

## EVALUACION GEOTERMICA DEL "AREA CERRO DOMUYO", PROVINCIA DEL NEUQUEN, REPUBLICA ARGENTINA.

ABEL HECTOR PESCE

*Grupo de Trabajo de Vulcanología  
Secretaría de Minería  
Av. Santa Fé 1548. Piso II.  
1060 - Buenos Aires - Argentina.*

This paper reviews the main conclusions of the first stages of a geothermic study at "Cerro Domo", the main objective of which was to design a low cost model for a geothermal preliminary evaluation. The stratigraphic, geochemical, tectonic and vulcanologic studies have contributed to an understanding of the thermal sources, the geothermal reservoir, the subsurface permeability, the hydrological-geothermal regimes and other parameters, which allow to bound a reservoir economically available. The "Cerro Domo" area is characterized by shoshonitic volcanism with a magmatic origin probably related to a tensional regime. The graben structure favored the confinement of the rising fluids which were stopped by an impervious cover of pyroclastic rock. The thermal fluids would be of shallow depth and would originate a system which grades from vapor-dominated type (fumarolic zone) to a water vapor-mixed type (226° to 218°C) and to water-dominated type (186° to 185°C). Based on these characteristics a sector of higher geothermal interest has been selected, on which to proceed with the following research stages. The integrated evaluation of the first phase of the recognition study has shown the high geothermal potential of the area and its possibility of exploitation.

Neste trabalho são revisadas as principais conclusões do primeiro estágio do estudo geotérmico no "Cerro Domo", cujo principal objetivo foi projetar um modelo econômico para uma avaliação geotérmica preliminar. Os estudos estratigráficos, vulcanológicos, estruturais e geoquímicos permitiram delimitar o campo geotérmico de "Cerro Domo" e estabelecer a profundidade relativa de seu reservatório. Foram definidos os principais parâmetros, tais como fonte de calor, cobertura impermeável, circulação de fluidos e a existência de um reservatório com mistura água-vapor, que apresenta excelentes alternativas de aproveitamento econômico. A área de "Cerro Domo", caracteriza-se por um vulcanismo "shoshonítico" cuja câmara magmática encontra-se a níveis pouco profundos e funciona como fonte de calor geradora do campo geotérmico. Os esforços compressivos na região do "Cerro Domo" originaram uma área de alívio tensional que resultou numa estrutura de graben que permite o confinamento dos fluidos. A análise estratigráfica demonstrou a existência de um reservatório localizado a níveis pouco profundos (650 a 700 m da superfície) e sobre este a existência de uma rocha-tampão ("piroclastitas ácidas") que selam o sistema geotérmico. Os fluidos termais, que sobem dos níveis profundos, originam um sistema que vai, gradualmente, passando de vapor-dominante (zona de fumarola) para mistura água-vapor, com temperaturas de 226°C a 218°C e para água-dominante, com temperaturas de 186°C a 185°C. Com base nestas características foi determinado um setor como o de maior interesse geotérmico, no qual se devem prosseguir etapas seguintes do estudo. A avaliação integrada do primeiro estágio do estudo mostrou o alto potencial geotérmico da área estudada e sua possibilidade de exploração.

(Traduzido pela Revista)

### INTRODUCCION

#### Características y ubicación

El presente informe reúne las conclusiones de los trabajos estratigráficos, vulcanológicos, estructurales y geoquímicos e incluye el modelo geotérmico preliminar

propuesto, que junto con las recomendaciones y objetivos de la fase siguiente constituyen la síntesis del estudio de prefactibilidad geotérmica del área del Cerro Domuyo.

El área investigada está ubicada en el noroeste de la provincia del Neuquén. Los estudios de carácter geológico regional efectuados permitieron delimitar la anomalía térmica y valorar en forma integral el episodio

eruptivo. Abarcan una superficie aproximada de 4.700 km<sup>2</sup>, comprendida entre los paralelos de 36°30' y 37°00' de latitud sur, el meridiano de 70°00' y el límite internacional con Chile. Ha sido estudiada en detalle el área del Cerro Domuyo que se encuentra a 35 km de la localidad de Varvarco y a 154 km de Chos Malal (Fig. 1).

Los trabajos de detalle cubrieron áreas de aproximadamente 600 km<sup>2</sup>, comprendiendo al Cerro Domo y sus inmediaciones como punto central, siendo el objeto principal de estos estudios.

### Objeto del estudio

La primera fase del estudio de prefactibilidad tuvo como objeto esclarecer las características particulares del área, delinear un modelo geotérmico preliminar y establecer las pautas que tienen que ser alcanzadas en la fase siguiente de exploración, geofísica y perforación. Este objetivo se concretó en función de los estudios estratigráficos, vulcanológicos, estructurales y geoquímicos.

Mediante los estudios geológicos regionales se delimitó el área del Cerro Domo, centro efusivo joven, que por sus características confiere excelentes posibilidades para la extracción de un fluido de alta entalpía, que podría ser utilizado para el aprovechamiento energético.

Las características más salientes del área del Cerro Domo determinadas en los trabajos previos (Pesce, 1981; Brousse & Pesce, 1982), son las siguientes:

- Una actividad volcánica reciente, representada por el Cerro Covunco, los Cerros de La Pampa y el Cerro Domo.
- Una posible vinculación de la actividad volcánica con la fuente de calor.
- La aparente presencia de productos finales diferenciados.
- Indicios de una actividad explosiva freatomagmática, que indica el ascenso a niveles muy superficiales de la cámara magmática.
- La posibilidad de existencia de un acuífero (reservorio), manifestado por un basamento muy fracturado.

- Fuentes termales con alta temperatura de superficie (El Humazo, Los Tachos, La Olleta), géiseres y fumarolas (La Bramadora).
- La proximidad de una zona de recarga (glaciares y nieves perennes en el Cerro Domuyo).

Este conjunto de evidencias señalan un interés geotérmico primario para el área permitiendo orientar los estudios geo-vulcanológicos, estructurales y geoquímicos de la primera fase del estudio de prefactibilidad para cumplimentar el principal objetivo que es el de establecer un *modelo geotérmico preliminar*.

### Agradecimientos

La evaluación geotérmica del área del Cerro Domuyo fue encauzada en el marco de los programas de tareas que realizó el Grupo de Trabajo de Vulcanología dependiente del Ex-Servicio Geológico Nacional. Las tareas de campo se ejecutaron en el período marzo-abril de 1981, donde se contó con la inestimable guía del baquiano Antonio Barros. Los trabajos de laboratorio e interpretación se llevaron a cabo entre los meses de noviembre de 1981 a junio de 1982, en el Laboratoire de Petrographie et Vulcanologie de la Université de Paris-sud Orsay. Se quiere por ello dejar un expreso agradecimiento al Profesor Dr. Roger Brousse y a todos los integrantes del laboratorio que contribuyeron generosamente durante mi estadía. Se agradece especialmente también la lectura crítica del manuscrito al Dr. Julio Lage.

### ESTUDIO ESTRATIGRAFICO

#### Objetivo del Estudio Estratigráfico

Los objetivos del estudio estratigráfico tendieron a esclarecer dos aspectos fundamentales:

- Proporcionar un cuadro estratigráfico, evidenciando formaciones con características aptas para reservorio y de cubierta impermeable.
- Determinar el rango de edad del Cerro Domo.

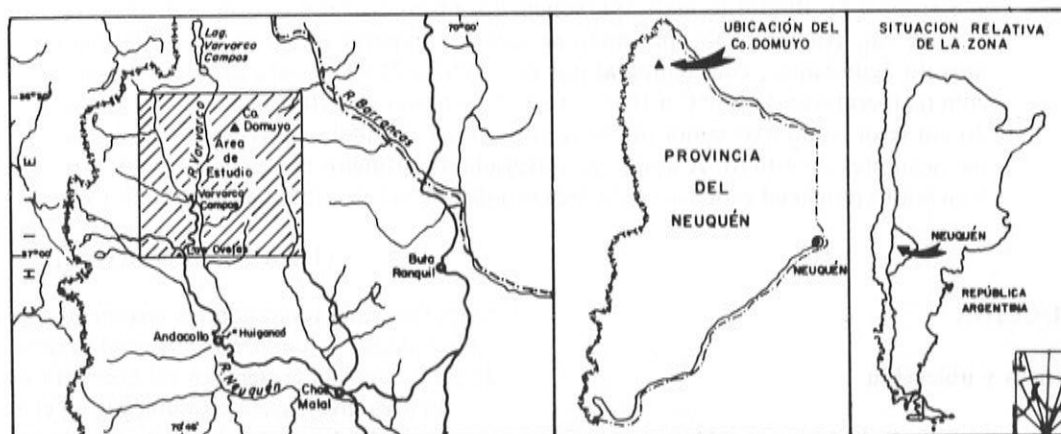


Figura 1— Ubicación del área del Cerro Domo.

## Síntesis Estratigráfica.

### A) Pre-Cenozoico

Está representado por diferentes unidades cuya edad varía desde el Pérmico hasta el Cretácico temprano. Las unidades más antiguas son el *Grupo Choiyoi* (Groeber, 1974) y sus rocas metamórficas por efectos de las *Plutonitas Varvarco* (Pesce, 1981) corresponden a un episodio plutónico de considerable magnitud, constituido por diferentes fases magmáticas. Son granodioritas anfibólico-biotíticas de grano medio a grueso, con valores de edades absolutas según K-Ar de  $259 \pm 13$  Ma (Pérmico superior) y  $227 \pm 16$  Ma (Triásico tardío). Sobre éstas se apoya el Liásico integrado fundamentalmente por delgados bancos de piroclastitas silicificadas. En un nivel superior se encuentran los depósitos de la cuenca Neuquina, integrados por: *Formación La Manga* (Groeber, 1951) constituida fundamentalmente por sedimentitas: areniscas grises, pelitas negras y margas oscuras; *Formación Auquilco* (Yeso Principal, Schiller, 1912) constituida por yeso blanco grisáceo y areniscas con clastos de yeso; *Formación Tordillo* (Groeber, 1929); compuesta fundamentalmente por areniscas rojas bien estratificadas y bancos limolíticos de menor proporción y el *Grupo Mendoza*: integrado en su mayor parte por bancos de calizas negras y pelitas calcáreas.

En el presente estudio, a este conjunto de unidades se lo denominará "basamento" (Fig. 2).

