

Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal., México

R. Maciel-Flores y J. Rosas-Elguera

Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal.

Recibido: 10 octubre, 1990; aceptado: 30 enero, 1992.

RESUMEN

Al occidente de Guadalajara, Jal., se localiza el complejo volcánico ácido de la Sierra de La Primavera (SP), en donde, como remanente de la actividad volcano-tectónica cuaternaria, ha quedado un sistema hidrotermal convectivo a profundidad.

La Comisión Federal de Electricidad como parte de su programa nacional de exploración y desarrollo del uso de la Energía Geotérmica, ha perforado hasta la fecha trece pozos profundos en la parte central de la SP, de éstos se han analizado a detalle datos de 10 pozos para estimar preliminarmente el potencial geotérmico de este campo. Los pozos han sido perforados dentro de la zona en la que se ha probado la existencia del yacimiento geotérmico o bien, porque por su profundidad aportan datos de interés para evaluarlo. Sus profundidades varían entre 1215 y 2986 m.

Las unidades litoestratigráficas del subsuelo se agrupan en pre, sin y postcaldérica. La secuencia precaldérica está conformada por (de fondo a la superficie) basamento granítico, andesitas, tobas líticas y riolitas. La ausencia de metamorfismo de contacto entre el intrusivo y las andesitas sugiere que el cuerpo granítico no tiene relación alguna con la fuente de calor que soporta el sistema geotérmico. Las riolitas que coronan la unidad precaldérica podrían corresponder a las primeras emisiones relacionadas con la formación de la caldera. La secuencia sincaldérica está representada por la toba Tala y riolitas. La característica principal, de la toba Tala es su alta permeabilidad. Por último, la secuencia poscaldérica está constituida por productos vulcano-sedimentarios, sedimentos lacustres y domos riolíticos que circundan a la zona de exploración.

El patrón que presentan los mínimos resistivos y los resultados obtenidos durante la perforación del pozo RC-1 y la medición del nivel piezométrico en varios pozos sugiere que el flujo del agua subterránea del sistema es de SE a NW.

El análisis de los parámetros de tipo litológico, geoquímico, térmico y mineralógico permitieron delimitar y evaluar el yacimiento geotérmico. Con estas bases se estimó un volumen de fluidos que, de poder extraerse, se obtendrían aproximadamente 179.83 millones de toneladas de vapor que serían suficientes para generar 100 MW durante 17 años.

PALABRAS CLAVE: Sistema geotérmico, alteración hidrotermal, porosidad, potencial geotérmico, La Primavera, México.

ABSTRACT

La Primavera Volcanic Field (PVF) (Jalisco State, Mexico) is located west of Guadalajara. In this area Quaternary volcano-tectonic activity has given rise to a convective hydrothermal system. 13 deep wells were drilled in the central part of the PVF. Ten of these wells were evaluated for geothermic potential. Lithostratigraphic sequences are pre- and syn-calderic, pre-caldera sequence including the granitic basement, andesites, lithic tuffs and rhyolites. The geothermal sequence is located in the andesitic formation. The contact between intrusives and andesites is not metamorphic suggesting that the heat source and the intrusive are not related. Rhyolites at the top of the pre-caldera sequence might be the earliest flows related to caldera formation. Syn-caldera sequence is represented by the highly permeable Tala tuff and rhyolites. The post-calderic sequence includes volcanic-sedimentary products, lacustrine sediments and rhyolitic domes. The groundwater flows from SE to NW. The geothermal potential was evaluated by geochemical, thermic, and mineralogic parameters. It is estimated at about 100 MWe, projected to last for about 17 years.

KEY WORDS: Geothermal exploration, hydrothermal alteration, porosity, geothermal potential, La Primavera, Mexico.

1. INTRODUCCION

El campo geotérmico de La Primavera se ubica al poniente de Guadalajara, Jal. (Figura 1); en él se han perforado doce pozos geotérmicos cuyas profundidades varían entre 442 y 2986 m.s.n.t. y uno más que se encuentra suspendido temporalmente a la mitad de su profundidad total programada (Tabla 1).

El registro continuo y seguimiento de las actividades geológicas, geofísicas, geoquímicas, de perforación y de

producción, permitieron obtener información suficiente para evaluar en forma preliminar y parcial el yacimiento. Además, la interpretación de la información antes mencionada ha servido para la formulación de un modelo conceptual del yacimiento geotérmico, mismo que sirvió de base para la realización de modelado matemático con el fin de simular el comportamiento del yacimiento sujeto a diversos regímenes de explotación y considerando, además la inyección de salmueras (Kruger *et al.*, 1988).

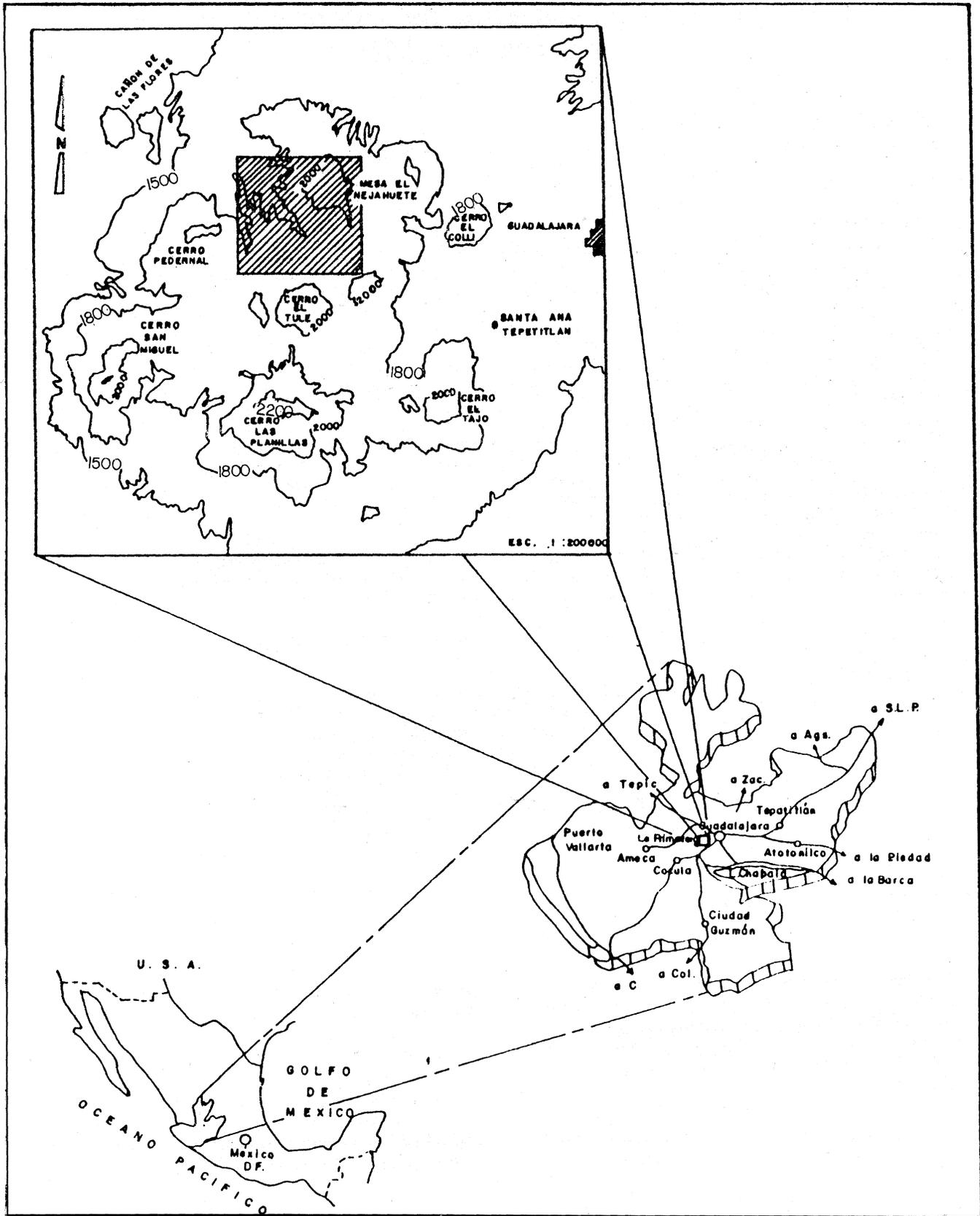


Fig. 1. Localización del área en estudio.

