

GEOQUIMICA DE AREAS GEOTERMALES DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES DEL SUR DE CHILE, ENTRE LOS 39° y 40° LAT. S.

GEOCHEMISTRY OF GEOTHERMAL AREAS OF THE ANDEAN CORDILLERA OF SOUTHERN CHILE BETWEEN 39° AND 40° S. LAT

ALFREDO LAHSEN AZAR*

* *Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.*

RESUMEN

El estudio geoquímico de las aguas termales de las áreas de San Luis, Palguín y Liquiñe, conjuntamente con los antecedentes geológicos y estructurales de la zona, han permitido caracterizar geoquímicamente estos sistemas hidrotermales, obtener antecedentes acerca del origen del agua termal y de sus constituyentes disueltos y además, inferir un modelo geotermodinámico para estos sistemas.

En general, estas aguas termales corresponden a soluciones neutras a moderadamente alcalinas, de tipo sulfato-carbonatadas, con contenidos menores de cloruros y sílice; los cationes corresponden principalmente a sodio, y en menor proporción a potasio, calcio y magnesio, también incluyen trazas de boro, fluor, litio, cesio, rubidio y arsénico. Esta composición concuerda plenamente con la litología de las unidades en que estos sistemas hidrotermales están emplazados, los cuales están constituidos principalmente por rocas graníticas. Aún cuando existe una considerable actividad volcánica en la zona, no hay evidencias de un aporte significativo de fluidos magmáticos juveniles.

Se considera que el agua superficial meteórica, se infiltra a través de fallas o fracturas, probablemente relacionadas con la falla Liquiñe-Reloncaví, hasta profundidades de 2.000 m o más. A esa profundidad el agua, mediante un gradiente geotérmico dos o tres veces más alto que el normal, es calentada a temperaturas de 100°C a 200°C, incluso mayores.

ABSTRACT

A geochemical study of the thermal waters of San Luis, Palguín and Liquiñe (39°15'S-39°45'S) has been carried out to investigate their origin and that of their dissolved constituents. A geothermodynamic model for these hydrothermal systems, emplaced in granitic rock, is proposed.

These thermal waters are sulfate-carbonate solutions with a near neutral or slightly alkaline pH. Concentrations of chloride and sílica are relatively low. Na⁺ is the main cation followed by K⁺, Ca⁺⁺ and Mg⁺⁺. Boron, fluorine, lithium, cesium, rubidium and arsenic are present in trace amounts. The composition of the waters agrees with the lithology of the units where the systems are emplaced. Although these hydrothermal systems are located in a very active volcanic area, the contribution of magmatic fluids is not evident.

It is thought that surface meteoric waters penetrate to about 2.000 m deep through faults and fractures, probably related to the Liquiñe-Reloncaví megafault, becoming heated to 100 - 200°C or more by geothermal gradients two to three times greater than the crustal average.

INTRODUCCION

En la vertiente occidental de la Cordillera de Los Andes, entre los paralelos 39°S y 40°S, se distribuyen diversas áreas con actividad hidrotermal. En el presente estudio han sido investigadas las Termas de San Luis, Palguín y Liquiñe, tanto

desde el punto de vista geológico-estructural, como el de sus características físicas y químicas. Estas áreas termales habían sido parcialmente consideradas en los trabajos de Domeyko (1871), Darapsky (1890), Risopatrón (1924), Brüggén (1947) y De Grys (1965).

Los objetivos principales de este estudio son: 1) caracterizar geoquímicamente las fuentes termales investigadas, 2) analizar las condiciones geológicas e hidrogeológicas en que ellas se presentan, 3) aportar antecedentes acerca del origen de los constituyentes disueltos y de la fuente de calor y 4) determinar mediante geotermómetros químicos las temperaturas mínimas de los sistemas hidrotermales en profundidad.

MARCO GEOLOGICO

La Cordillera de Los Andes de Sur de Chile entre los paralelos 39°S y 40°S está constituida por rocas estratificadas, intrusivas y metamórficas, que comprenden edades desde el Paleozoico hasta el Reciente (Moreno y Parada, 1976; Hervé, 1976; Moreno et al., 1980). La siguiente descripción geológica de la zona ha sido elaborada principalmente sobre la base de estos autores.