### B) Cenozoico

#### I) Piroclastitas ácidas (Brousse & Pesce, 1982).

Se denomina de esta forma a una extensa y potente secuencia de piroclastitas que se apoya sobre las Plutonitas Varvarco.

Son extensas acumulaciones de depósitos fragmentarios que se encuentran esparcidos en la región, constituidos por diferentes niveles de "Flujo Pumiceo" (Pu-

mice Flow; Ross & Smith, 1961), intercaladas en algunos casos por piroclastitas redepositadas. Cada una de las unidades está integrada por bancos sin estratificación, con espesores que varían entre 10 a 15 m. Hay un número variado de litoclastos y de gran cantidad de fragmentos pumiceos, estos últimos orientados en la dirección del flujo. Se considera que son productos de fusión cortical originados cerca de la cámara andesítica, pero que no tienen relación genética con la sucuencia calcoalcalina descrita en el presente estudio. El espesor de esta unidad, en la zona del Cerro Domo, se estima aproximadamente en 500 m, valor que deberá precisarse mediante estudios geofísicos y perforaciones preliminares.

#### II) *Formación Cajón Negro*: (Pesce, 1981).

La presente unidad estaría integrada solamente por el episodio, probablemente inicial, explosivo, que dió origen a los aglomerados volcánicos, que se apoyan sobre los flujos pumiceos. Esta unidad que cubre una gran superficie está integrada por fenoclastos de variada litología, muy duros y con una estratificación grosera. Dos rocas extraídas de los afloramientos ubicados en la margen izquierda del arroyo Atreuco analizadas con el método K-Ar dieron edades de  $10 \pm 1$  y  $14 \pm 2$  Ma por lo que, el comienzo del vulcanismo se sitúa en el Mioceno medio.

#### III) *Formación Quebrada Honda*: (Pesce, 1981).

Está integrada por las diferentes coladas de andesitas básicas que se derramaron sobre los aglomerados volcánicos de la *Formación Cajón Negro* y que corresponden a la continuación de ese vulcanismo (Mioceno medio).

#### IV) *Formación Sierra de Flores*: (Brousse & Pesce, 1982).

Esta unidad representa a los distintos derrames lávicos que provienen del centro efusivo homónimo. Las

| SERIE CALCO-ALCALINA                        | SERIE SHOSHONITICA                        | EDAD Ma  |
|---|---|--|
| Magmatismo<br>Dómico                        | Domos y coladas domicas<br>(liparitas)    | Pleistoceno medio<br>o superior alta                                 |
|   | Depósitos freatomagmáticos<br>(liparitas) | $0H \pm 0.02$ , $0.29 \pm 0.07$<br>$0.55 \pm 0.10$ , $0.72 \pm 0.10$ |
| Basalto Cerro Colorado                      |   | Pleistoceno inferior<br>$1.45 \pm 0.20$                              |
|   | Formación Atreuco (banakitas y latitas)   | Plioceno superior  |
| Formación Sa. de Flores (andesitas)         |   | Plioceno inferior<br>$4 \pm 10$                                      |
| Formación Q. Honda (andesitas - básicas)    |   | Mioceno medio<br>o superior  |
| Formación Cajón Negro (andesitas - básicas) |   | $10 \pm 10$<br>$14 \pm 20$   |
| Piroclastitas ácidas                        |   | Mioceno inferior   |
| BASAMENTO                                   |   | Pre-Cenozoico  |

Figura 2 — Estratigrafía del Cenozoico.

coladas que son de 1,5 a 2 m de potencia, presentan una marcada fluidalidad y cubren progresivamente a los bancos lávicos de la Formación Quebrada Honda. Están constituidas por andesitas básicas en su parte inferior y en sus términos superiores predominan las andesitas.

#### V) Formación Atreuco: (Llambías et al., 1979).

Con este nombre se caracterizó a los bancos lávicos que se encuentran a lo largo del Arroyo Atreuco y a ambos lados del río Varvarco. Estos derrames son las manifestaciones iniciales del Magmatismo Shoshonítico y su centro de emisión se encuentra en el Cerro Domo situado al este. Las diferentes coladas, cuyas rocas tienen una composición de banakitas y latitas, cubren a las lavas de la Formación Sierra de Flores y a otras unidades precedentes.

#### VI) Basalto Cerro Colorado: (Pesce, 1981).

Esta denominación fue empleada para caracterizar un pequeño centro monogénico y sus derrames lávicos de basalto aluminico. Actualmente se extiende la denominación a un conjunto de manifestaciones existentes en la región, con idénticas características.

Una roca proveniente de la colada del Cerro Colorado fue analizada por el método K-Ar, obteniéndose una edad de  $1,45 \pm 0,20$  Ma.

#### VII) Magmatismo Dómico: (Brousse & Pesce, 1982).

Mediante esta denominación se definió al último episodio del vulcanismo ácido shoshonítico existente en la región. Se considera que los cuerpos ácidos que afloran en el flanco suroeste del Cerro Domuyo, son cuerpos dómicos que se emplazaron según los sistemas estructurales este-oeste y noroeste, que se comportaron como zonas de alivio tensional en ese sector y no son co-

ladas que están vinculadas con el intrusivo del Cerro Domuyo (facies intrusiva, Llambías et al., 1979).

El magmatismo dómico, que es la continuación hacia térmicos más diferenciados de la secuencia shoshonítica, está representado en su base por los depósitos freatomagmáticos. Este depósito está constituido por las rocas previamente consolidadas de composición liparítica derivadas o provenientes de la explosión resultante de la vaporización del agua presente en ese nivel freático, debido al aumento de temperatura motivado por el ascenso del magma. Es común encontrar gran cantidad de bloques de litoclastos de variado tamaño, destacándose entre ellos los provenientes del basamento.

Con posterioridad, y a lo largo de los sistemas tensionales, se emplazaron los cuerpos dómicos. Entre ellos se encuentran los domos de coladas múltiples "tortilla" (Cerro Covunco ubicado al sur de las nacientes del arroyo homónimo) y los domo-coladas, con polaridad simple o doble (Cerros de La Pampa y el Cerro Domo).

#### Esquema geológico del área del Cerro Domo

Los estudios estratigráficos a nivel regional han permitido establecer un esquema evolutivo de la zona del Cerro Domo (Fig. 3) que resulta de interés desde el punto de vista de sus posibilidades geotérmicas.

El área está caracterizada por un vulcanismo cuartario, emplazado en la intersección de numerosos planos de fractura. Es una zona tectónicamente deprimida y subdividida en bloques que ofrece condiciones favorables para el ascenso del magma a niveles superficiales.

El "basamento" integrado por las unidades Pre-Cenozoicas se encuentra a poca profundidad y presenta una marcada permeabilidad. Las unidades, integradas fundamentalmente por sedimentitas de la cuenca neuquina compuestas en su mayoría por areniscas, cali-

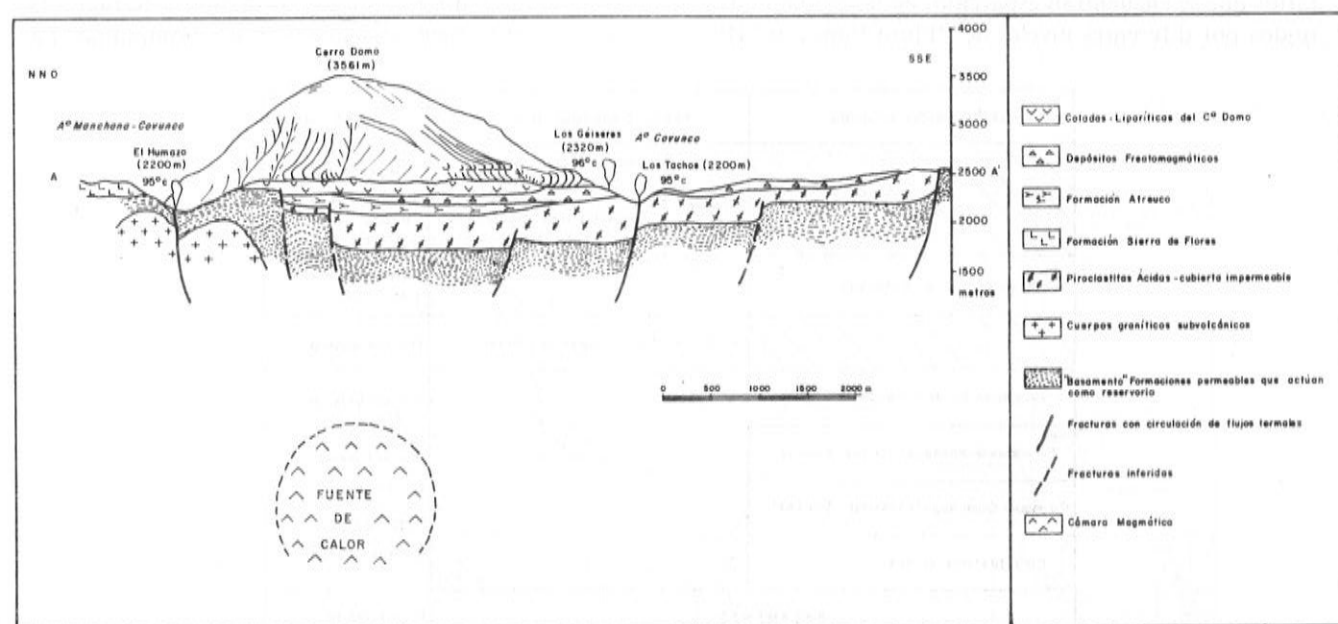


Figura 3 — Esquema geológico del área del Cerro Domo.

zas y pelitas, tienen una fuerte permeabilidad secundaria, resultado de la intensa fracturación a que han sido sometidas. Este basamento aflora al noroeste y este del Cerro Domo y se hunde hacia el oeste, emergiendo en pequeños y aislados bloques, como el del arroyo Manchana-Covunco, en la zona del Humazo.

Las piroclastitas ácidas representadas por los diferentes niveles de flujos pumíceos cubren a las unidades del basamento constituyendo una muy buena unidad impermeable debido a los distintos niveles tobáceos de abundante cantidad de fragmentos pumíceos. Presentan un elevado grado de alteración secundaria, dada la transformación de sus trizas vítreas en materiales arcillosos. Asimismo las intercalaciones de piroclastitas re-depositadas en los diferentes niveles presentan una alteración similar. La extensa faja hidrotermalizada en la que predomina la silicificación ubicada a lo largo de la falla "Covunco", en la zona de Los Tachos y Los Géiseres, estaría relacionada con una actividad hidrotermal fósil, que probablemente tenga una considerable extensión horizontal.