Tabla 1

Pozos geotérmicos en la Sierra de La Primavera, Jal.

PozoNo.	Intervalo Productor	*Temp °C	Profundidad Total (m)**	Núcleos Cortados	Observaciones
RC-1		116	-355.0	4	Prospector con baja temperatura
PI-1		111	1358.0		Inyección
PR-1	1440-1818	305	7.3	2	Programado p/plantas
PR-2	1567-1995	320	-196.5	5	Pozo inyector
PR-4		90	1246.4	3	No terminado por problemas mecánicos
PR-5	874-1213	270	651.3	9	Programado para reparación
PR-7			493.4	1	Perforación suspendida
PR-8	1423-1850	262	-2.9		Programado p/plantas
PR-9	1735-2161	348	-1156.8	2	Programado p/plantas
PR-10	1798-2193	301	-368.1		En evaluación
PR-11	1800-2150	300	-278.5	1	En evaluación
PR-12	1877-2293	255	-464.4	2	En evaluación
PR-13	1800-2000	250	-126.0	2	En evaluación

* Temperatura estabilizada a partir de la máxima media durante la perforación.

** Profundidad referida al nivel del mar.

2. GEOLOGIA DE LA SIERRA DE LA PRIMAVERA

Los productos emitidos por el complejo volcánico La Primavera son de tipo peralcalino (Mahood, 1980), el cual es muy común en algunas estructuras caldéricas y zonas de rift continental. La caldera de La Primavera (Figura 2) se originó hace 120,000 años aproximadamente, cuando ocurrió un combamiento regional que originó dos zonas de fracturas arqueadas (Mahood, 1980) por las cuales ocurrió más tarde el ascenso y emisión de los primeros flujos de domos riolíticos. Poco después, hace aproximadamente unos 95,000 años, sucedieron una serie de erupciones explosivas que dieron lugar a flujos piroclásticos que cubrieron un área estimada de 700 km²; el volumen de magma eruptado es considerado por algunos autores (Mahood, 1980; Wright, 1981) del orden de 20 km cúbicos; la violenta extravasación del magma propició que casi al mismo tiempo ocurriera un colapso cuyo diámetro aproximado es de 11 km. En esta depresión vulcano-tectónica se formó un lago donde se depositaron los sedimentos lacustres y vulcano-sedimentarios, cuyo espesor no es mayor de 70 m, sobre los cuales fluyeron algunos derrames de lava. Posterior a esta actividad, se infiere que existió un emplazamiento magmático hacia el margen S-SE de la caldera y que quizá fue el responsable del levantamiento de la parte central de la Sierra de La Primavera; esta actividad empezó hace 60,000 ó 70,000 años cuando 7 km cúbicos de magma fueron expulsados en forma de flujos y domos constituidos en su mayoría por obsidiana africa. Los domos más recientes son El Tajo y El Colli cuyos fechamientos obtenidos por K/Ar dan una edad de 27,000 y 30,000 años, respectivamente.

Actualmente se considera que la cámara magmática ha entrado en su proceso de enfriamiento y, eventualmente llegará a su solidificación final; como subproducto de esta actividad volcánica se ha formado un sistema geotérmico que se circunscribe, de acuerdo a los estudios actuales, a la parte centro-sur de la estructura caldérica.

2.1 Geología del Subsuelo.

Con el propósito de establecer una nomenclatura fácil y práctica para la subdivisión de las unidades litoestratigráficas en el subsuelo de La Primavera se tomó como referencia su formación; así, las unidades litoestratigráficas se agruparon en pre, sin y postcaldérica.

Unidad Precaldérica.

Esta unidad está conformada por diferentes tipos de rocas que, del fondo hacia arriba, son: basamento granítico, andesitas, riolitas, andesitas, tobas líticas y riolitas.

La base de la secuencia estratigráfica la forma un intrusivo granítico cortado a 951 m.b.n.m. en el pozo PR-9 (Gutiérrez-Negrín, 1988 a,b); petrográficamente pudo distinguirse que este intrusivo varía de granodiorita en su cima, a granito hacia el fondo del pozo. La edad estimada por el método K/Ar para este intrusivo granítico es de $7.3 \pm 1 - 0.04$ Ma (Mioceno Tardío). En el pozo PR-9 la isoterma de 300°C se ubica a 16 m.b.n.m. es decir 935 m sobre este cuerpo granítico; por ello, se estima que esta unidad está siendo afectada por una temperatura mayor. Se considera que la roca tuvo una pérdida parcial de argón 40 y que ello ocasionó que la radiometría proporcionara una edad ($7.3 \pm 1 - 0.04$ Ma) más joven de lo que en realidad es el caso. Sobre este cuerpo granítico descansa una potente secuencia andesítica cuyo espesor supera los 1500 metros y está separada en algunos pozos (PR-2, PR-11 y PR-12) por un delgado flujo de composición riolítica. La importancia del potente cuerpo andesítico radica en que son las rocas donde se ubica el yacimiento geotérmico. Cabe señalar que esta secuencia andesítica está formada por varios derrames que también incluyen basaltos y tobas.

Por encima de esas rocas se reconoció un paquete piroclástico dividido por un delgado flujo andesítico cuyo espesor es menor a 150 metros. Hasta ahora se considera que las edades de estas rocas volcánicas varían del Mioceno al Plioceno y probablemente forman el basamento de la Faja Volcánica Mexicana. Finalmente, coronando la unidad precaldérica, se cortaron rocas riolíticas de posible edad cuaternaria (Gutiérrez-Negrín, 1988 a,b) que podrían corresponder a las primeras emisiones relacionadas con la formación de la caldera.

Unidad Sincaldérica.

La toba Tala es la roca representativa del evento que dio lugar a la formación de la caldera. Estas rocas piroclásticas han sido objeto de numerosos estudios (Demant y Vicent, 1978; Mahood, 1980; Wright, 1981; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 1984; Campos-Enríquez, *et al.*, 1987). Con la rápida expulsión del material piroclástico que originó la toba Tala, se creó un vacío en la parte superior de la

cámara magmática, lo que ocasionó que las rocas sobreyacentes se asentaran por gravedad. La expresión superficial de este evento son una serie de fallas y fracturas semi-circulares que limitan la caldera. Cabe mencionar que esta unidad está caracterizada por su alta permeabilidad. Esto ha causado muchos problemas durante la perforación, incluso hasta el grado de abandonar alguno de ellos (caso del pozo PR-4).

Unidad Postcaldérica.

El hundimiento que originó la caldera dio lugar a que en esa depresión se formara un lago donde fueron depositándose los productos de la degradación del relieve circundante. Paralelamente a esto, se emitieron flujos riolíticos y una pómez gigante, esta última ha sido muy útil como horizonte índice.