— Rocas metamórficas e intrusivas

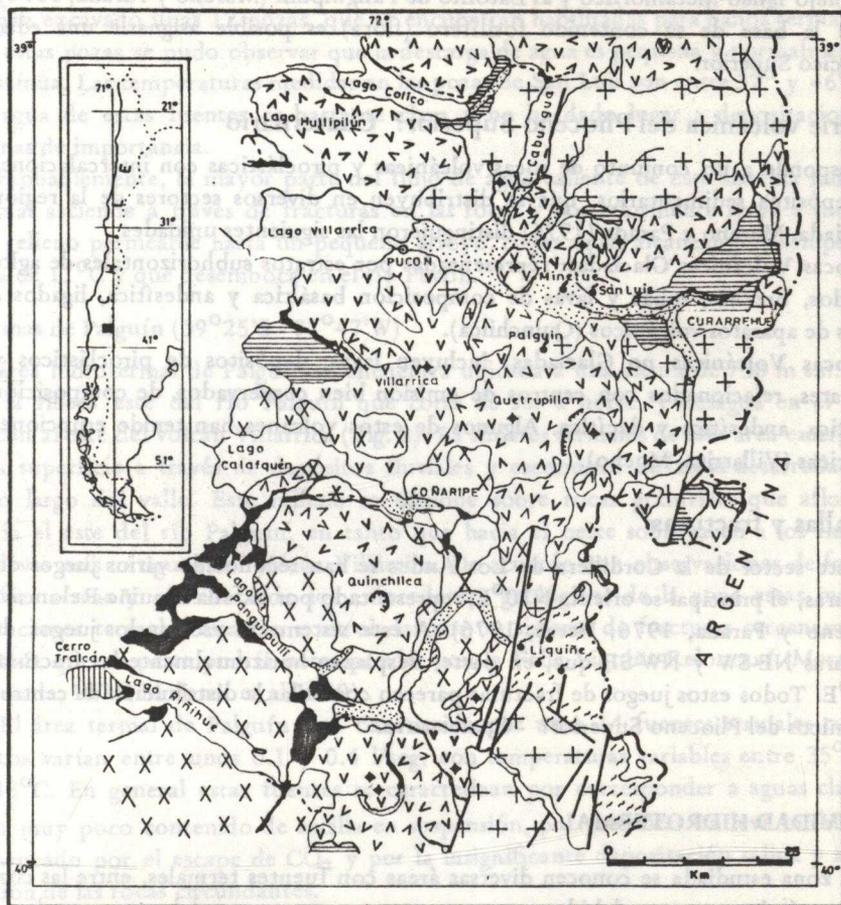
Incluyen una serie de esquistos, gneisses, anfibolitas y migmatitas; este conjunto de rocas metamórficas de mediano a alto grado, forma parte del Complejo Igneo Metamórfico definido por Hervé et al. (1974). Estas rocas afloran principalmente desde el sector de Liquiñe hacia el sureste. De acuerdo con sus relaciones estratigráficas y la presencia de fragmentos de rocas metamórficas similares a las de esta serie, incluidas en rocas sedimentarias clásticas del Carbonífero Superior-Pérmico (Hervé et al., 1974; Parada, 1975) es posible asignar a esta serie metamórfica una edad pre-carbonífero superior (Moreno y Parada, 1976).

Las rocas intrusivas presentes en el área han sido agrupadas en: 1) el complejo plutónico de Moreno y Parada (1976), constituido por granitos gneissicos y migmatitas, tonalitas y granodioritas, cuya edad sugerida por estos autores sería desde paleozoica hasta terciaria; gran parte de estas rocas tendría una edad miocena, de acuerdo con dataciones K-Ar hechas por Munizaga et al., (1984); 2) el Batolito de Panguipulli (Parada, 1975), constituido por dioritas, tonalitas y granodioritas, y del cual se conocen edades absolutas (Rb-Sr y K-Ar) comprendidas entre el Paleozoico y el Jurásico Inferior (Moreno y Parada, 1976; Parada y Munizaga, 1978 y Munizaga et al., 1984) y 3) diversos stocks dioríticos y filones andesíticos y dacíticos que instruyen a la formación Curarrehue (Moreno y Parada, op cit.); por sus relaciones estratigráficas, estos intrusivos han sido asignadas por los mismos autores al lapso Cretácico Superior? - Terciario Superior.