Las edades de  $0,11 \pm 0,02$ ;  $0,29 \pm 0,07$ ;  $0,55 \pm 0,10$  y  $0,72 \pm 0,1$  Ma para las rocas del Cerro Domo, están confirmando la existencia de un vulcanismo, de edad Pleistoceno, estrechamente vinculado a la anomalía térmica de esa área.

Las diferentes vertientes y emanaciones de vapor, con temperaturas de  $95^\circ$  y  $96^\circ\text{C}$  en superficie, la presencia de productos volcánicos diferenciados, la existencia de depósitos freatomagmáticos, la manifestación fuma-

rólica actual de La Bramadora y la zona fumarolizada que atraviesa el flanco NE del Cerro Domo, ponen en evidencia la existencia de una fuente de calor en los niveles más superficiales de la corteza.

**Conclusiones**

Los resultados de los estudios estratigráficos se sintetizan a continuación:

- a) En el área del Cerro Domo se encuentra un "basamento" integrado por las unidades Pre-Cenozoica, situado a poca profundidad, que presenta características aptas para actuar como reservorio.
- b) Sobre el basamento se encuentra una espesa secuencia de piroclastitas, con alto grado de alteración, constituyendo una importante cubierta impermeable que aísla al sistema geotérmico.

**ESTUDIO VULCANOLÓGICO**

**Objetivos**

El estudio vulcanológico tuvo los siguientes objetivos:

- a) Dilucidar el problema vulcanológico mediante la diferenciación de asociaciones volcánicas.
- b) Establecer si el Cerro Domo es producto de una diferenciación proveniente de un fraccionamiento y si existen relaciones genéticas con otras rocas, con el objeto de conocer su evolución.

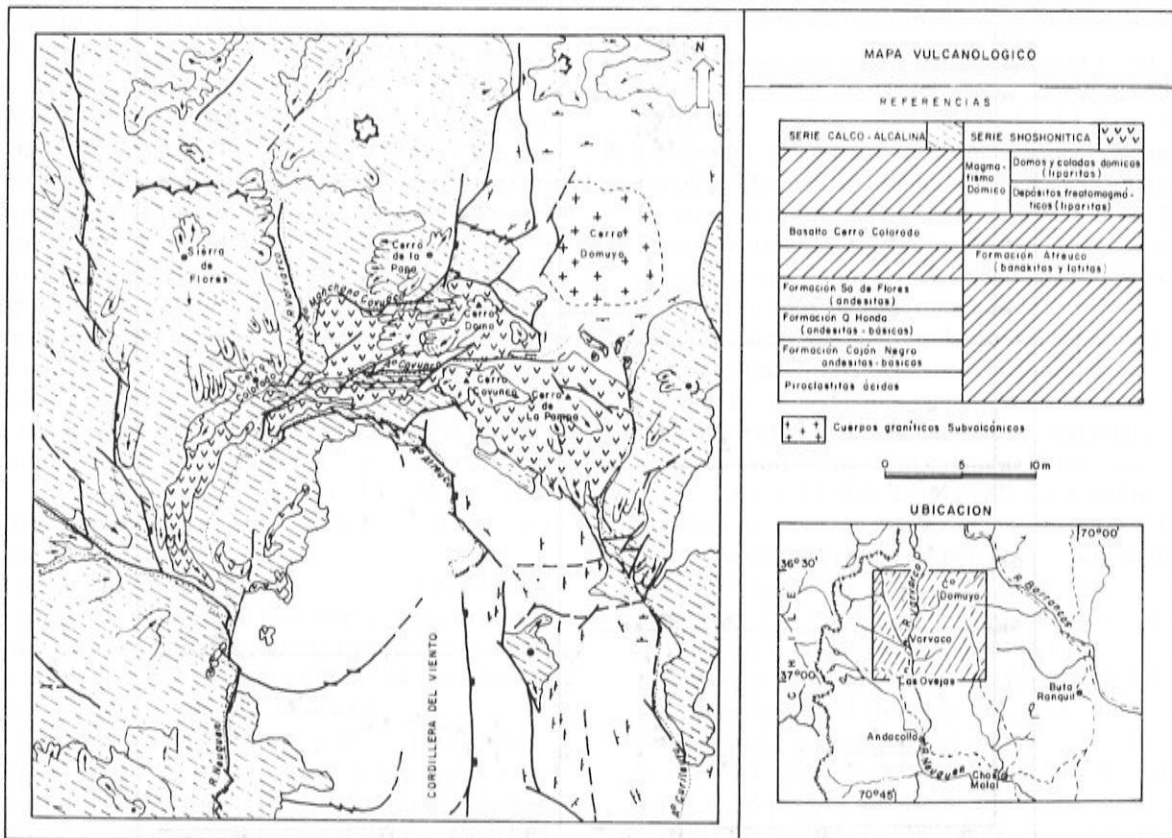


Figura 4 — Mapa vulcanológico.

c) Aclarar el problema de la fuente de calor, es decir la causa de la anomalía térmica, que confirmaba la presencia de una cámara magmática situada en niveles superficiales de la corteza.

**Síntesis vulcanológica**

Para el esclarecimiento de los objetivos previamente señalados se realizaron 230 cortes delgados. De su estudio petrográfico se seleccionaron 46 rocas correspondientes a diferentes niveles de cada una de las unidades geológicas establecidas, a las que se les realizaron análisis químico. Sobre la base de sus resultados se analizaron 19 rocas por microsonda electrónica con un total de 229 mediciones puntuales. De la representación y su clasificación en los diagramas de variación  $K_2O/SiO_2$ , alcalis/ $SiO_2$  y AFM se desprende la existencia de dos asociaciones magmáticas en la región (Fig. 4). Una de ellas pertenece a la serie calcoalcalina y es la que tiene un amplio desarrollo. Está vinculada con el inicio del vulcanismo que se desarrolló durante el Plio-holoceno.

La secuencia calcoalcalina (que fue activa en la región durante el Mioceno superior-Pleistoceno inferior) está integrada por: las piroclastitas ácidas; los aglomerados volcánicos de la Formación Cajón Negro; las coladas de andesitas de la Formación Sierra de Flores y los centros monogénicos de basalto.

El vulcanismo shoshonítico está representado por una secuencia que se ha diferenciado a términos ácidos. Comienza con banakitas y latitas de la Formación Atrouco, continúa con los depósitos freatomagmáticos

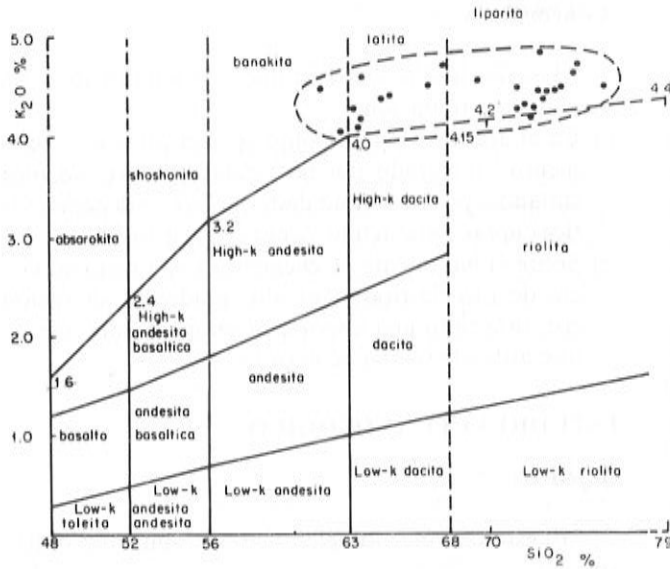


Figura 5 — Diagrama  $K_2O/SiO_2$  de Peccerillo & Taylor (1976). Las líneas de trazo cortado corresponden a los nuevos campos delimitados para la serie shoshonítica por Pesce & Brousse (1984).

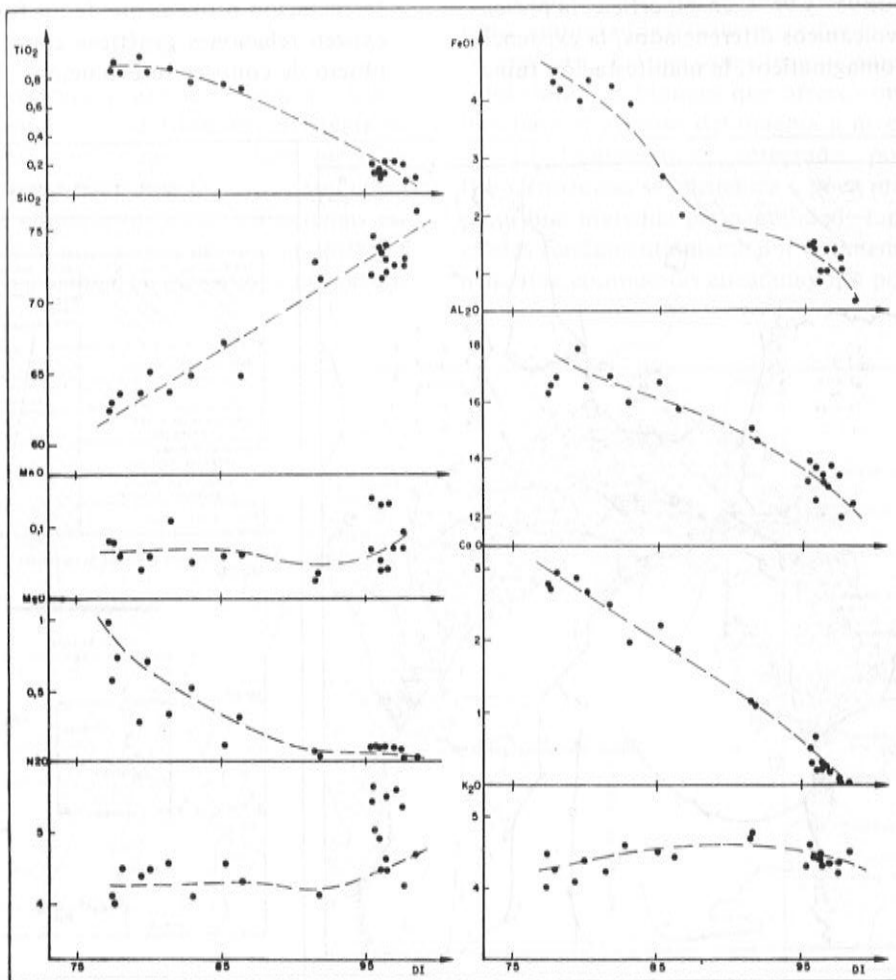


Figura 6 — Variación de los óxidos en función del DI.