3. FLUJO SUBTERRANEO EN EL SISTEMA GEOTERMICO DE LA PRIMAVERA

Desde el punto de vista hidráulico, un sistema geotérmico cuenta con un área de recarga, un canal o zona de calentamiento y un área de descarga. Hidrológicamente, los sistemas geotérmicos pueden clasificarse como locales y regionales (Sigurdsson, 1987). Los sistemas locales normalmente están confinados y tienen la particularidad de que el agua y la energía térmica se originan en la misma área, mientras que los sistemas regionales son sistemas cíclicos y la energía se acumula dentro de los canales de flujo. Es decir, los fluidos deben ser capaces de descender a profundidades donde la acumulación de calor sea suficiente para que luego les permita ascender a la superficie sin gran pérdida de energía. Al parecer, tanto el agua como la energía calorífica que forma parte integral del sistema geotérmico La Primavera, se originan sobre y por debajo, respectivamente de la misma área. Esto parece obvio dado que el agua de lluvia aprovecha las zonas de debilidad (fallas y fracturas) para infiltrarse al subsuelo inmediatamente por encima de la fuente de calor. Una pequeña parte de este volumen de agua es capaz de llegar a grandes profundidades para contribuir a la recarga del acuífero profundo y otra parte se queda en niveles someros para abastecer y formar parte del acuífero mesotermal (Alonso, 1985).

Debe recordarse que la tectónica de la región influye grandemente en la permeabilidad de las rocas. Las fallas pueden tener un doble papel dentro del contexto hidrológico, esto es, como barreras hidrológicas, si la falla pone en contacto estratos cuyas permeabilidades sean muy contrastantes, o bien, como un conducto de libre tránsito si la estructura es paralela a dicho flujo.

No debe olvidarse que desde el punto de vista regional las áreas que circundan a la Caldera La Primavera, y más aún, aquella donde está emplazada, fueron afectadas por fracturas regionales del sistema de dirección predominante NW-SE el cual, junto con los eventos propios de la caldera, contribuyeron a crear direcciones preferenciales de flujo del

agua subterránea. Quizá el fallamiento NW-SE permite que el acuífero profundo del sistema La Primavera sea recargado por aguas que no necesariamente tengan su origen en la sierra donde se ubica el campo, sino en áreas externas a la caldera. Ello sugeriría que el sistema La Primavera además de tener un carácter local (como anteriormente se mencionó) también tiene una fracción (la mayor) regional. En estos términos dicho sistema está clasificado como un sistema geotérmico mixto.

Ramírez *et al.*, (1982) sugieren que el sentido del flujo subterráneo en el sistema La Primavera es de SE a NW y se basa en dos argumentos fundamentales: a) Las rocas andesíticas donde se ubica el acuífero (yacimiento potencial) tiende a profundizarse en dirección NW en relación con los pozos perforados en el centro de la caldera y b) el desnivel de 400 m que hay entre la base de los depósitos lacustres (espesor 750 m) de la cuenca de San Marcos (al S del área en estudio) y los del Valle de Ameca (espesor 1000 m) localizada al E-NE del área en estudio (Gutiérrez-Negrín, 1988 b).

Un argumento adicional, aunque más local, para apoyar el sentido de flujo de SE hacia el NW puede obtenerse al analizar brevemente la Figura 3. En esta figura se aprecia que en el área de Río Caliente, donde se perforó el pozo RC-1, existe un notable mínimo resistivo (<10 ohm-m) (Romero, 1980). Este mínimo no refleja condiciones de yacimiento en el subsuelo, sino que, como lo demostró el propio pozo RC-1, está relacionado con una alta concentración de sales en el subsuelo. Estas características pueden ser comunes en las zonas de descarga de los sistemas geotérmicos. Por ello, parece evidente que, entre las zonas de pozos en el centro-sur de la caldera y el pozo RC-1 en su borde NW, la dirección del fluido del yacimiento es de SE a NW (Figura 3).

4. GEOQUIMICA

La geotermometría es una de las aplicaciones más importantes de la geoquímica. En este sentido, los primeros estudios (Truesdell and Mahood, 1978; Giggenbach, 1981) sugerían temperaturas mayores de 190°C para el sistema geotérmico La Primavera.

Actualmente se ha perforado 13 pozos, de ellos, sólo cuatro se han evaluado y monitoreado durante un período largo y continuo (PR-1, 8, 9 y 12) y por un período relativamente corto, otros cuatro (PR-2, 5, 10 y 13), quedando por evaluar el pozo PR-11. Estos monitoreos permitieron establecer las características químicas de los fluidos geotérmicos. Las Tablas 2, 3, 4 y 5 presentan algunas especies químicas de dichos fluidos, un aspecto que llama la atención es la gran consistencia de los análisis, desde la fecha de inducción de los pozos hasta fines de 1988, ello sugiere una buena estabilidad de la composición química de los fluidos del yacimiento.

En la Tabla 6 se muestran los valores promedio de Na⁺ y K⁺ con los cuales se estimó el cociente Na⁺/K⁺ y la

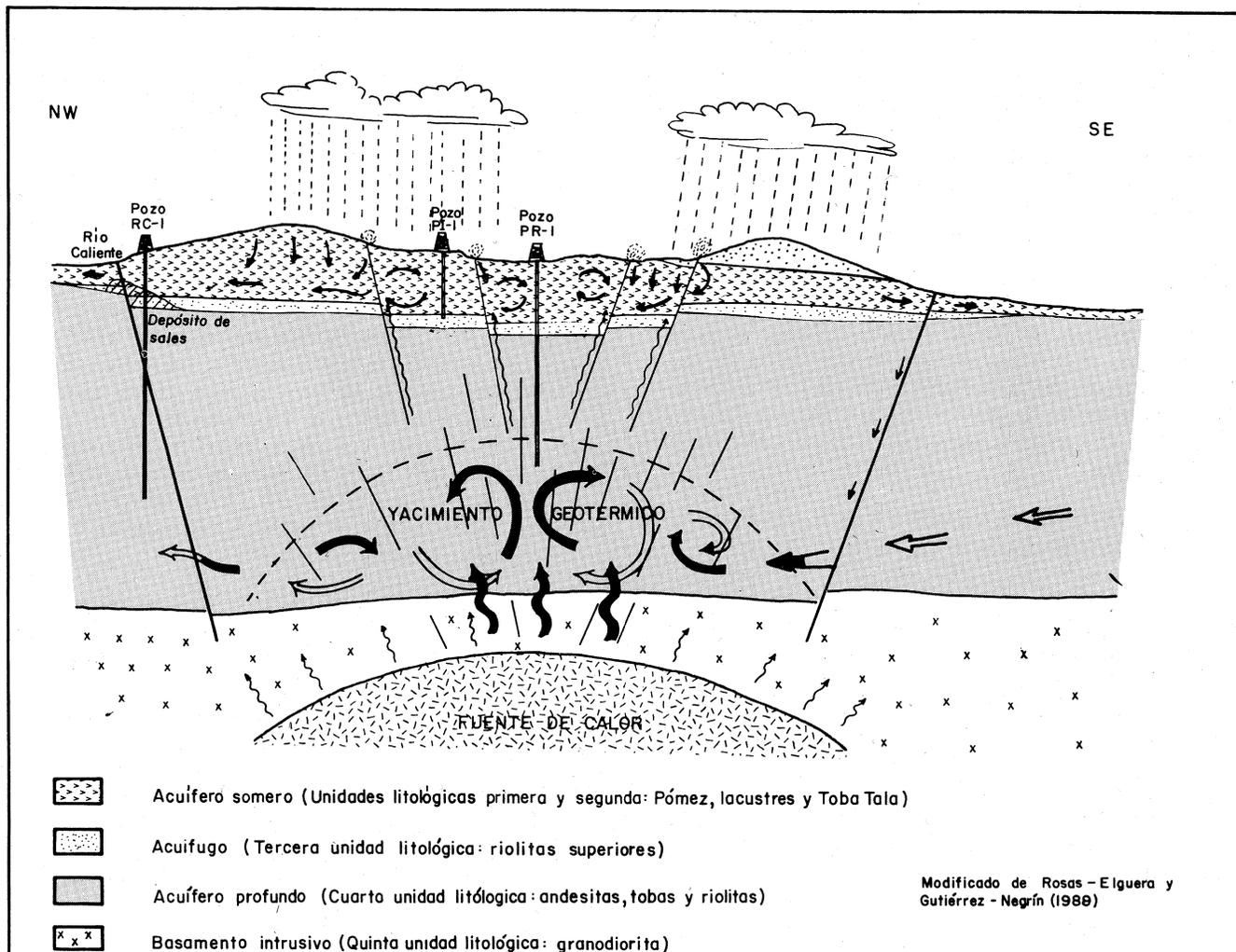


Fig. 3. Modelo conceptual del sistema geotérmico de La Primavera, Jal.

