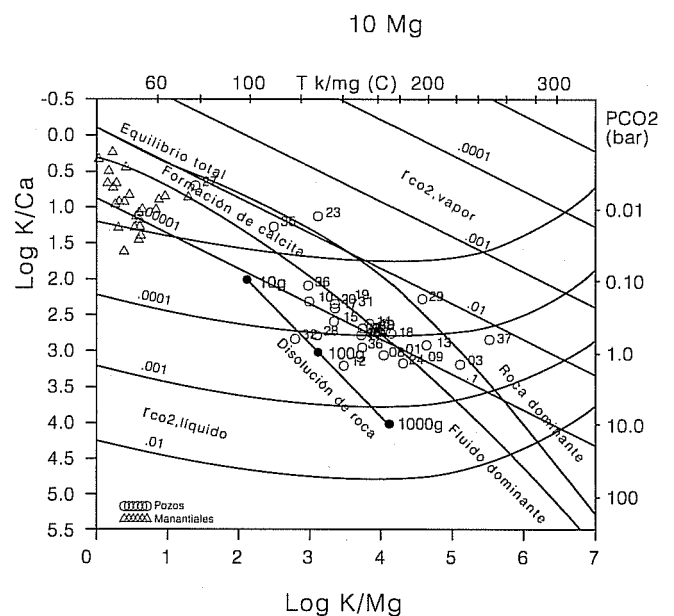
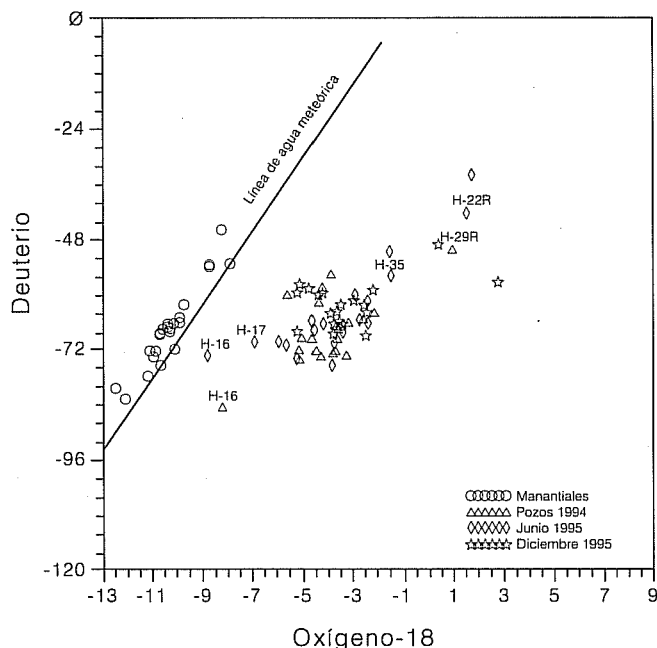


Ilustración 6. Composición isotópica de pozos y manantiales de Los Humeros, Puebla.



ponde a la de un líquido saturado a la temperatura del reservorio; por consecuencia, el exceso de vapor a condiciones de yacimiento es pequeño. Esto sugiere que el yacimiento penetrado por el pozo H-1 es de líquido dominante. Para el resto de los pozos, la entalpía de mezcla es mucho mayor que la entalpía de un líquido saturado a la temperatura de yacimiento.

Características isotópicas

La composición química e isotópica de los fluidos producidos por los pozos productores de Los Humeros ha sido utilizada en los modelos geoquímicos del campo (Tello, 1989a y 1989b).

En la ilustración 6 se encuentra graficado el contenido de deuterio contra el contenido de oxígeno-18, corregidos en la descarga total de los pozos de Los Humeros. Se puede observar que los pozos presentan un corrimiento de oxígeno-18 característico de fluidos geotérmicos. Este enriquecimiento de oxígeno-18 se debe a que el equilibrio agua-roca se llevó a cabo a altas temperaturas. En la misma ilustración se graficó el contenido de oxígeno-18 contra deuterio de manantiales aledaños al campo —éstos se ubican en su totalidad en la línea de agua meteórica—, lo que confirma que se trata de aguas de reciente infiltración, que no presentan ninguna interacción con fluidos geotérmicos.

Conclusiones

De acuerdo con el estado de equilibrio agua-roca, se encontró que el sistema geotérmico de Los Humeros está en desequilibrio, lo cual origina que la composición química del agua producida por los pozos sea variada y se pueda clasificar en bicarbonatada-sódica, sulfatada-sódica y clorurada-sódica.

Los pozos de Los Humeros presentan un corrimiento de $\delta^{18}\text{O}$, característico de fluidos geotérmicos. Esto indica que la interacción agua-roca se efectuó a altas temperaturas. La composición isotópica del agua de los manantiales se agrupa en su mayoría en la línea de agua meteórica y se trata de aguas de reciente infiltración, que no presentan ninguna interacción con fluidos geotérmicos profundos.