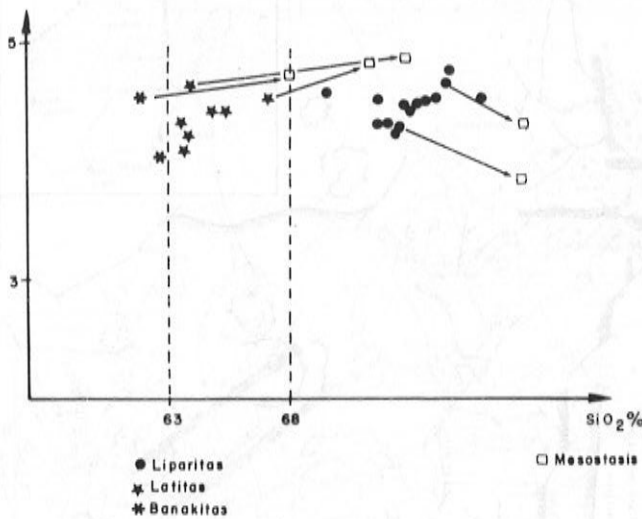


Figura 7 — Diagrama potasio/silice de rocas de la serie magmática shoshonítica y de algunas de sus mesostasis vítreas analizadas por microsonda electrónica.

liparíticos y, finaliza con los cuerpos dómicos de composición liparíticos (Fig. 5). Con el fin de establecer si el Cerro Domo es producto de una diferenciación proveniente de un fraccionamiento y si estas unidades están genéticamente vinculadas, se ha estudiado la variación de los elementos mayoritarios en función del índice de diferenciación (DI). El orden de aparición de los minerales en la serie y la variación de los elementos químicos dentro del líquido residual, indican una evolución de la serie por cristalización fraccionada. (Fig. 6).

Del comportamiento de los elementos mayores en función del DI, se desprende que existe una marcada similitud entre las diferentes fases, es decir, entre las coladas de banakitas y latitas de la Formación Atréuco, los depósitos freatomagmáticos y los cuerpos dómicos con sus coladas liparíticas, constituyendo estos últimos los productos más diferenciados.

Con el fin de asegurar que las fases que controlan la diferenciación de la serie magmática shoshonítica son las determinadas, fue necesario verificar si la separación de cada una de las fases, que da nacimiento a los líquidos residuales es de idéntica composición a la fase siguiente que se continúa formando en el magma. Analizando un cierto número de mesostasis vítreas de rocas de esta serie se ha constatado que las distintas mesostasis analizadas son de la misma composición que la roca precedente (Fig. 7).

La mesostasis de las banakitas tienen idéntica composición a las latitas, las mesostasis de las latitas presentan similar composición que los análisis químicos de las liparitas y las mesostasis de estas últimas tienen un enriquecimiento en  $\text{SiO}_2$  como es de esperar.

De esta forma se ha podido verificar que la evolución química de los líquidos en el curso de la diferenciación es idéntica a la de las rocas del conjunto de la serie. Por lo tanto se considera que las coladas de banakitas y latitas, los depósitos freatomagmáticos y los cuerpos dómicos, están genéticamente ligados y son parte inte-

grante de un mismo sistema magmático, producto de una diferenciación fraccionada.

Para aclarar el problema de la fuente de calor se realizaron los estudios de los equilibrios mineralógicos de las rocas constituyentes de las coladas de la Formación Atréuco, que permitieron estimar los parámetros físicos (temperatura, presión y profundidad) del emplazamiento de la cámara magmática.

Estos se obtuvieron sobre la base del geotermómetro magnetita-ilmenita (Buddington & Lindstey, 1964, combinado con el geotermómetro Plagioclasa-líquido de Kudo & Weill, 1970), donde se relacionan las temperaturas de cristalización de líquidos y minerales. La cámara magmática se habría emplazado inicialmente a 6 km de la superficie con temperaturas de alrededor de  $890^\circ\text{C}$  y una presión de 3 Kb. Con posterioridad este magma ha ascendido a niveles superficiales de la corteza (se estima entre 2 a 3 km) como lo prueban los depósitos freatomagmáticos y los xenolitos del basamento en donde se habría emplazado.

De esta forma se aclara el problema de la fuente de calor, planteado entre los objetivos a dilucidar mediante el estudio vulcanológico y se pone en evidencia que el área del Cerro Domo está vinculada a una zona térmicamente anómala, relacionada con la presencia de masas magmáticas emplazadas en los niveles superiores de la corteza.

## Conclusiones

- Se estableció la presencia de un vulcanismo de carácter shoshonítico que se desarrolló durante el Plioceno-Holoceno al cual está vinculado el Cerro Domo.
- Existe una notable similitud entre las lavas de la Formación Atréuco, los depósitos freatomagmáticos y los cuerpos dómicos. En especial, las rocas del Cerro Domo representan la evolución hacia térmicos más diferenciados. Están genéticamente ligados y pertenecen a un mismo sistema magmático.
- Las características petrográficas, la geoquímica de los elementos mayores, las relaciones lineales que presentan los elementos mayoritarios en función del DI y los estudios de las variaciones químicas de las diferentes mesostasis, indican una cristalización fraccionada en el interior de una cámara magmática.
- La existencia de una anomalía térmica en el área del Cerro Domo está relacionada con la presencia de una cámara magmática. La presencia en superficie de productos evolucionados de edad reciente indican que una cantidad de magma se diferenció en la corteza terrestre. Este magma se instaló inicialmente a 6 km de la superficie de la corteza antes de 1,45 Ma con temperaturas de alrededor de  $890^\circ\text{C}$ . A contar de 0,72 Ma, dicho magma ascendió a niveles superficiales y dió lugar a los productos más ácidos (liparitas) del Cerro Domo, constituyéndose el residuo de la cámara magmática, como la *fente de calor* generadora de los fluidos geotermales.

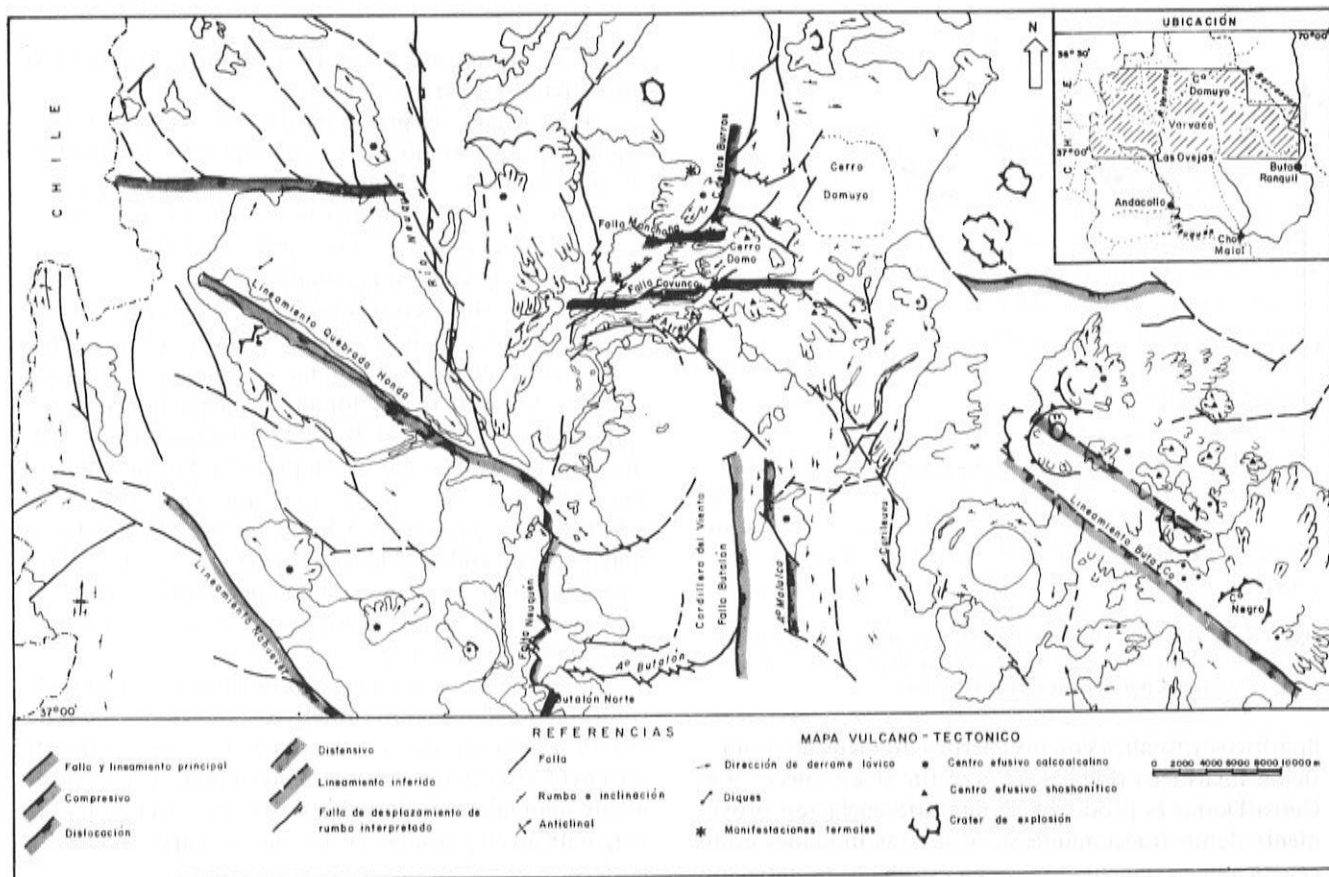


Figura 8 — Mapa vulcano-tectónico regional.

## ESTUDIO ESTRUCTURAL

### Objetivos

Los objetivos principales del estudio estructural fueron:

- Definir los caracteres estructurales de importancia regional, con particular referencia: al estilo estructural, a la geometría de los sistemas de fracturas más importantes y a las relaciones entre la tectónica y el vulcanismo.
- Identificar y mapear los sistemas locales de fracturas con indicación de la edad relativa y de su densidad.