temperatura de fondo usando el geotermómetro Na/K para cada pozo. De la misma tabla se deduce que cuando disminuye el cociente Na+/K+ se incrementa la temperatura del geotermómetro Na/K. El pozo PR-8 que produce una mezcla de vapor y agua, es el que posee el mayor cociente Na+/K+. Estos factores, sugieren que los pozos productores de este campo cuyos fluidos tengan un cociente Na+/K+ menor o igual a 9.5 estarán en la zona del yacimiento.

Por su parte, Rosas-Elguera *et al.* (1988) estudiaron el comportamiento del boro en los pozos PR-9, 10, 11 y 12: Ellos lograron establecer dos zonas: la primera, que se caracteriza por el aporte del boro y que también incluye un nivel de boro correlacionable con la isoterma de 300°C; y la segunda, ubicada a una cota superior, donde existe dilución del mismo elemento. La ventaja del monitoreo de la concentración del boro en los lodos de perforación es que la zona de dilución puede definirse rápidamente. Esta delimitación es importante porque puede sugerirse que la terminación del pozo sea por lo menos 1000 m por debajo de esa

zona; con ello se pretende alcanzar una temperatura mínima de 250°C.

Con el análisis del boro se pudo establecer un modelo preliminar del comportamiento de este elemento en el campo La Primavera (Figura 4), de él se desprende que quizá los límites del yacimiento estén unos 500 m (si se considera esta distancia como el radio de influencia de cada pozo) allende los pozos PR-10 y 11.

5. PARAMETROS USADOS PARA DELIMITAR LAS FRONTERAS DEL YACIMIENTO

Pese a que no todos los pozos perforados en este campo han sido evaluados totalmente, se definieron algunos parámetros de utilidad para delimitar este sistema geotérmico. Es decir, se establecieron ciertos parámetros (que abajo se discuten) que todos los pozos productores actuales poseen y que, por extrapolación, habrán de poseer los pozos productores futuros.

Tabla 2

Concentraciones en ppm de algunas especies químicas durante la evaluación del pozo PR-1.

FECHA	Na+	K+	Ca++	SiO2	Cl-	D.O.	E j/g
06/02/85	782	232	2.4	1230	1234	2	1558
27/04/85	760	193	2.4	1240	1120	6	1855
31/05/85	751	200	2.4	1220	1177	2	
26/06/85	764	194	2.2	1240	1163	3	1525
30/07/85	770	179	2.2	1280	1134	3	1524
30/08/85	768	175	3.2	1240	1120	3	1524
30/09/85	760	175	2.6	1280	1134	3	1584
29/10/85	764	170	2.2	1110	1149	3	1525
29/11/85	758	180	1.4	1260	1134	1.5	1498
04/03/86	745	167	2.2	1240	1106	2.5	1367
06/05/86	749	167	3.6	1260	1078	2.5	1368
14/06/86	733	160	1.2	1300	1078	2.5	1368
22/09/86	730	185	1.6	1320	1106	2.0	1552
28/11/86	718	155	1.4	1220	1106	1.5	
04/12/86	710	165	1.4	1300	1106	2.0	1573
07/01/87	725	165	1.6	1165	1165	5.5	
03/02/87	720	170	1.6	1220	1091	7.0	1530
11/03/87	733	167	1.8	1273	1106	5.0	1645
10/04/87	730	167	2.4	1262	1220	8.0	1534
13/05/87	723	161	1.8	1185	1120	2.5	
18/05/87*	731	160	2.6	1145	1120	2.5	
26/05/87*	750	159	1.8	1165	1120	3.5	
30/06/87*	744	155	4.0	1200	1120	5.5	
16/07/87*	729	156	1.6	1200	1078	8.0	1549
05/09/87	730	168	3.2	1009	1120	8.0	
05/01/88	742	170	1.6	1320	1117	PURGA(2.0)	
25/02/88	745	170	1.5	1240	1163	3.0	
21/03/88	705	177	1.9	1165	1163	LINEA DE 2	

* Muestreo a presión atmosférica durante las mediciones de producción a 8 bars absolutos.
 NOTA: Actualmente el pozo está estrangulado con una línea de 74".
 D.O. = Diámetro Orificio.

Tabla 3

Concentraciones en ppm de algunas especies químicas durante la evaluación del pozo PR-8.

FECHA	Na+	K+	Ca++	SiO2	Cl-	E j/g	D.O.
29/10/85	1078	126	5.2	1075	1202	1361	Inducción
30/10/85	972	130	4.4	1055	1021	1349	6.0
01/11/85	890	137	2.6	1110	978	1348	F.T. 6.0
05/11/85	254	140	2.8	1055	950	1313	F.T. 6.0
04/12/85	842	143	1.2	1130	893	1215	F.T. 6.0
03/01/86	824	152	2.8	1055	907	1307	F.T. 6.0
21/02/86	856	149	1.4	1090	893	1295	F.T. 6.0
04/03/86	848	147	1.6	1090	893	1291	3.5
04/04/86	851	141	1.8	1055	904	1262	2.0
06/05/86	849	152	0.80	1090	894	1210	2.5
14/06/86	849	147	0.80	1090	894	1345	3.5
19/06/86	851	151	0.60	1165	950	1334	4.0
03/07/86	826	160	2.0	1040	922	1314	5.0
07/07/86	826	160	2.0	1005	908	1310	5.0
25/08/86	819	160	0.70	1040	908	1354	6.0
22/09/86	810	155	1.40	950	879	1382	5.5
01/10/86	815	160	1.20	970	893	1298	5.0
09/10/86	840	165	1.20	1005	907	1309	4.5
30/10/86	831	165	1.20	1005	893	1300	3.0
06/11/86	826	160	1.20	988	893	1279	2.5
09/02/87	816	150	0.80	1120	893		2.0
10/04/87	809	137	1.0	843	921	1330	3.5
13/05/87	848	139	0.80	843	907	1324	4.5
12/06/87	857	136	0.90	880	893	1382	6.0
04/07/87	823	130	0.80	1038	893		6.0
16/07/87	805	128	0.80	905	865	1367	6.0
28/09/87	812	135	2.60	891	865		3.5
27/01/88*	795	138	1.10	1055	865		2.0
18/02/88*	783	141	1.0	1038	907		3.0
22/02/88*	776	143	0.80	1183	904		4.0
27/02/88*	773	141	0.90	1056	908		5.0
04/03/88*	775	140	1.0	902	908		6.0
04/04/88	803	134	1.0	1038	879		3.5
02/05/88	810	136	1.2	970	879		3.0
02/06/88	808	139	1.0	902	837		3.5

* Muestreo a presión atmosférica durante las mediciones de producción a 8 bars absoluta.
 E = Entalpía en joules/gramo.
 D.O. = Diámetro Orificio.
 F.T. = Flujo Total.