— Rocas estratificadas

La unidad estratificada más antigua de este sector de la Cordillera de Los Andes corresponde a la Formación Panguipulli (Aguirre y Levi, 1964) de amplia distribución en los alrededores del lago homónimo. Esta unidad está constituida por pizarras y meta-areniscas con niveles conglomerádicos, y ha sido incluida en una

serie sedimentaria marina atribuida al Carbonífero Superior-Pérmico (Moreno y Parada, 1976). La formación Panguipulli infrayace en discordancia angular a la Formación Tralcán (Aguirre y Levi, 1964) constituida por conglomerados, areniscas y lutitas de origen continental asignadas al Triásico Superior. Esta formación aflora en el cerro Tralcán en el extremo oeste del lago Riñihue (Fig. 1).



- | | | | | | | | | |
|------------|---------------------|------------------------|------------------|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | | | | | | | | |
| ♦ Volcanes | ♣ Caldera volcanica | /// Fallas y fracturas | ♣ Areas termales | | | | | |

Fig. 1. Geología del sector cordillerano entre los 39° y 40° S. (basado en Moreno y Parada, 1976 y Hervé, 1976): 1. Sedimentos cuaternarios; 2. Rocas volcánicas no glaciadas; 3. Rocas volcánicas glaciadas; 4. Fm. Curarrehue (Cretácico Sup. ? - Terciario Inf.); 5. Fm. Tralcán (Triásico Sup.); 6. Fm. Panguipulli (Carbonífero Sup.-Pérmico); 7. Rocas metamórficas; 8. Batolito de Panguipulli; 9. Complejo Plutónico.

Fig. 1. Geology of the Andes between 39° and 40° S Lat (Based in Moreno Parada, 1976 and Hervé, 1976); 1. Quaternary sediments; 2. Unglaciated volcanic rocks; 3. Glaciated volcanic rocks; 4. Curarrehue formation (late cretaceous? Early Tertiary); 5. Tralcán Fm. (Late Triassic); Panguipulli formation (Late Carboniferous-Permian); 7. Metamorphic rocks; 8. Panguipulli Batholith; 9. Plutonic Complex.

La secuencia estratificada más joven que aflora en el área, sin considerar la serie volcánica del Plioceno Superior? -Cuaternario, corresponde a la Formación Curarrehue (Aguirre y Levi, 1964). Esta unidad está constituida por andesitas, dacitas, brechas volcánicas y tobas, con intercalaciones de conglomerados, areniscas y lutitas continentales; sobreyace en discordancia angular a las rocas del Complejo Igneo Metamórfico y al Batolito de Panguipulli (Moreno y Parada, 1976). Sobre la base de su contenido fosilífero (flora) es posible asignarle una edad Cretácico Superior.

— Serie volcánica del Plioceno Superior? Cuaternario

Corresponde a un conjunto de rocas volcánicas y piroclásticas con intercalaciones de depósitos sedimentarios, que se distribuyen en diversos sectores de la región estudiada. Moreno y Parada (1976) distinguieron las siguientes unidades:

a) Rocas Volcánicas Glaciadas: representadas por estratos subhorizontales de conglomerados, brechas, tobas y lavas de composición basáltica y andesítica, ligados a restos de aparatos volcánicos (Quinchilca).

b) Rocas Volcánicas no Glaciadas: incluyen lavas, depósitos de piroclásticos y lahares, relacionados con centros de emisión bien conservados, de composición basáltica, andesítica y dacítica. Algunos de estos volcanes han tenido erupciones históricas (Villarrica, Mocho).

— Fallas y fracturas

En este sector de la Cordillera de Los Andes se han reconocido varios juegos de fracturas, el principal se orienta N10°E, representado por la falla Liquiñe-Reloncaví (Moreno y Parada, 1976; Hervé, 1976). A este sistema se asocian los juegos de fracturas NE-SW y NW-SE que, en parte, desplazan horizontalmente las fracturas N10°E. Todos estos juegos de fracturas parecen controlar la distribución de centros volcánicos del Plioceno Superior? - Cuaternario.

ACTIVIDAD HIDROTHERMAL

En la zona estudiada se conocen diversas áreas con fuentes termales, entre las cuales las más importantes debido a su mayor temperatura y caudal, corresponden a las áreas de Minetué, San Luis, Palguín y Liquiñe. Todas estas áreas se distribuyen en los alrededores de los volcanes Villarrica, Mocho y Quetrupillán. A continuación se presenta una reseña de las características físicas de las fuentes termales y del medio geológico en que ellas se manifiestan.