### Síntesis Estructural

#### Observación de Campo

Las características estructurales observadas, reflejan el comportamiento que observa este sector de la corteza en respuesta a los esfuerzos compresivos, a que es constantemente sometida por la convergencia de la Placa de Nazca. Las observaciones realizadas sobre una superficie de aproximadamente 4.655 km<sup>2</sup>, destacan, por su importancia regional, tres grandes direcciones de rumbo: norte-sur; noroeste y este-oeste.

En la zona del Cerro Domo se ha reconocido, con un menor grado de desarrollo areal, un conjunto de direcciones de rumbo locales responsables del alto grado de fracturación presente y que es compatible con las

principales direcciones de fracturación regional, anteriormente señaladas.

El fracturamiento regional Norte-Sur, responde a sistemas de fallas inversas compresivas que se manifiestan fundamentalmente en los terrenos más antiguos. La gran fractura (falla Butalón), por ejemplo, ha dislocado a las rocas del Grupo Choiyoi en la Cordillera del Viento (Fig. 8) a lo largo de los tramos superiores de los arroyos Butalón y Atreuco. Hacia el norte está encubierta por los derrames lávicos cuaternarios de la secuencia shoshonítica, para reaparecer a lo largo del Cajón de los Burros. Esta línea estructural presenta numerosos desplazamientos hacia el este por efecto de varios planos de dislocación tangencial de rumbo noroeste.

Otro lugar donde se pueden observar evidencias del fallamiento inverso compresivo es a lo largo del río Neuquén, sobre todo donde el tramo medio-superior presenta un marcado rumbo N-S. Estas estructuras se habrían reactivado con anterioridad a la depositación de los derrames lávicos de la Formación Atreuco (integrante basal de la secuencia shoshonítica), dado que sus bancos se encuentran en forma horizontal sobre un sustrato que ha sido dislocado con evidencias de efectos compresivos.

Idénticas características estructurales se han podido observar en las cabeceras del arroyo Molulco, en donde los esfuerzos compresivos han elevado el bloque que constituye el flanco oriental de la Cordillera del Viento.

De lo observado surge el neto predominio que ha tenido la tectónica compresiva en la región, fundamentalmente sobre los terrenos más antiguos (Grupo Choi-



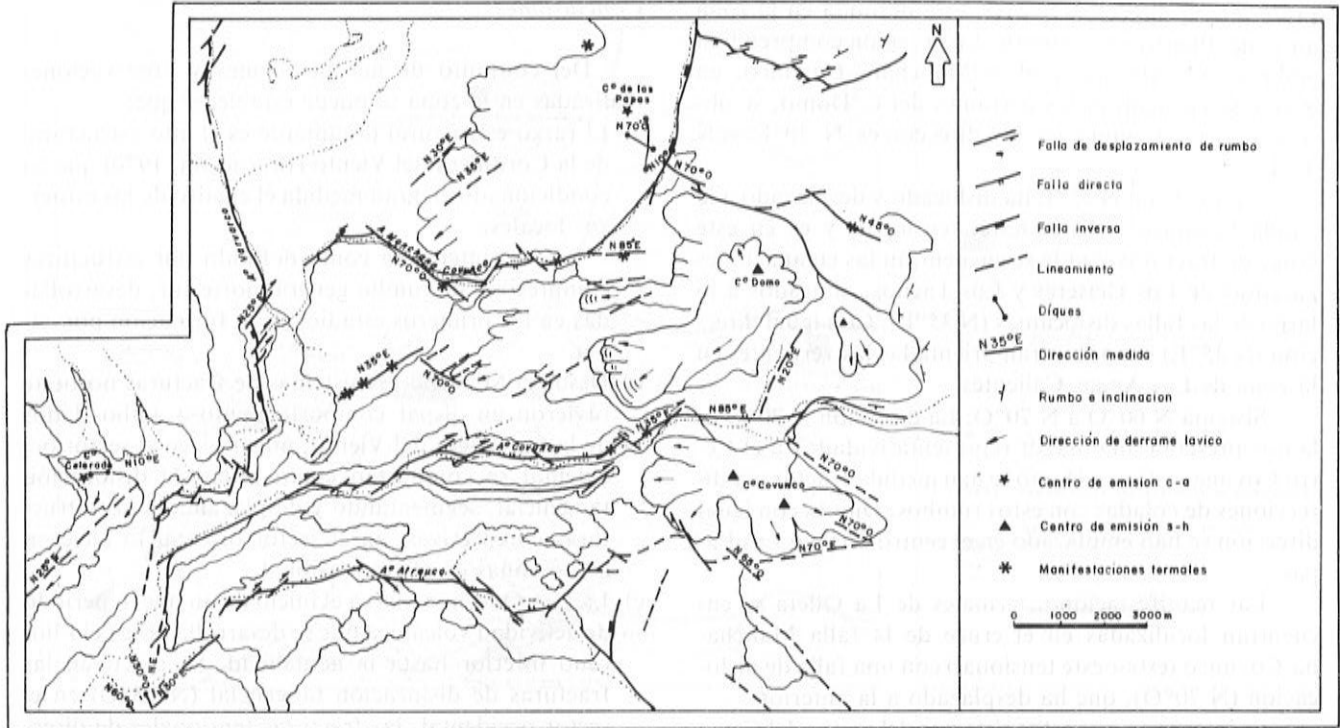


Figura 9 — Esquema estructural del área del Cerro Domo.

yoi y sedimentitas de la Cuenca Neuquina) constituyendo estos el alto estructural de la Cordillera del Viento (Braccacini, 1970) elemento positivo más antiguo. Surge como esquema estructural para las rocas del "basamento" un sistema de fallas inversas de alto ángulo que han dislocado y apilado a las rocas rígidas inferiores y plegado a las sedimentitas que la subyacen.

El fracturamiento estructural Noroeste presenta un dispar comportamiento a ambos lados del "basamento" aflorante. Mientras en el sector occidental las fracturas se comportan como planos de alivio tensional.

El lineamiento Quebrada Honda (en el sector occidental) se interpreta como un extenso plano de dislocación de rumbo  $N 45^{\circ}O$  que afectó a todas las unidades infrayacentes a la Formación Atreuco, segmentando y desplazando a los bloques de la "falla Neuquén" (N-S).

En el sector occidental las evidencias de las grandes estructuras están en parte enmascaradas por la cubierta volcánica Pliocena. No obstante, la alineación de los diferentes centros volcánicos y algunas evidencias de fallas locales permiten interpretar estructuras con direcciones noroeste que se comportaron como zonas de alivio tensional. Una de ellas es el "Lineamiento Butaco", que se manifiesta, por una línea estructural de rumbo  $N 50^{\circ}O$ , que se ha comportado como una falla directa y ha dislocado al centro efusivo Cerro Negro. A lo largo de ella se observan depósitos de brechas de falla y fuentes termales de bajo grado.

La fracturación regional este-oeste responde a un fallamiento directo, que se corresponde con zonas de alivio tensional como lo indicarían las evidencias vulcanológicas. Este lineamiento adquiere importancia en la región centro-norte, por haber formado una estructura

de graben que ha dislocado la parte norte del alto estructural de la Cordillera del Viento, donde se ha emplazado el vulcanismo shoshonítico y los cuerpos monogénicos de basalto primario.

Un rasgo de este tipo lo constituye la falla Covunco que con leves desplazamientos tangenciales, presenta un rumbo general que varía de  $N 80^{\circ}E$  a  $N 85^{\circ}E$ . Paralelo a esta falla se encuentra un conjunto de centro de emisión de edad Holocena, de composición shoshonítica. Otra línea de fracturación de dirección general este-oeste, es la falla Manchana-Covunco, que también ha sufrido leves desplazamientos tangenciales.

Se interpreta que este lineamiento estructural, se ha mantenido en permanente actividad a lo largo del Plioceno-Holoceno dado que permitió el emplazamiento de cuerpos volcánicos de esa edad y posteriormente dislocó a sus derrames lávicos.

En la zona del Cerro Domo se han medido una cierta cantidad de lineamientos, diques y pequeñas fracturas que están subordinadas a las grandes direcciones de fracturación regional ya señaladas (Fig. 9). Del conjunto de estas mediciones se diferenciaron dos sistemas que son  $N 25^{\circ}E$  y  $N 60^{\circ}O$ , con sus respectivas conjugadas debilmente esbozadas de  $N 30^{\circ}$  y NS. La dirección  $N 25^{\circ}E$  presenta una sensible variación a  $N 35^{\circ}E$  en el tiempo y paralelamente la dirección  $N 60^{\circ}O$  pasa a  $N 70^{\circ}O$ . Estas direcciones estructurales han dislocado y desplazado a las fallas tensionales de rumbo este-oeste.

Sistema  $N 25^{\circ}E$  a  $N 35^{\circ}E$ : Hacia el este, prevalece el sistema  $N 25^{\circ}E$ , que se manifiesta en los afloramientos del "Granito Varvarco" y en los derrames lávicos del Cerro Colorado, cuyas coladas tienen un marcado rumbo  $N 25^{\circ}E$ . En base a esta última evidencia se inter-

pretó que la dirección N 25°E está definida en la zona antes del Pleistoceno inferior. En la región comprendida entre el A° Atreuco y el A° Manchana-Covunco, en donde se encuentran los derrames del C° Domo, se observa un predominio de las direcciones N 30°E y N 35°E.

La dirección N 35°E ha dislocado y desplazado a la "falla Covunco" (Este-Oeste; tensional) y es en este cruce de fracturas donde se encuentran las emanaciones gaseosas de Los Géiseres y Los Tachos, alineados a lo largo de las fallas dislocantes (N 35°E). Con igual dirección (N 35°E) se encuentran orientadas las vertientes en la zona de Las Aguas Calientes.

Sistema N 60°O a N 70°O: La dirección N 70°O es la que presenta una mayor representatividad. En el Cerro Covunco y Cerro Domo se han medido fracturas y direcciones de coladas con estos rumbos. Diques con igual dirección se han emplazado en el centro efusivo Las Pampas.

Las manifestaciones termales de La Olleta se encuentran localizadas en el cruce de la falla Manchana-Covunco (este-oeste tensional) con una falla de dislocación (N 70°O), que ha desplazado a la anterior.

Se interpreta que estos sistemas del sector del Cerro Domo, corresponden a los planos de dislocación secundarios, resultantes de las variaciones de empuje locales desarrollados como respuesta a los esfuerzos regionales.

A su vez, se considera, que habría existido un aumento de la deformación, desde el Plioceno inferior hasta el Holoceno, la que está manifestada por un aumento de la intensidad de la cupla que fue produciendo un paulatino cambio en los planos de dislocación.