Tabla 4

Concentraciones en ppm de algunas especies químicas durante la evaluación del pozo PR-9.

FECHA	Na+	K+	Ca++	SiO2	Cl-	E j/g	P.C.	Observaciones
11/07/86	1350	200	109.0	885	1223			Inducción
14/07/86	824	120	19.0	1200	908			Flujo vertical
15/07/86	720	105	11.0	1200	822		12	Flujo por 6"
17/07/86	716	110	6.0	1110	822		12	Flujo por 6"
21/07/86	717	105	4.4	1130	808		67	Flujo por 6"
31/07/86	701	100	3.4	1040	766	1335	65	Flujo por 6"
07/08/86	701	105	3.6	1005	752	1361	73	Flujo por 6"
01/09/86	605	140	1.7	1240	865	1360	165	Flujo por 6"
09/09/86	655	145	2.2	1280	879	1387	165	Flujo por 6"
22/09/86	635	140	1.0	1145	851	1328	170	Flujo por 6"
09/10/86	660	150	2.0	1185	879	1366	170	Flujo por 6"
20/10/86	630	155	1.2	1280	879	1456	790	Flujo por 2"
24/10/86	655	145	1.2	1200	879	1443	500	Flujo por 2"
27/10/86	683	150	3.0	1200	908	1456	335	Flujo por 4"
30/10/86	689	150	1.8	1220	893	1459	250	Flujo por 5"
06/11/86	675	145	1.8	1145	879	1443	185	Flujo por 6"
09/02/87	670	140	1.0	1200	879		185	Flujo por 6"
10/04/87	676	144	2.0	1252	935		110	Flujo por 8"
13/05/87	678	152	5.2	1173	950		810	Flujo por 2"
12/06/87	687	151	2.4	1155	964		940	Flujo por 2"
16/07/87	643	142	0.4	1378	936		940	Flujo por 2"
24/09/87*	646	138	2.6	1065	879	1540	830	Flujo por 2"
28/09/87*	659	132	3.2	1065	879	1413	525	Flujo por 3"
03/10/87*	658	133	2.8	1009	879	1444	345	Flujo por 3"
06/10/87*	661	137	3.8	1038	893	1440	235	Flujo por 5"
20/10/87*	655	129	1.5	1127	879	1424	190	Flujo por 6"
26/10/87	649	127	1.5	1145	879	1454	160	Flujo por 7"
31/10/87	650	126	2.0	1056	803	1455	135	Flujo por 8"
05/01/88	691	130	1.8	1260	922		130	Flujo por 8"
28/01/88	676	129	1.8	1260	922		500	Flujo por 3"
25/02/88	673	161	1.0	1420	1007		740	Flujo por 2"
11/03/88	559	163	0.9	1300	1049		740	Flujo por 2"
18/03/88	659	165	0.9	1420	1064		720	Flujo por 2"
26/03/88	667	145	1.1	1185	964		490	Flujo por 3"
14/04/88	666	140	0.9	1280	993		790	Flujo por 2"
02/06/88	665	143	1.0	1220	1007		710	Flujo por 2"

* Muestreo a presión atmosférica durante las mediciones de producción a 8 bars absolutas.
 P.C. = Presión de cabezal en P.S.I.
 E j/g = Entalpía joule/gramo.

Tabla 5

Concentraciones en ppm de algunas especies químicas durante la evaluación del pozo PR-12.

FECHA	Na+	K+	Ca++	Cl-	SiO2	E j/g	D.O.	P.C.
21/01/88	810	226	3.6	1404	1464		F.T. 0	15
28/01/88	755	310	3.8	1318	1420	1653	F.T.	85
04/02/88	756	208	3.6	1305	1338	1653	F.T.	90
11/02/88	772	214	3.2	1347	1380	1653	F.T.	90
17/02/88	766	209	3.4	1347	1420	1653	F.T.	100
25/02/88	748	206	4.6	1347	1380		F.T.	105
11/03/88	741	205	3.0	1318	1340		3"	225
18/03/88	706	192	3.2	1276	1280		3"	210
26/03/88	752	208	3.0	1361	1300		3"	260
14/04/88	810	214	3.2	1432	1320		6"	110

D.O. = Diámetro Orificio.
 E j/g = Entalpía joule/gramo.
 P.C. = Presión de cabezal en P.S.I.
 F.T. = Flujo Total.