Termas de San Luis (39°20' S y 71°41' W)

El área de San Luis (Fig. 1) se ubica a 1,2 km al norte del río Pucón o Minetué, a unos 28 km al este de la ciudad de Pucón y a una altura de 420 m s.n.m. Las fuentes termales afloran en la superficie a través de depósitos fluviales y coluviales. En parte, estos depósitos están cubiertos por cenizas volcánicas y lapilli, provenientes de los volcanes del área. Los depósitos de relleno cuaternarios se disponen sobre rocas volcánicas, que a su vez sobreyacen rocas graníticas del

complejo plutónico aflorante en diversos sectores de la zona.

Debido al hecho que el área termal se manifiesta a través de depósitos poco consolidados, su emisión se presenta en gran parte del área en forma de suelos evaporantes. En este caso, las fuentes termales se hacen especialmente evidentes cuando la temperatura ambiental es baja, favoreciendo de este modo una rápida condensación del vapor. Para facilitar y concentrar la descarga de agua caliente se han excavado unas 12 pozas, que se encuentran habilitadas para baños termales. En estas pozas se pudo observar que la descarga de agua es pequeña y normalmente continúa. Las temperaturas medidas en las pozas de San Luis son entre 37° y 46°C. El agua de estas fuentes es bastante clara y no ha dado lugar a depositaciones salinas de importancia.

Probablemente, la mayor parte del flujo de agua caliente de este sistema hidrotermal asciende a través de fracturas en las rocas y posteriormente fluye a través del relleno permeable hasta un pequeño arroyo, cuyas aguas alcanzan una temperatura de 11°C y que desemboca en el río Pucón.

Termas de Palguín (39°25'S - 71°47'W)

El área hidrotermal de Palguín se encuentra ubicada a una altura de 730 m s.n.m., en la ribera este del río Palguín que corre de sur a norte, y desagua en el río Pucón al este del volcán Villarrica (Fig. 1). La fuentes termales de esta área emergen a la superficie a través de depósitos fluviales y escombros de faldas desarrollados a lo largo del valle. Este relleno se dispone sobre rocas graníticas que afloran hacia el este del río Palguín, en tanto que hacia el oeste sobreyacen a los flujos de lavas más antiguos del volcán Villarrica. De acuerdo con observaciones de fotografías aéreas y considerando los antecedentes geológicos de la zona estas manifestaciones termales estarían controladas por un sistema de fracturas cercanamente N-S, que en parte podría corresponder con la Falla Liquiñe-Reloncaví (Moreno y Parada, 1976; Moreno et al, 1980).

El área termal de Palguín está constituida por unas 14 fuentes termales cuyo gastos varían entre unos 0.1 y 0.4 l/seg, con temperaturas variables entre 35° C y 48°C. En general estas fuentes se caracterizan por corresponder a aguas claras con muy poco contenido de arcilla en suspensión, por presentar un leve burbujeo provocado por el escape de CO₂ y por la insignificante depositación salina y alteración de las rocas circundantes.

Termas de Liquiñe (39°25'S - 71°45'W)

El área termal de Liquiñe se encuentra a unos 400 m s.n.m. en el valle del río del mismo nombre que alimenta al lago Neltume (Fig. 1). Estas fuentes termales se manifiestan a través del relleno aluvial y del coluvio de las laderas del valle, excavado en rocas metamórficas de alto grado constituídas principalmente por gneisses y migmatitas. El área hidrotermal de Liquiñe se encuentra en la zona de la falla Liquiñe-Reloncaví (N10°E) que pone en contacto al Batolito de Panguipulli con la Serie de rocas metamórficas en este sector (Hervé, 1976).

Las fuentes termales de Liquiñe corresponden a 13 manifestaciones de alta temperatura, de las cuales fueron investigadas aquellas que abastecen la Hostería de Liquiñe y las fuentes de Carranco (Tabla 1), correspondientes a vertientes calientes que afloran a través de depósitos de coluvio. Ambas fuentes, que totali-

zan un gasto de unos 3 l/seg, han producido una débil alteración en la superficie del terreno y además han precipitado algo de carbonatos y sílice.