#### *Análisis de la Estructura*

Teniendo en cuenta los diferentes rasgos estructurales que se han observado en la secuencia estratigráfica, se pueden agrupar a estas unidades en relación al estilo tectónico dominante en las mismas.

Las unidades integrantes del "basamento" fueron afectadas inicialmente por esfuerzos compresivos que originaron fallas inversas de alto ángulo en las secuencias piroclásticas sedimentarias suprayacentes con rumbo general norte-sur.

Este rasgo compresivo (Falla Butalón, Falla Neuquén, Falla Molulco) que es una característica dominante en los terrenos más antiguos, se extiende hasta las unidades del Mioceno superior. Estos tipos de fracturas son los que aparecen en los primeros estadios de la deformación por cupla (Coira et al., 1975) con un mayor desarrollo relativo.

En el conjunto de las unidades del Terciario-Cuaternario predomina un comportamiento estructural diferente. Presentan grandes fracturas con direcciones noroeste y este-oeste, en donde prevalecen los planos de dislocación y los planos de tensión que han regulado y condicionado en gran medida la implantación de los centros efusivos cenozoicos, a los que debe agregarse ciertos cambios de dirección en los esfuerzos tangenciales por ajustes locales.

#### *Conclusiones*

Del conjunto de las mediciones y observaciones realizadas en la zona se puede establecer que:

- El rasgo estructural dominante es el alto estructural de la Cordillera del Viento (Bracaccini, 1970) que ha condicionado en gran medida el cuadro de los esfuerzos locales.
- Se lo interpreta como definido por estructuras compresivas de rumbo general norte-sur, desarrolladas en los primeros estadios de la formación por cupla.
- Desde el Mioceno los sistemas de fracturas noroeste tuvieron un dispar comportamiento a ambos lados de la Cordillera del Viento, mientras en el sector occidental se comportan como fallas de dislocación tangencial, segmentando y desplazando a las estructuras compresivas, en el sector oriental lo hicieron como zonas de alivio tensional.
- La fase Quechua marca el inicio de un nuevo período de actividad volcánica que se desarrolla desde el Plioceno inferior hasta la actualidad. Se reactivan las fracturas de dislocación tangencial (N 45°O) en el sector occidental, las fracturas tensionales de dirección noroeste (N 45°O a N 50°) en el sector oriental y las fracturas tensionales este-oeste (N 85°E) en el centro del norte de la región, dando origen al comienzo del vulcanismo shoshonítico y a la implantación de cuerpos monogénicos basálticos, de origen profundo.
- En la región del Cerro Domo (centro norte del área) ha prevalecido el sistema este-oeste (N 80° a 85°E) componente tensional de los esfuerzos.

Los sistemas N 25° a 35°E y n 60° a 70°O (N 30°O y NS sistemas conjugados) se comportan como planos de dislocación secundarios y son resultantes de las variaciones de empujes locales que se han manifestado en este sector. Estas estructuras que habían comenzado a manifestar, por lo menos desde el Plioceno, con un movimiento dextrógiro, han cortado a los planos de alivio tensional que dieron lugar al vulcanismo en el sector. Esta combinación de estructuras es la que controla actualmente las manifestaciones termales.

En el flanco NE del Cerro Domo y al del Cerro Domuyo, existen numerosas evidencias de estructuras tensionales de rumbo noroeste, que se continúan hacia el sector oriental. Este cruce de estructuras tensionales profundas, sistemas E-O (N 80° a 85°E) y NE (N 45° a 50°E), evidenciado por el emplazamiento de un vulcanismo shoshonítico y los cuerpos monogénicos de basaltos primarios de origen profundo, habrían establecido las condiciones favorables que permitieron el ascenso a niveles muy superficiales de la cámara magmática que engendró la implantación de los diferenciados ácidos del Cerro Domo. Actualmente constituyen la fuente de calor generadora del fluido geotermal.

Debe destacar-se que el alto grado de fracturación que presenta el área del Cerro Domo incrementa

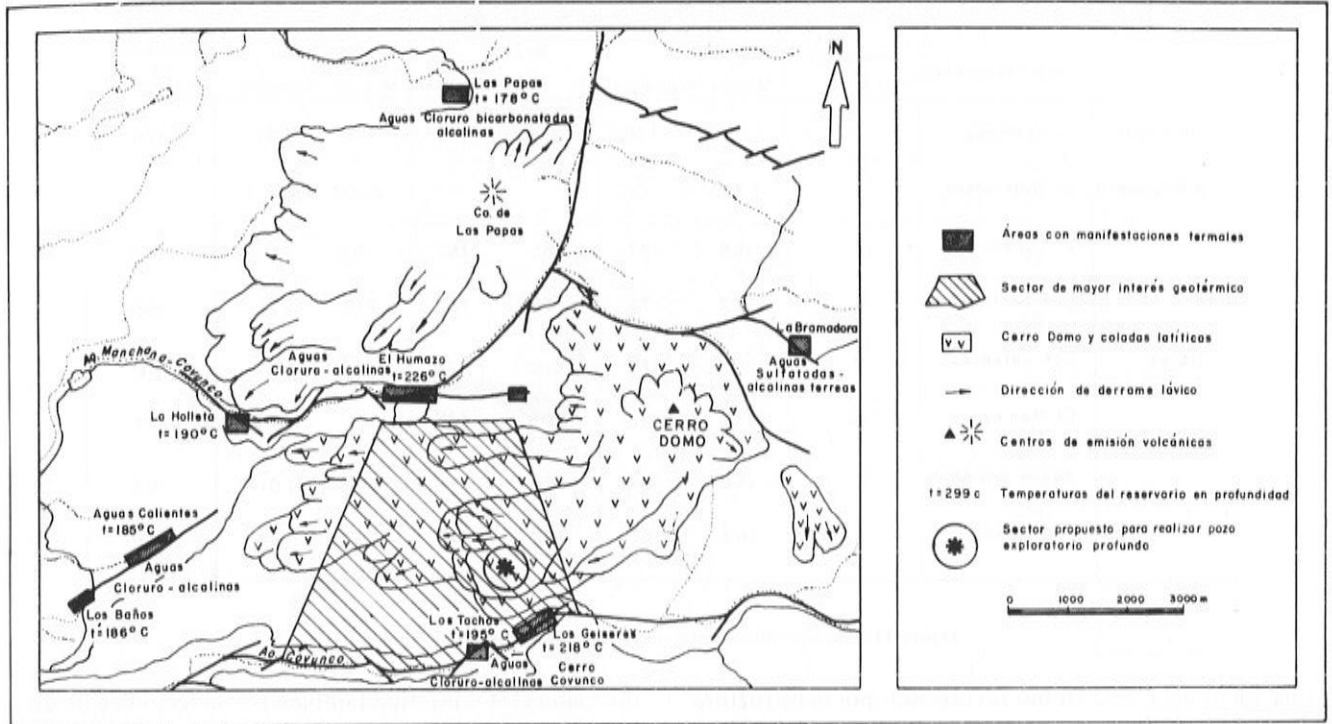


Figura 10 — Mapa de distribución de las manifestaciones termales en relación al Cerro Domo.

el grado de permeabilidad, facilitando la circulación de los fluidos, permitiendo inferir por ello la existencia de un reservorio apropiado.

## ESTUDIO GEOQUÍMICO

### Objetivos

- Caracterizar y clasificar los distintos tipos de aguas termales definiendo sus características y relaciones entre ellas.
- Establecer las temperaturas de origen de los fluidos termales.
- Reconstruir el esquema de circulación hídrica subterránea del sistema termal.

### Síntesis Geoquímica

El estudio de las diferentes vertientes de las aguas termales ha puesto también en evidencia una interesante perspectiva en relación a las posibilidades geotérmicas del sector sur-oeste del Cerro Domo. Los estudios geoquímicos se realizaron sobre la base de cuarenta y cuatro muestras extraídas de cada una de las vertientes que existen en diferentes sectores del área.

Ellas están localizadas en: Los Geiseres, Los Tachos, El Humazo, La Olleta, Aguas Calientes, Los Baños, Las Papas y La Bramadora. Su distribución está representada en la Fig. 10.

La clasificación de las aguas termales ha permitido reconocer tres tipos químicos, que se corresponden con

sectores cuyas características estratigráficas, vulcanológicas y estructurales son diferentes; ellos son:

- Aguas cloruro bicarbonatadas-alcalinas.
- Aguas sulfatadas-alcalino térreas.
- Aguas cloruradas-alcalinas.

Las aguas cloruro bicarbonatadas-alcalinas se encuentran en el sector de Las Papas, al noroeste del Cerro Domo. El conjunto de los manantiales de agua caliente que llevan el nombre de ese sector, probablemente se correspondan a dos tipos químicos. Este fenómeno de mezcla es factible que se desarrolle, dado que esa región se encuentra algo distante de la fuente de calor donde se generan y ascienden los fluidos de origen profundo compuestos de aguas termales, gases y vapor. A su vez en este sector no existirá una cubierta impermeable importante, siendo las manifestaciones de tipo -aguas dominantes- sin la existencia de vapor.

Las aguas sulfatadas-alcalino térreas, se encuentran localizadas al noroeste del Cerro Domo, en la zona de la emanación fumarólica de La Bramadora. Esta importante manifestación, de vapor dominante con emanación de gas de origen volcánico, estaría condicionado a los numerosos manantiales. Las vertientes están localizadas a lo largo de una zona de falla de rumbo N 45°O, que ha puesto en contacto a las rocas del "basamento" con andesitas de probable edad Mioceno superior. Jurio (1978) ha interpretado que estas aguas se originaron por la concentración de cloruros, en atención a la baja volatilidad y solubilidad de los cloruros metálicos en vapores a moderadas presiones y temperaturas.