Tabla 6

Valores promedios de Na+ y K+

POZO	Na+	K+	Na+/K+	T N/K(°C)
PR-8	827	147	9.56	272
PR-9	676	138	8.33	287
PR-1	742	173	7.29	302
PR-12	757	209	6.15	323

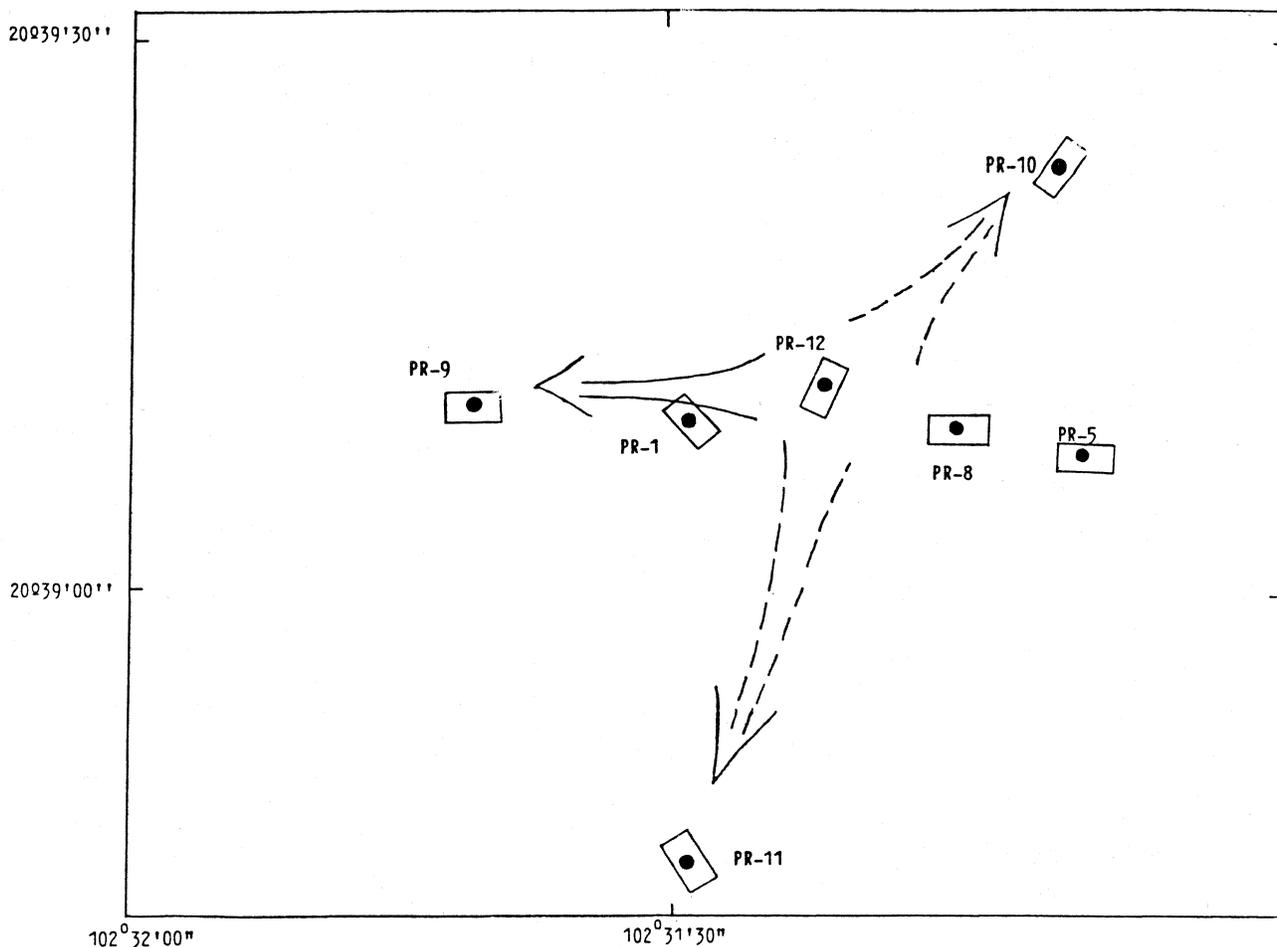


Fig. 4. Modelo del comportamiento del boro. Las flechas con líneas discontinuas indican la direcci3n hacia la cual la concentraci3n del boro disminuye, y las l3neas continuas indican la direcci3n en que se mantiene constante.  pozo geot3rmico.

Los par3metros usados son de tipo litol3gico, geoqu3mico, t3rmico y mineral3gico, seg3n se definen a continuaci3n.

Par3metros litol3gicos

En todos los pozos productores los fluidos se obtienen de las rocas andes3ticas que subyacen al paquete de tobas l3ticas. Por otro lado, es evidente (en el pozo PR-9) que debajo de esa secuencia hay un basamento gran3tico que si bien permite la transmisi3n de calor y, probablemente, de algunos fluidos gaseosos provenientes de la fuente de calor, posee una permeabilidad demasiado baja como para contener fluidos geot3rmicos comercialmente aprovechables. Por lo tanto, es obvio que el yacimiento, desde el punto de vista litol3gico, est3 limitado por la cima del basamento intrusivo y no est3 m3s arriba que la cima del paquete andes3tico.

Par3metros geoqu3micos

El cociente $Na+/K+$ (Mercado, 1970; Villa *et al.*, 1987) de los fluidos geot3rmicos de los pozos, puede correlacio-

narse con el yacimiento geot3rmico. Como ya se mencion3 de los pozos productores, los fluidos del pozo PR-8 son los que presentan el mayor cociente $Na+/K$ (9.5) de tal manera que puede sugerirse que en el yacimiento el cociente $Na+/K+$ presentar3 un valor menor o igual a 9.5. Por su parte, el contenido de boro determinado en los lodos de perforaci3n sugiere un enriquecimiento a diferentes profundidades (Rosas-Elguera *et al.*, 1988) cuyo origen puede explicarse por una mayor proximidad de la fuente de calor (asumiendo que la causa del enriquecimiento sea estrictamente magm3tica).

Par3metros t3rmicos

La temperatura m3nima requerida, desde el punto de vista geot3rmico, para la producci3n comercial de vapor es de 250°C (Guti3rrez-Negr3n, 1988b). S3lo 9 pozos alcanzaron una temperatura de 250°C o mayor. En el caso del pozo PR-5 se extrapolaron las profundidades asociadas a las temperaturas obtenidas por la t3cnica de inclusiones fluidas (JICA, 1986) y no aquellas de la temperatura estabilizada (Tabla 7). Desde el punto de vista termal, se considerar3 co-

mo reserva del yacimiento el volumen de fluidos geotérmicos que se encuentra entre la isoterma de 150°C y el límite superior del yacimiento.

Tabla 7
Relación de temperaturas estabilizadas.

TE	ELEVACION RESPECTO AL NIVEL DEL MAR								
	PR-1	PR-2	PR-5	PR-8	PR-9	PR-10	PR-11	PR-12	PR-13
100	1329	1194	1516	1178	1379	1228	1429	1289	1380
150	1169	829	1236	918	1099	663	1219	1164	1100
200	1059	504	1026	668	559	153	1019	1014	430
250	549	174	796	158	249	-17	579	509	-120
300	29	-97				-15	-368	79	89

TE = Temperatura Estabilizada en °C

Parámetros Mineralógicos

La mineralogía hidrotermal se ha usado con gran éxito para establecer la geometría del yacimiento (Viggiano y Robles, 1988); para sugerir zonas permeables (Browne, 1984); etc. La mineralogía de alteración se relacionó con la modificación de la permeabilidad y de la porosidad original de cada unidad. La primera aparición de la epidota se usó para establecer la cima del yacimiento.

6. GEOMETRIA Y CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO

La exploración directa por medio de pozos profundos ha permitido conocer algunas de las condiciones físicas y químicas del sistema geotérmico de La Primavera como son la columna litoestratigráfica, la composición química del agua profunda, la presión, la temperatura, las zonas permeables, su mineralogía hidrotermal, etc.

Evidentemente, tratar de establecer los límites posibles del yacimiento potencial conlleva una serie de suposiciones, aproximaciones, interpretaciones y errores; por ello, modelar la geometría del yacimiento es sólo una parte del proceso considerado para hacer una estimación del potencial del recurso geotérmico.

Para sugerir los límites dentro de los cuales se encuentra circunscrita el yacimiento, se han conjugado varios parámetros. El comportamiento del boro (Rosas-Elguera *et al.*, 1988) sugiere la posibilidad de que el yacimiento se encuentre a mayores profundidades allende los pozos PR-10 y PR-11 (Figura 4). Así, es posible que los límites del área estén relativamente cercanos a estos dos pozos.

Una vez establecidos los parámetros que debían caracterizar al yacimiento, se procedió a analizar su respectivo comportamiento en cada uno de los pozos. El resultado se

muestra en la Tabla 8. La cima del yacimiento en cada pozo se eligió como la elevación mínima del conjunto de estos parámetros. Así, por ejemplo, en el pozo PR-9 la elevación seleccionada fue 94 m.s.n.m. Sin embargo, la configuración de la cima del yacimiento con las elevaciones así obtenidas, no reflejaba la evidente mayor actividad hidrotermal en los alrededores de los pozos PR-11 y PR-12. Ello se debió a la influencia de la elevación asignada a el cociente Na+/K+, por lo cual para evitar un riesgo se decidió omitir ese parámetro en la delimitación de los límites del yacimiento.

Con las nuevas elevaciones se configuró el yacimiento representado en la Figura 5. Esta configuración, al parecer, estaría corroborada por las evidencias hasta ahora encontradas. Las áreas, espesores y volúmenes estimadas para cada nivel se dan en la Tabla 9.

Cálculo del volumen de los fluidos geotérmicos

La porosidad de la roca huésped de los fluidos geotérmicos es la variable más importante para estimar el volumen y eventual potencial del yacimiento geotérmico. La porosidad puede incrementarse por el fracturamiento de la roca o por la disolución de algunos minerales; pero también puede disminuir por la precipitación de nuevas fases mineralógicas.

La mineralogía de alteración se ha usado con éxito en diversos aspectos del estudio de un sistema geotérmico, por ejemplo para indicar zonas de ebullición, zonas productoras, etc. En general, los minerales hidrotermales cuando son depositados tienden a disminuir la porosidad de la roca y a sellar fisuras (autosellamiento). Sin embargo, cuando el producto de la alteración hidrotermal son minerales arcillosos, por ejemplo, la porosidad se incrementa aunque, obviamente, la permeabilidad disminuye. Otros minerales,

Tabla 8

Elevaciones de los parámetros del yacimiento.