GEOQUIMICA DE LAS AGUAS

Características químicas

Los resultados de los análisis efectuados en muestras de agua provenientes de las fuentes termales aparecen en la Tabla 1. De acuerdo con los resultados, éstas corresponden a soluciones de salinidad relativamente baja (200 - 240 mg/l) con pH neutro (Palguín) a levemente alcalino (Liquiñe y San Luis). Los constituyentes disueltos en estas aguas termales corresponden a, sulfatos cuyo contenido varía entre 37 y 38 mg/l, bicarbonatos entre 10 y 67 mg/l, carbonatos entre 0 a 60 mg/l, cloruros entre 11 a 29 mg/l y sílice entre 52 y 93 mg/l. Los cationes principales incluyen calcio entre 2,5 y 7,3 mg/l, potasio entre 1,0 y 2,8 mg/l y magnesio entre menos de 0.1 y 1.0 mg/l.

TABLA 1
COMPOSICION QUIMICA DE LAS FUENTES TERMALES DE SAN LUIS,
PALGUIN Y LIQUIÑE

CHEMICAL COMPOSITION OF THE SAN LUIS, PALGUIN, AND LIQUIÑE HOTSPRINGS

Muestras	San Luis		Palguín			Liquiñe	
	SL-4	SL-5	P-1	P-2	P-3	Li-2	Ca-1
Temp. °C	45,8	43,8	39,5	41,0	37,0	65,0	83,5
pH a 22°C	8,9	8,8	7,1	7,1	6,8	9,1	8,6
Constituyentes en mg/l							
Na	58,0	56,0	48,0	54,0	46,0	68,0	76,0
K	1,0	1,0	1,6	1,4	2,8	2,0	2,0
Ca	5,3	5,3	7,3	5,3	4,5	4,3	2,5
Mg	0,1	0,3	1,0	0,5	1,0	0,1	0,1
Li	0,06	0,02	0,08	0,08	0,02	0,08	0,12
Cs	0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	0,05	0,05	0,05
Rb	0,02	0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	0,02	0,02
HCO ₃	26,0	37,0	59,0	58,0	67,0	16,0	10,0
CO ₃	12,0	7,0	0	0	0	24,0	60,0
SO ₄	77,0	74,0	50,0	56,0	37,0	78,0	55,0
Cl	12,0	11,0	18,0	19,0	15,0	20,0	29,0
F	1,8	1,6	1,4	1,6	1,5	1,2	2,2
B	0,05	0,05	0,38	0,38	0,4	0,2	0,32
As	0,05	0,05	< 0,05	< 0,05	0,05	< 0,05	0,05
SiO ₂	52,0	58,0	52,0	52,0	56,0	90,0	93,0
CO ₂	0	0	8,5	8,0	23,0	0	0,2

Las fuentes termales de Palguín presentan altos contenidos de anhídrido carbónico, en tanto que en las demás, este gas se encuentra casi ausente. Además de los constituyentes señalados, estas aguas termales contienen cantidades relativamente altas de fluor (1,2 - 2,2 mg/l) y pequeñas cantidades de arsénico, litio, rubidio, cesio y boro.

La composición química de estas aguas refleja claramente el carácter petrográfico de las rocas en que han circulado. En efecto, el subsuelo de la zona en que se encuentran ubicadas las áreas termales investigadas corresponden principalmente a rocas graníticas y en menor proporción a rocas metamórficas de alto grado.

Las aguas subterráneas provenientes de rocas plútonicas ácidas, presentan en general, bajos contenidos salinos con una predominancia de iones Na^+ y HCO_3^- . Los contenidos de sílice y fluoruros también son relativamente altos, en tanto que los contenidos de calcio y magnesio son proporcionalmente bajos (White et al., 1963; White y Warring, 1963).

Geotermómetros Químicos

La temperatura de descarga de las fuentes termales puede eventualmente ser menor que la temperatura del sistema hidrotermal en profundidad. La disminución de temperatura puede deberse a una pérdida de calor por conducción hacia las rocas atravesadas durante el ascenso a la superficie, o bien, a una mezcla con aguas superficiales más frías.

Las posibles temperaturas originales de los sistemas geotérmicos en profundidad, pueden estimarse mediante geotermómetros químicos, los cuales están basados principalmente en los contenidos de SiO_2 , Na^+ , K^+ y Ca^{++} de las soluciones. La determinación de temperaturas mediante estos métodos aparecen en la Tabla 2 y han sido elaboradas de acuerdo con Truesdell (1975) y Fournier y Truesdell (1973).