Las aguas cloruradas-alcalinas corresponden a la región comprendida entre A°Manchana-Covunco y el A°Covunco, donde se emplazaron los derrames lávicos

| Sector       | Manifestaciones | Números de Vertientes | Geotermómetros (°C) |          |        |          |         |          | Promedio de Mínimas |
|--------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------|--------|----------|---------|----------|---------------------|
|              |                 |                       | Na/K                |          | Na/Li  |          | Na-K-Ca |          |                     |
|              |                 |                       | Mínima              | Promedio | Mínima | Promedio | Mínima  | Promedio |                     |
| Las Papas    | Las Papas       | 3                     | 131                 | 138      | 173    | 187      | 196     | 209      | 178                 |
| La Bramadora | La Bramadora    | 4                     | 235*                | -        | -      | -        | 200*    | 270*     | -                   |
| Cerro Domo   | La Olleta       | 11                    | 168                 | 172      | 185    | 191      | 188     | 207      | 190                 |
|              | Los Tachos      | 4                     | 167                 | 178      | 178    | 186      | 216     | 221      | 195                 |
|              | Los Géiseres    | 2                     | 165                 | 179      | 218    | 226      | 230     | 249      | 218                 |
|              | El Humazo       | 8                     | 175                 | 182      | 209    | 228      | 251     | 268      | 226                 |
|              | Aguas Calientes | 9                     | 156                 | 164      | 184    | 193      | 193     | 201      | 186                 |
|              | Los Baños       | 1                     | 162                 | 162      | 192    | 192      | 204     | 204      | 186                 |

Figura 11 — Temperaturas estimadas por geotermometría química

liparíticos del Cerro Domo favorecidos por la estructura de graben originado por las fallas de alivio tensional este-oeste. En este sector se encuentran las manifestaciones termalés de Los Géiseres, Los Tachos, El Humazo, La Olleta, Aguas Calientes y Los Baños. Su carácter químico y sus temperaturas señalan la relativa existencia de un fenómeno de mezcla que se incrementa en sentido OSO confirmando la presencia de una cobertura impermeable, representada seguramente por las "Piroclastitas Ácidas", cuyos bancos fuertemente alterados a materiales arcillosos y en parte silicificados, sellan el sistema.

Los estudios geotermométricos han confirmado la existencia de elevadas temperaturas que corroboran la presencia de una cámara magmática ubicada en profundidad debajo del Cerro Domo, indican también la presencia de una roca impermeable que permite la acumulación de un fluido de alta entalpía dentro del reservorio. En los análisis geotermométricos, se ha evaluado el tenor de los diferentes cationes disueltos en el agua, el que está en función de las temperaturas del reservorio. Utilizando los geotermómetros de Na-K-Ca, Na-K y Na-Li, se han obtenido temperaturas de cada una de las diferentes vertientes (Fig. 11).

Como era previsible, en el sector del Cerro Domo las máximas temperaturas se obtuvieron en las manifestaciones de Los Géiseres (218°C), El Humazo (226°C) y Los Tachos (195°C), Fig. 10. Lugares por donde emergen los fluidos que se encuentran más próximos de la fuente de calor. Estos ascienden através de los sistemas de fracturas y se emplazan por debajo de las "Piroclastitas Ácidas" conformando un reservorio poco profundo de tipo mezcla agua-vapor. Los geotermómetros calculados en las manifestaciones más distantes de la anomalía térmica indican un gradual descenso en las temperaturas del reservorio, La Olleta (190°C), Aguas Calientes (186°C) y Los Baños (186°C). Tales cálculos apoyan la idea del sentido de circulación hídrica subterránea de

dirección OSO, inferida también por la tectónica de dislocación (N 35°E), tensional (N 85°E) y el emplazamiento de la fuente de calor. Estas temperaturas, también señalan una mayor participación de fluidos profundos y una mayor intervención de agua de los acuíferos superficiales, pasando gradualmente el sistema de mezcla agua-vapor a agua dominante.

En el esquema de circulación subterránea de la Fig. 12 se ha marcado el límite de la principal área de recarga que comprende a todo el flanco SO del Cerro Domuyo, en las cabeceras de los Arroyos Manchana-Covunco y Covunco.

El agua proviene del deshielo de la nieve que se acumula en invierno.

Donde afloran las rocas del "basamento" las aguas se infiltran lenta y profundamente, aumentando su temperatura por efectos de fuente de calor. Con posterioridad ascienden y se mezclan en distintas proporciones con los acuíferos de los niveles superiores alimentando el reservorio poco profundo del sudoeste del Cerro Domo.

El ascenso de los fluidos profundos y las mezclas con las aguas de acuíferos superficiales que tienen un sentido de general circulación OSO originan distintos tipos de sistemas que están en función a la distancia de la fuente de calor. En la zona de La Bramadora es de vapor dominante (fumarola) mientras que en el sector de mayor interés geotérmico (delimitado en la Fig. 10) es una mezcla agua-vapor que gradualmente pasa a agua dominante hacia el OSO. Los depósitos son de tipo planar favorecidos por los estratos impermeables de las "Piroclastitas Ácidas" que actúan como "sello" originando la acumulación de fluidos con temperaturas de entre 226°C y 195°C en el reservorio.

En la Fig. 13, se muestra la existencia (al SO del Cerro Domo) de un reservorio alojado en las rocas del "basamento" que presentan un elevado fracturamiento, lo que permite el ascenso de los fluidos profundos y

## Conclusiones

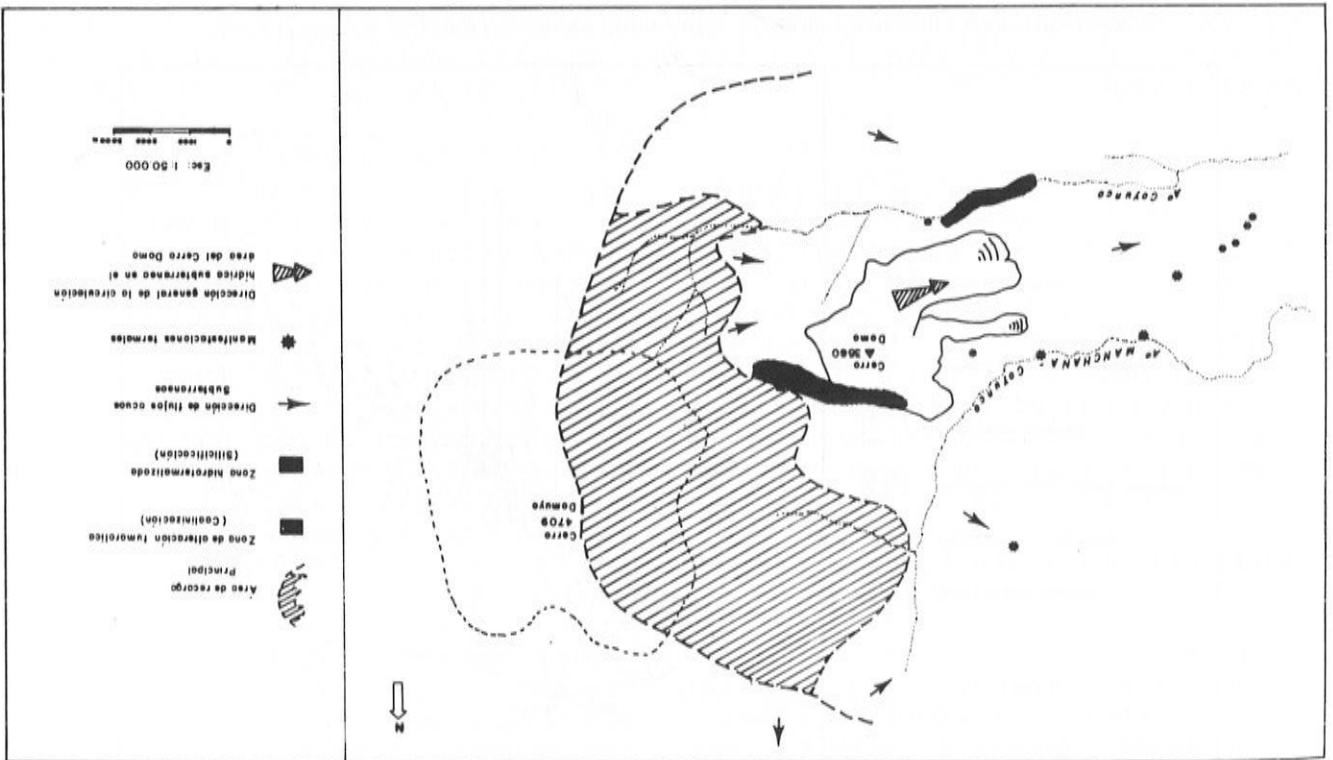
a) Se reconocieron tres tipos químicos de aguas, que se corresponden con sectores cuyas características geo-vulcanológicas y estructurales son diferentes; ellos son: -Aguas cloruro bicarbonatadas-alcalinas, en el sector de Las Papas, que probablemente se correspondan a dos tipos químicos, dado que en esa región se encuentra distante la fuente de calor y los flujos de origen profundo compuestos por aguas termales, gas-

Sobre la base de lo expresado se ha delimitado en el sector SO del Cerro Domo (Fig. 10), el área que presenta el mayor interés geotérmico por lo que deberían continuarse los estudios de detalle para reconocer las características del reservorio a niveles más profundos.

La fuente de calor situada a niveles entre 2 y 3 km de profundidad debajo del Cerro Domo produce una fuerte concentración de flujos térmicos. La combinación de las estructuras tensionales profundas y los planos de dislocación secundarios que afectaron a las rocas del cuartario, ha originado las vías de escape de los fluidos termales, que ascienden a través de los planos de falla.

La circulación de las aguas subterráneas. La existencia de una cubierta impermeable aísla el sistema. Las aguas que se infiltran en la zona de las nacientes de los arroyos Manchana-Covunco y Covunco, se guían como se ha señalado, un sentido de circulación general OSO.

Figura 12 — Esquema de circulación hidrica subterranca.



b) Se estableció la existencia de elevadas temperaturas en profundidad que oscilan entre 226°C y 195°C, que indican también la presencia de una roca impermeable que permite la acumulación de un sistema que gradualmente va pasando de vapor dominante en la zona de La Bramadora a mezcla agua-vapor en la zona de Los Geiseres, Los Tachos y El Humazo, y a agua dominante en la zona de Los Baños y Aguas Calientes.

c) Se delineó un esquema de circulación hidrica subterranca en donde se destaca la existencia de un reservorio en rocas con un alto grado de fracturamiento que permite el ascenso de los fluidos magmáticos a niveles poco profundos y que favorece la circulación de las aguas por debajo de los bancos de piroclásticas que actúan como cubierta impermeable. Las vías de escape de los fluidos se realiza a través de los planos de falla.