Pozo	EP	Na+K**	ΔB(+)	Iso(250)	TL-AND	CIMA	
						con Na+/K+	sin Na+/K+
PR-1	705	389		549	785	389	549
PR-2				174	754		174
PR-5				500**	806	500	500
PR-8	838	414		158	778	158	158
PR-9	239	94	329	249	769	94	239
PR-10	553		903	-17	613	-17	-17
PR-11			829	579	809	579	579
PR-12	1038	134	789	-509	769	134	509
PR-13				-120	820	-120	-120

EP = Primera ocurrencia de epidota; ΔB(+) = Incremento del boro. Iso(250) = Isoterma de 250°C; TL-AND = Contacto Toba Lítica-Andesita.
* Elevación del inicio del liner ranurado; ** Elevación de temperatura estimada con inclusiones fluidas.

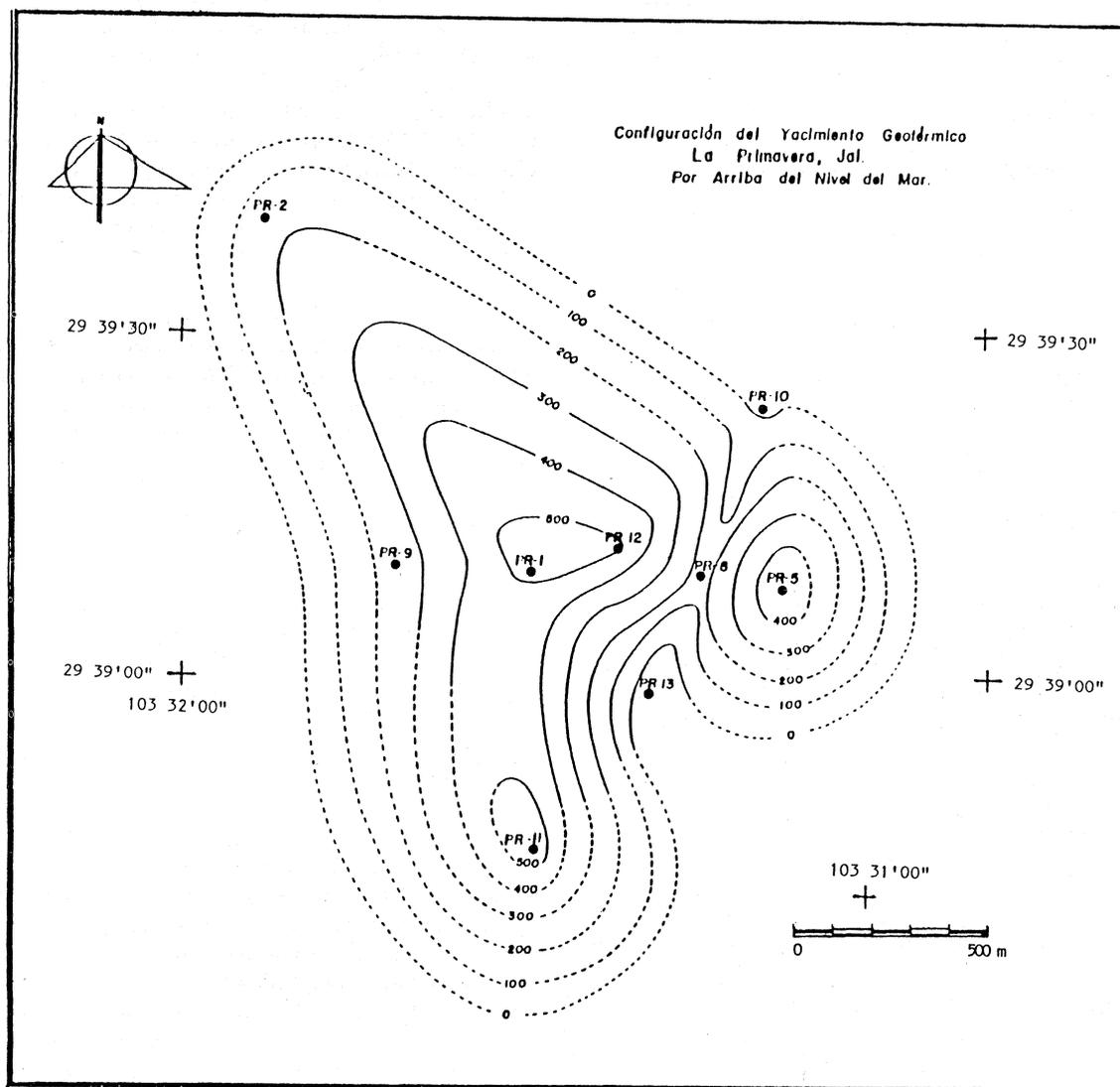


Fig. 5. Configuración del yacimiento geotérmico La Primavera, Jal.

Tabla 9

Valores de las dimensiones de cada nivel del yacimiento.

NIVEL (msnm)	AREA (Km ²)	ESPESOR (Km)	VOLUMEN (Km ³)
500	0.0634	0.1	0.0063
400	0.3564	0.1	0.0356
300	0.7948	0.1	0.0795
200	1.3387	0.1	0.1339
100	2.0519	0.1	0.2052
0	2.4709	0.5255	1.2984
-475	6.0000*	0.4755	2.8530

* Dato de Gutiérrez-Negrín, 1988.

por ejemplo anhidrita y pirita, están asociados con zonas permeables.

En la Tabla 10 se presentan los promedios absolutos de la mineralogía de alteración del paquete andesítico así como los promedios de la alteración total para el mismo paquete. En el último renglón se dan los valores medios de esos promedios que será definida como la mineralogía de alteración del yacimiento.

Según el análisis de la mineralogía secundaria (Tabla 10), el yacimiento geotérmico tiene una alteración total promedio de 53%. Los porcentajes de los minerales que conforman esta alteración están distribuidos de la siguiente manera:

	CA	O	PY	EP	MA	CL	HE	OX	SR	OTROS
%	14	11	2	3	4	11	2	4	1	1

Tabla 10

Promedios Absolutos de Alteración del Paquete Andesítico.

Pozo	CA	O	PY	EP	MA	CL	HE	ANH	MIC	DIO	OX	SR	ALTOT
PR-1	16	9	3	2	3	16	3	0	0	0	2	0	54
PR-2	21	4	2	0	6	11	8	0	0	0	23	8	82
PR-8	17	13	1	3	2	14	0	0	0	0	0	0	46
PR-9	7	12	1	8	3	8	0	0	0	0	0	0	40
PR-10	18	15	3	2	9	11	0.4	0.5	0	0.06	0	0	60
PR-12	5	11	2	5	2	6	5	0	1	0	0	0	33
X	14	11	2	3	4	11	2	0.08	0.2	0.02	4	1	53

CA = Calcita; O = Cuarzo; PY = Piritita; Ep = Epidota;
MA = Minerales arcillosos; CL = Clorita; HF = Hematita;
ANH = Anhidrita; MIC = Micas; DIO = Dióxido; OX = Oxidos;
SR = Sericita; ALTOT = Alteración total.

y, en trazas (<1%), se incluyen a: anhidrita, micas, dióxido, anfíbolos, rutilo, wairakita y esfena que ocurren preferentemente en el pozo PR-12.

En la Tabla 11 se muestran los promedios de la alteración total del paquete andesítico que, como ya se anotó, es la roca huésped de los fluidos geotérmicos. Asimismo, se muestra el porcentaje de roca sana para cada pozo y la alteración total normalizada. En el último renglón se dan los promedios de los valores anteriores.

A partir de la Tabla 11 pueden hacerse algunas observaciones importantes. En el pozo PR-2 la máxima temperatura estabilizada es de 300°C; no obstante, este pozo no es productor, lo cual pudiera estar relacionado con su gran alteración hidrotermal. En el pozo PR-12 ocurre exactamente lo contrario, es decir este pozo es productor con una alteración total promedio de sólo el 33%, es decir un 60% menos que el PR-2.