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Constituyentes químicos

Los contenidos relativamente bajos de elementos y compuestos disueltos en estas fuentes termales, conjuntamente con el carácter geoquímico de éstos, son indicativos de un origen netamente meteórico para estas aguas. En este caso, los constituyentes de las soluciones termales provendrían de la lixiviación de los minerales de las rocas con las cuales el agua ha estado en contacto. Este hecho se puede explicar considerando que el agua meteórica puede circular hasta profundidades de 2.000 m o más cuando existe suficiente permeabilidad. La energía necesaria para que el agua pueda descender a tales profundidades puede ser proporcionada por la presión artesiana y por diferencias de densidad debidas a diferencias de temperatura y salinidad de las aguas.

Por otra parte, el poder disolvente del agua se incrementa considerablemente al aumentar su temperatura; en esta forma, es posible explicar la mayoría de los constituyentes de las soluciones termales (Ellis y Mahon, 1964). Es probable también la presencia de algunos elementos o compuestos de origen magmático, considerando que en la zona hay centros volcánicos actualmente activos, como lo es el volcán Villarrica. En todo caso, los bajos contenidos salinos podrían ser explicados suponiendo dilución con aguas meteóricas de circulación más superficial.

TABLA 2
TEMPERATURAS DE LAS FUENTES TERMALES CALCULADAS MEDIANTE
GEOTERMOMETROS QUIMICOS

TEMPERATURE OF THE HOT SPRINGS CALCULATED WITH GEOCHEMICAL THERMOMETERS

Fuente termal	Fecha	Temperatura (°C)					
		Observada	SiO ₂ (1)	SiO ₂ (2)	Na/K	Na-K-Ca	
San Luis	(SL-4)	10 - 79	46,0	71,0	103,6	30,3	214,1
San Luis	(SL-5)	10 - 79	44,0	76,6	109,1	54,3	214,1
Palguín	(P - 1)	10 - 79	39,5	71,0	103,6	94,1	236,8
Palguín	(P - 2)	10 - 79	41,0	71,0	103,6	77,5	238,3
Palguín	(P - 3)	10 - 79	37,0	74,8	107,0	138,2	304,7
Liquiñe	(Li - 2)	10 - 79	65,0	101,3	131,5	130,4	251,3
Liquiñe	(Ca - 1)	10 - 79	83,5	103,2	132,7	77,5	295,7

(1) Solución en equilibrio con sílice amorfa

(2) Solución en equilibrio con cuarzo y enfriada por conducción

El contenido de SiO₂ muestra una relación directa con respecto a la temperatura de las aguas termales; en efecto, las termas de Liquiñe además de registrar las mayores temperaturas de la zona son también las que muestran los mayores contenidos SiO₂. Una relación semejante, aún cuando no tan clara, se observa en los contenidos de cloruros, los cuales generalmente son más abundantes en las fuentes de mayores temperaturas. En cambio, los contenidos de bicarbonatos muestran una clara relación inversa con respecto a la temperatura de las fuentes termales; ello se explica por el hecho que, en general, la solubilidad de la calcita disminuye a medida que aumenta la temperatura. Obviamente, es necesario considerar que las relaciones entre la solubilidad de los minerales y la temperatura de las fuentes termales, resultan menos evidente cuando estas fuentes han sufrido diluciones o mezclas con aguas de circulación más superficial, y por lo tanto con escasos contenidos salinos.

Es poco probable que exista un aporte significativo de constituyentes de origen magmático provenientes de la actividad volcánica de la zona, ya que esta participación habría correspondido principalmente a volátiles de azufre y halógenos de carácter fuertemente ácido, como ocurre en las termas de Chillán (Lahsen, 1978). Estas características, sin embargo, no se manifiestan en las fuentes termales aquí estudiadas.

Temperaturas

Sobre la base de los contenidos de ciertos elementos o compuestos del agua termal, cuya solubilidad depende de la temperatura, se han hecho los cálculos de temperaturas del sistema hidrotermal en profundidad (Tabla 2). Las temperaturas obtenidas a partir del contenido de sílice se basan en que estos contenidos están condicionados, además de la temperatura, presión y características químicas del solvente, por la solubilidad del cuarzo y de la calcedonia u otro tipo de sílice amorfa (Fournier y Rowe, 1966; Mahon, 1970). Este geotermómetro supone que el sistema agua-roca haya tenido el tiempo sufi-

ciente para alcanzar el equilibrio entre la sílice disuelta y un determinado mineral de sílice, a la temperatura del sistema hidrotermal y, por otra parte, que no haya habido precipitación de sílice durante el ascenso del agua hacia la superficie. Como es difícil conocer con qué mineral se ha logrado el equilibrio, se hacen los cálculos de temperatura, tanto para un posible equilibrio con cuarzo, como con un mineral amorfo.