Recibido: 21/06/1999

Aprobado: 25/11/1999

Referencias

- Campos Enríquez, J.O. y V.H. Garduño Monroy, "The shallow structure of Los Humeros and Las Derrumbadas geothermal field, Mexico", *Geothermics*, vol. 16, núm. 5/6, 1987, pp. 539-554.
- Cedillo Rodríguez, F., *Estudio geológico de Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, informe interno 17/84, Comisión Federal de Electricidad, México, 1984, 55 pp.
- D'Amore, F. y C. Panichi, *Evaluation of deep temperature of hydrothermal systems by a new gas geothermometer*, *Geochim. Cosmochim. acta* 44, 1980, pp.549-556.
- Ferriz Domínguez, H., *Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico: geology, petrology, geothermal system, and geoarchaeology*, Ph. D. Thesis, Stanford University, 1984, 258 pp.
- Ferriz Domínguez, H. y A. Mahood, "Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico", *J. Geophys. Res.*, vol. 89, B10, 1984, pp. 8511-8524.
- Fournier, R.O., "Chemical geothermometer and mixing models for geothermal systems", *Geothermics*, vol. 5, 1977, pp. 47-49.
- Garduño Monroy, V.H., F. Romero Ríos y R. Torres Hernández, *Estudio estructural y de teledetección en la región de Libres-Oriental (Puebla-Veracruz)*, informe interno 12/85, Comisión Federal de Electricidad, 1985, 22 pp.
- Giggenbach, W., *Geothermal solute equilibria. derivation Na-K-Mg-Ca-geoindicators*, *Geochim. Cosmochim. acta* 52, 1988, pp. 2749-2765.
- Giggenbach, W., *Techniques for the interpretation of water and analyses in geothermal exploration*, Chemistry Divi-

- sion Department of Scientific and Industrial Research. Petone, Nueva Zelanda, 1989, 25 pp.
- López Hernández, A., *Geología del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla*, informe HU/RE/03/97, Comisión Federal de Electricidad, inédito, 1997, 13 pp.
- Meneses López, S., *Estratigrafía y tectónica de la porción oriental del macizo de Teziutlán, Puebla, y sus relaciones geológicas regionales con el frente de la Sierra Madre Oriental entre Pemuxco, Hidalgo, y el Valle de Oaxaca*, tesis, Instituto Politécnico Nacional, ESGyIA, inédito, México, D.F., 1965, 51 pp.
- Tarango Ontiveros, G., *Estudio geológico petrolero del río Laxaxaipa-Teziutlán, estado de Puebla*, Instituto Politécnico Nacional, ESGyIA, inédito, México, D.F., 1967, 51 pp.
- Tello, H.E., *Química de los fluidos de descarga del pozo Humeros 1*, informe 16-84, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Michoacán, México, 1984, 22 pp.
- Tello, H.E., *Características químicas e isotópicas del agua de manantiales aledaños al campo geotérmico de Los Humeros*, informe 22-88, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Michoacán, México, 1988, 30 pp.
- Tello, H.E., *Química de los fluidos de descarga del pozo H-16*, informe 68-89, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Michoacán, México, 1989a, 55 pp.
- Tello, H. E., *Modelo geoquímico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla*, informe 07/89, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Michoacán, México, 1989b, 95 pp.
- Tello, H.E., *Características geoquímicas e isotópicas de los fluidos producidos por los pozos de Los Humeros, Puebla, México*, IAEA-Tec-Doc-641, Viena, 1992, 307-344 pp.
- Tello, H.E., *Caracterización geoquímica de agua y gases de Los Humeros, Puebla I. Implicaciones de equilibrio*, informe inédito GQ-010-94, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Departamento de Exploración, Morelia, Michoacán, México, 1994, 40 pp.
- Viniegra Osborne, F., "Geología del macizo de Teziutlán y la cuenca cenozoica de Veracruz", *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, vol. 17, 1965, pp. 100-163.
- Yáñez García, C. y S. García Durán, *Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, Comisión Federal de Electricidad, 1982, 97 pp.

Abstract

González Partida, E., E. Tello Hinojosa & M. Pal Verma, "Water interaction geothermal-spring in the geothermal field of Los Humeros, Puebla, Mexico", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 2, pages 185-194, April-June, 2001.

The springs around the Los Humeros geothermal field are of the sodium-bicarbonate type. This geochemical characteristics suggests the infiltration and circulation of recent meteoric origin water through volcanic rocks. According to the state of equilibrium water-rock, it was found that the geothermal field of Los Humeros is an unbalanced system. This occurs in geothermal systems associated to recent volcanism such as the one found at Los Humeros. The gases present in the geothermal reservoir are of magmatic origin and the HCl has not been totally neutralized by the reaction of feldspar and mica. This is also confirmed by the high contents of H_3BO_3 and As, these elements indicate that the system of Los Humeros is recent. Due to the lack of water-rock equilibrium, which can be observed within this field, water type varies according to the well and well-site where it is produced. The more superficial wells present water with greater contents of sodium bicarbonate, while the deeper wells present a geochemical type of sodium chloride. According to the excess steam data, it was found that well H1 produces predominantly liquid in the liquid zone, while the rest of the wells produce in two phases (liquid and steam). According to their isotopic composition, the wells from Los Humeros present Oxigen-18 shift that is the characteristics of fluids of geothermal origin which have equilibrated with rocks at high temperature. Most springs in this field are found within a meteoric line.

Key words: springs, geothermal water, unbalance, meteoric origin.

Dirección institucional de los autores:

Eduardo González Partida

Universidad Nacional Autónoma de México
Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra (Unicit)
Juriquilla, Querétaro.

Enrique Tello Hinojosa

Comisión Federal de Electricidad
Gerencia de Estudios Geotermoelectricos,
Departamento de Geoquímica.

Mahendra Pal Verma

Instituto de Investigaciones Eléctricas
Gerencia de Geotermia.