Tabla 11

Alteración hidrotermal en el paquete andesítico.

Pozo	Alteración total promedio	Roca no alterada hidrotermalmente	Alteración Normalizada
PR-1	54	46	0.66
PR-2	82	18	1.00
PR-8	46	54	0.56
PR-9	40	60	0.49
PR-10	60	40	0.73
PR-12	33	67	0.40
Promedio	53	47	

Porosidad del Yacimiento

La porosidad media máxima de las coladas volcánicas no alteradas hidrotermalmente, es del 10% (Davis y Wiest,

1971; Custodio y Llamas, 1976). Este valor de porosidad será considerado como base para discutir la influencia de la alteración hidrotermal en la porosidad. Ante la imposibilidad de analizar la porosidad secundaria, se omitió su implicación en el cálculo del volumen de los fluidos geotérmicos.

Ya anteriormente se indicaron los porcentajes de los minerales hidrotermales en el yacimiento. En el caso extremo, minerales tales como calcita, cuarzo, piritita y epidota sellarán completamente la roca de tal manera que su porosidad será cero; por el contrario, los minerales restantes tienden a incrementarla. Con estas bases puede estimarse la porosidad de una roca alterada hidrotermalmente.

Según se mostró en la Tabla 11 el yacimiento tiene un 47% de roca no alterada, cuya porosidad es del 10%, y un 53% de roca alterada cuya porosidad deberá ser calculada de acuerdo a la mineralogía hidrotermal. Así, de ese 53%, el 30% tendrá una porosidad cero y, para el 23% (que representa el 43.4% del total de la roca alterada) restante se asumirá que tiene la porosidad de las arcillas, es decir, 45% (Custodio y Llamas, 1976). Por lo tanto, la porosidad de la fracción alterada del yacimiento será de 19.53%. Con estos valores se estima que la porosidad promedio del yacimiento es de 47.77%.

Considerando esta porosidad promedio se tendría un volumen de fluidos geotérmicos, a una temperatura mínima de 250°C, de 0.6812 km³; asumiendo una densidad media para la mezcla agua-vapor del yacimiento en La Primavera de 0.8 gr/cm³, se obtiene una masa efectiva de fluidos de alrededor de 544.94 millones de toneladas de mezcla, de las cuales al ser transportadas a la superficie, el 33% sería vapor y el 67% sería agua. Así, habría un volumen de unos 179.83 millones de toneladas de vapor que, si pudieran obtenerse serían suficientes para generar 100 MW durante 17 años.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Héctor Alonso Espinosa el haber autorizado la publicación de este trabajo. A los Ings. M. Chacón y G. Medina por permitirnos usar sus datos geotérmicos y al Ing. C. Lucio por facilitarnos los datos de producción. Al CONACYT por promover la formación de recursos humanos en el área de Ciencias de la Tierra.

BIBLIOGRAFIA

ALONSO, E. H., 1985. Recursos Geotérmicos en La Primavera, Jal. Conferencia dictada en la Academia Mexicana de Ingeniería, Secc. Jalisco, Nov. 1985 (Inédito).

- BROWNE, P. R. L., 1984. Lectures on Geothermal Geology and Petrology, UNU, Geothermal Training Programme. Iceland, Report 1984-2.
- CAMPOS-ENRIQUEZ, J. O., S. VENEGAS-SALGADO, S. SANCHEZ-REYES, A. NEGRETE, D. MORAN-ZENTENO, H. DELGADO y J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, 1987. Paleomagnetic study of the Sierra La Primavera: Preliminary results. Geothermal Resource Council, *Transactions*, 11, 323-326.
- CUSTODIO, E. y M. R. LLAMAS, 1976. Hidrología Subterránea Tomo 11. Ediciones Omega, S.A.
- S. N. DAVIS y R. WIEST, 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel.
- DEMANT, A y P. M. VINCET, 1978. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco: Discusión. Univ. Nal. Autón. México, *Inst. Geología, Revista*, 2, 218-222.
- GIGGENBACH, F. W., 1981. Exploration and Development of Geothermal Resources in Mexico, International Atomic Energy Agency Report.
- GUTIERREZ-NEGRIN, L.C.A., 1988. The La Primavera Geothermal Field, Jalisco, Mexico, Geothermal Resources Council, *Transactions*, 12, 161-165.
- GUTIERREZ-NEGRIN, L.C.A., 1988. Sinópsis sobre el campo geotérmico de La Primavera, Jal. Informe interno C. F. E. (Inédito).
- GUTIERREZ-NEGRIN, L.C.A., A. LOPEZ-MARTINEZ y M. BALCAZAR-GARCIA, 1984. Aplicación de datación para buscar fuentes. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 8, Nos 1-4, 385-389.
- JICA (Japanese International Cooperation Agency), 1986. La Primavera-Geothermal Development Project in United Mexican States. Report of the first survey (inédito).
- KRUGER, P., A. ARAGON, R. MACIEL, C. D. LUCIO y M. VILLA, 1988. Simulación de la declinación térmica antes de la producción con unidades de 5 MW en el campo geotérmico de La Primavera, Jalisco. Reporte Interno, C. F. E. (Inédito).
- MACIEL, F. R., 1981. Geological Mapping and geothermal exploration with special reference to tephrochronology and paleomagnetic technics. UNU Geothermal Training Programme. Report 4-81.
- MAHOOD, G. A., 1980. Geological Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center: Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 8, 199-230.
- MERCADO, S., 1970. High hydrothermal zones detected by Na/k, Cerro Prieto, Mexico: *Geothermics*, Spc. Issue, 2, p. 1367-1376.
- RAMIREZ, S. G., J. CASCO DEL RAZO y V. V. M. MATA, 1982. Hidrología Regional de la zona geotérmica de la Primavera-San Marcos-Hervores de la Vega, Jal., Reporte Interno, C. F. E. (Inédito).
- ROMERO, G. C., 1980. Estudios geológicos y geofísicos en el área geotérmica de La Primavera, Jal. Informe interno, C. F. E. (Inédito).
- ROSAS-ELGUERA, J., M., J. VILLA, O. F. MEDINA, y F. M. CHACON, 1988. Comportamiento del Boro en los pozos PR-9, 10, 11 y 12, del campo geotérmico La Primavera, Jal., *Geotermia*, 4, 1, 41-48.
- SIGURDSSON, F., 1987. Hydrogeology and Geohydrology, Geothermal Training programme, Report 6, Reykjavik, Iceland.
- TRUESDELL, A. H. y G. A. MAHOOD, 1978. Preliminary Geochemical Assessment of the Geothermal System of Primavera, Jalisco, Mexico. U.S.G.S., Report.
- VIGGIANO, J.C. y C. J. ROBLES, 1988. Mineralogía Hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. I: Sus usos como indicadora de temperatura y del régimen hidrológico. *Geotermia*, 4, 1, 15-28.
- VILLA, M. S. J., F. M. CHACON y O. G. MEDINA, 1987. Utilización de la relación atómica Na/K para identificar zonas de mayor actividad hidrotermal en el campo geotérmico de La Primavera, Jal. Informe interno C. F.E. (Inédito).
- WRIGHT, J. V., 1981. The Rio Caliente Ignimbrite: Analysis of a compound intraplinian ignimbrite from a major late-Quaternary mexicana eruption, *Bull. Volcanol*, 44, 189-212.

R. Maciel-Flores y J. Rosas-Elguera
Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad de Guadalajara,
Juan N. Cumplido 36
44100 Guadalajara, Jal.
Sector Hidalgo.