En el presente estudio, las temperaturas determinadas considerando un equilibrio con calcedonia resultan, en la generalidad de los casos, aproximadamente un 30% más bajas que aquellas obtenidas suponiendo un equilibrio con cuarzo. Si, por ejemplo, se considera la fuente termal Ca-1 con una temperatura observada de 83,5°C y un gasto del orden de 0,1 l/seg, es más probable que la temperatura original del sistema sea más cercana a aquella obtenida suponiendo un equilibrio con cuarzo (132,7°C), pues es poco probable que una fuente con tan poco gasto, haya tenido una pérdida de calor tan insignificante como la que resultaría de aceptar como válida la temperatura obtenida, asumiendo un equilibrio con sílice amorfa (103,2°C). En consecuencia, aparecen como más aceptables las temperaturas mínimas obtenidas, al suponer un equilibrio con el cuarzo.

Los geotermómetros catiónicos, basados en los contenidos de Na, K y Ca proporcionan dos valores de temperaturas. El método que incluye solamente la razón Na/K entrega valores anormalmente bajos, incluso menores que las temperaturas directamente medidas en las termas, como ocurre con las muestras Ca-1 y SL-4 (Tabla 2); por tal motivo, estos valores deben ser desestimados. El método geotermométrico que incluye además los contenidos de calcio, arroja valores considerablemente más altos que aquellos obtenidos mediante el contenido de sílice. Los valores entre 214°C y 304°C para las temperaturas mínimas de los reservorios en profundidad parecen ser un tanto exagerados pues, sistemas hidrotermales a esas temperaturas deberían tener una expresión superficial mucho más espectacular, como ser grandes áreas de alteración hidrotermal, una mayor cantidad de fuentes termales a mayor temperatura y aguas termales de mucho mayor salinidad, como ocurre con diversas fuentes termales de Chile (Lahsen, 1976). Considerando que este método es totalmente empírico, debe ser utilizado con la debida reserva. Un valor claramente anormal se obtiene en la muestra P-3 que resulta con una temperatura de 304°C, en tanto que las muestras P-1 y P-2 de la misma área geotermal entregan valores de 236 y 238°C respectivamente.

En consecuencia, es posible inferir con mayor grado de seguridad una temperatura mínima entre 100 y 200°C para los reservorios de estas áreas hidrotermales. Temperaturas de este orden se pueden alcanzar con un gradiente geotérmico mayor que el normal, en una, dos o tres veces o sea, de unos 60 - 90°C/km, considerando que el agua termal hubiese alcanzado profundidades del orden de 2.000 m. Un gradiente geotérmico de esa magnitud es altamente probable, debido a la actual ocurrencia de actividad volcánica en la zona.

CONCLUSIONES

Las aguas termales de las áreas de San Luis, Minetué, Palguín y Liquiñe corresponden a soluciones neutras a moderadamente alcalinas, con bajos contenidos de sólidos disueltos, entre 203 y 306 mg/l. Según su composición química estas aguas son de tipo sulfato-carbonatadas, con contenidos relativamente bajos de cloruros. Los cationes más abundantes corresponden a sodio, potasio, calcio y magnesio.

Esta composición química es típica de aguas termales de origen meteórico emplazadas en rocas silíceas, especialmente de tipo granítico. Aún cuando en la zona se desarrolla una considerable actividad volcánica, no hay evidencias de un aporte significativo de fluidos magmáticos a los sistemas hidrotermales investigados.

En la zona se presentan condiciones estructurales (fallas y fracturas) que pueden haber facilitado la infiltración del agua superficial (meteórica) hasta profundidades de 2.000 m o mayores. A esta profundidad el agua habría alcanzado, de acuerdo con los geotermómetros químicos empleados, temperaturas entre 100°C y 200°C. Esta temperatura habría favorecido la lixiviación de los minerales de las rocas en las cuales el agua ha estado circulando, de este modo se puede explicar su contenido salino sin necesidad de un aporte significativo de fluidos magmáticos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo económico recibido a través del Grant E410-8133 del Servicio de Desarrollo Científico, Artístico y de Cooperación Internacional de la Universidad de Chile. Se agradece las valiosas críticas hechas por los Profs. G. Cecioni y H. Moreno.

REFERENCIAS

- Aguirre, L. y Levi, B. (1964). Geología de la Cordillera de los Andes de las provincias de Cautín, Valdivia, Osorno y Llanquihue. *Inst. Invest. Geol. Bol.* 17, Santiago.
- Brüggen, J. (1947). El origen de las aguas minerales de Chile. *Rev. Chilena de Hist. y Geogr.* T. 1, pág. 189-226. Imp. Universitaria, Santiago, Chile.
- Darapský, L. (1890). Las aguas minerales de Chile. Ed. Imprenta del Universo, 193 p. Valparaíso, Chile.
- De Grys, A. (1965). Some observations on hot springs of Central Chile. *Water Res. Research*, 1, n° 3, págs. 415-428.
- Domeyko, I. (1871). Estudio sobre las aguas minerales de Chile. *Anales de la Univ. de Chile*, 1871, T. XXVIII, 221 págs. Santiago.
- Ellis, A.J. y Mahon, W.A. (1964) Natural hydrothermal systems and hot water/rocks interactions. *Geochim. Cosmochim. Acta* V, 28, 1323-1357.
- Fournier, R.O. y Rowe, J.J. (1966). Estimation of underground temperatures from the silica content of waters from hot springs and wet steam well. *Amer. Jour. Sci.*, 264, 685-697.
- Fournier, P. y Truesdell, A. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- Hervé, M. (1976). Estudio Geológico de la Falla Liquiñe-Reloncaví en el área de Liquiñe: antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). *Actas, I Congreso Geológico Chileno, Tomo I*, B39-B56, Santiago.
- Hervé, F.; Moreno, H. y Parada, M. (1974). Granitoids of the Andean Range of Valdivia Province, Chile. *Pacific Geology* 8, 38-45, Japón.
- Lahsen, A. (1976). La actividad Geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile. *Actas I Congreso Geológico Chileno, Tomo I*, B105-B127, Depto. Geol., U. de Chile, Santiago.
- Lahsen, A. (1978). Características Geoquímicas y Origen de las Aguas de las Termas de Chillán. *Rev. Comunicaciones* N° 24, 35-48, Depto. Geol. U. de Chile, Santiago.
- Mahon, W.A. (1970). Chemistry in the exploration and exploitation of hydrothermal systems. *U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Proceedings (Geothermics, Spec. ISS. 2)*, 2, 2, 1310-1322.
- Moreno, H. Marangunic, C. Lahsen, A. (1980). Recopilación Geológica del área de Pucón. *Planning Research Corp. Chile. Proyecto de Desarrollo Turístico de Pucón. Departamento de Geología para AGSA-Metal*, 50 pág. 1 mapa.

- Moreno, H. y Parada, M. (1976). Esquema Geológico de la Cordillera de Los Andes entre los paralelos 39° y 41°30' S. Actas I Congr. Geol. Chileno, Tomo I, A213-A226, Depto. Geología, U. de Chile, Santiago.
- Munizaga, F.; Hervé, F. y Drake, R. (1984). Geocronología K-Ar del extremo septentrional del Batolito Patagónico en la Región de Los Lagos, Chile. IX Congr. Geol. Argentino, Tomo III, 133-145.
- Parada, M. (1975). Estudio geológico de los alrededores de los lagos Calafquén, Panguipulli y Riñihue, Prov. de Valdivia. Memoria de Título, Depto. Geol. U. de Chile, Santiago.
- Parada, M. A. y Munizaga, F. (1978). El Batolito Panguipulli: Caracterización del Plutonismo Jurásico en la Cordillera de Los Andes de la Provincia de Valdivia, X Región (39°30' - 40°15'S). Rev. Comunicaciones N° 23, 12-25.
- Risopatrón, L. (1924). Diccionario Geográfico de Chile. Imp. Universitaria, Santiago, Chile.
- Truesdell, A.H. (1975). Geochemical techniques in exploration. Proc. 2nd U.N. Symposium on the Development and use of Geothermal Resources, 1, liii - lxxix, Santiago, California.
- White, E.; Hem, J.D. y Waring, G.A. (1963). Chemical composition of subsurface waters. Data of Geochemistry 6th Ed, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 440-F, 67 p. Washington.
- White, D.E. and Waring, G.A. (1963). Volcanic emanations. Data of Geochemistry, 6th Ed., U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 440-K, 29 p. Washington.