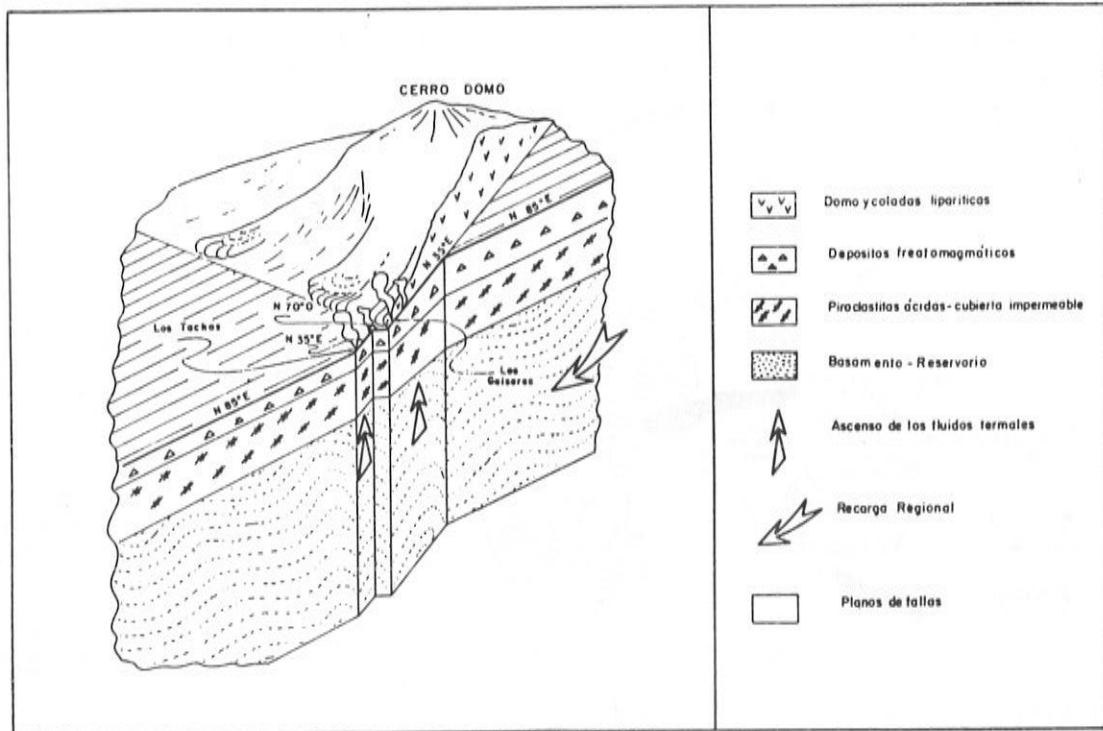


Figura 13 —Bloque-diagrama esquemático de circulación del sistema termal en el sector Cerro Domo

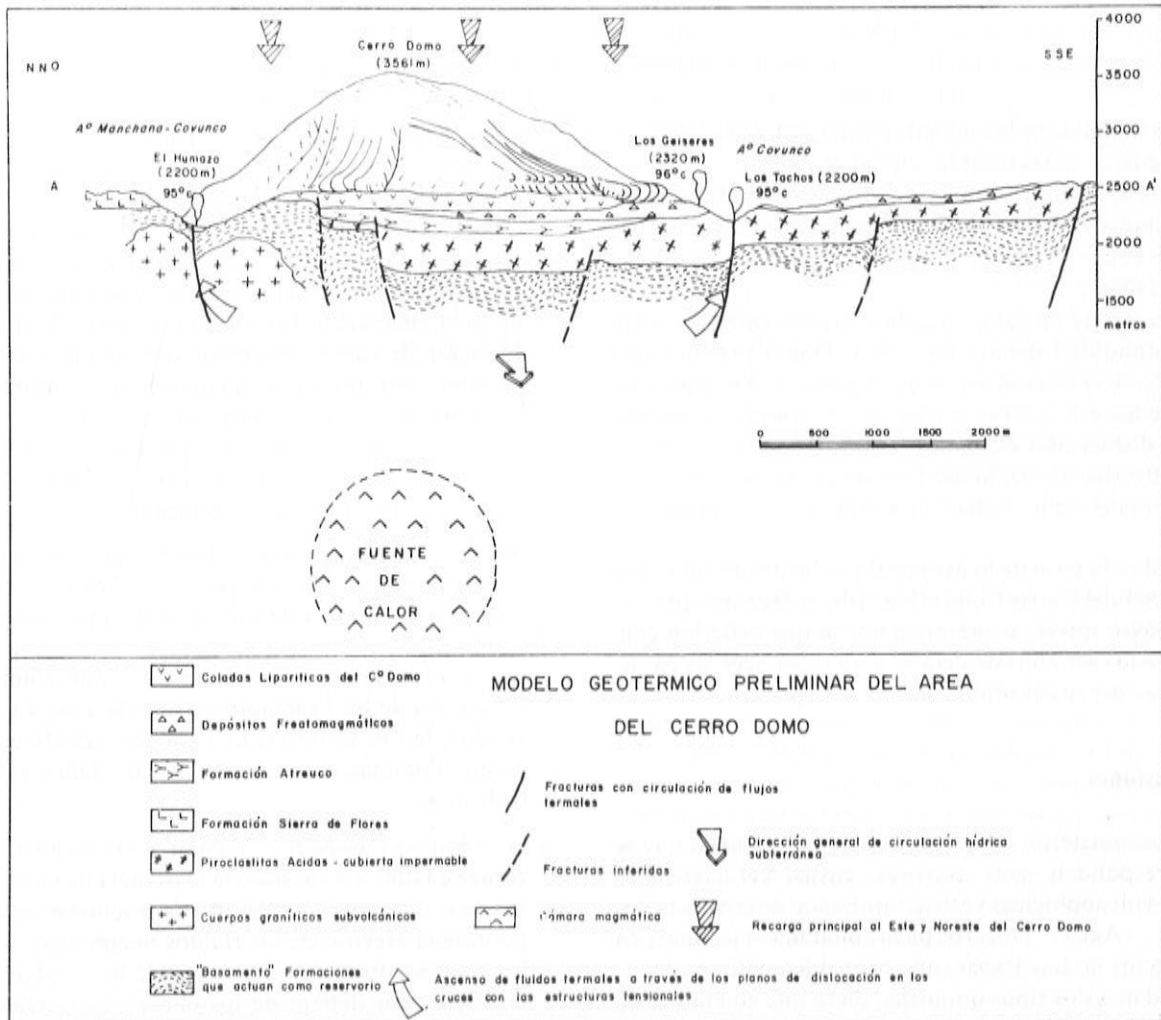


Figura 14 —Modelo Geotérmico preliminar del área del Cerro Domo.

de falla que han dislocado a la cubierta cuartaria, constituyendo el conjunto un sistema que ofrece marcadas posibilidades geotérmicas por la presencia de un reservorio con un sistema de fluidos de elevada temperatura.

## MODELO GEOTÉRMICO PRELIMINAR

Sobre la base de las anteriores conclusiones se ha establecido un modelo geotérmico preliminar del área del Cerro Domo, que presenta un interés geotérmico primario (Fig. 14). El alto potencial geotérmico abriría futuras posibilidades de explotación.

Las sucesivas fases de estudios tendrán como objetivo el de precisar y definir el modelo propuesto.

Elementos tales como fuente de calor, reservorio, cobertura y circulación de los fluidos termales que caracterizan dicho modelo fueron ampliamente descriptas en los párrafos precedentes. No obstante se sintetizan a continuación:

### a) Fuente de calor

Se considera factible que la anomalía térmica existente en el Cerro Domo está relacionada con la presencia de una posible cámara magmática. La existencia en superficie de una gran cantidad de productos evolucionados, indican la importante magnitud del magma que se implantó y se diferenció en niveles superiores de la corteza terrestre. El magma se instaló inicialmente a 6 km de la superficie de la corteza antes de 1,45 Ma con temperaturas del orden de 890°C, dando lugar a las coladas de la Formación Atrreuco de composición banakítica y latítica. Con posterioridad (0,72 Ma) el magma habría sufrido un proceso de ascenso almacenándose a niveles muy superficiales (entre 2 y 3 km), favorecido por el cruce de estructuras tensionales profundas (sistemas noroeste y este-oeste), como lo prueba la existencia de una actividad explosiva freatomagmática.

Finalmente tuvo lugar la implantación de los cuerpos dómicos ( $0,55 \pm 0,10$ ;  $0,29 \pm 0,07$ ;  $0,11 \pm 0,02$  Ma) con productos muy diferenciados (liparitas) que originaron, entre otros, el Cerro Domo. La cámara magmática residual continuó irradiando calor, constituyendo hasta el presente la fuente de calor de los fluidos geotermales.

### b) Reservorio Geotérmico

En la área del Cerro Domo, el sistema compresivo ha generado en su etapa evolutiva un área de alivio tensional de dirección general este-oeste, que junto a fallas de desplazamiento de rumbo han dislocado la parte norte de la Cordillera del Viento. Estos esfuerzos dieron origen a una estructura de graben en la que las unidades del "basamento" se encontrarían a escasa profundidad. Sobre ellas se asentó el vulcanismo Terciario Cuartario. La falla "Manchana-Covunco" en el extremo norte y la falla "Covunco" en el sur delimitarían el sector más profundo del graben donde se encauzarían los fluidos.

El alto grado de fracturación que presentan las unidades del basamento, incrementado por la reactivación de las estructuras tensionales y de dislocación, favorecería la circulación de los fluidos permitiendo inferir la presencia de un reservorio apropiado.

### c) Cubierta

Sobre las rocas del "basamento" que constituye el reservorio, en el graben existente al sur-oeste del Cerro Domo, se apoya una espesa secuencia de piroclastitas integrada por diferentes niveles de flujo pumíceo, con reducidas intercalaciones de piroclastitas redepositadas.

Esta unidad presenta en su conjunto un elevado grado de alteración a materiales arcillosos, característica que señala su condición de formación impermeable, que permite la acumulación de vapor o de agua sobrecalentada dentro del reservorio.

El espesor de este sector se estima que podría ser de aproximadamente entre 450 a 500 m, valor que tendría que precisarse mediante estudios geofísicos y perforaciones preliminares.

A lo largo de la falla "Covunco", entre las manifestaciones termales de Los Géiseres y Los Tachos (sector sur del área de "mayor interés geotérmico"), se encuentra una zona de alteraciones hidrotermales (con silicificación) que si se prolongara hacia niveles inferiores podría actuar como barrera de circulación hídrica lateral, circunscribiendo el sistema geotermal y favoreciendo la concentración de los fluidos a elevadas temperaturas.

### d) Circulación de fluidos termales

La estructura de graben existente en el centro norte de la región fue modificada en parte por la intrusión del cuerpo subvolcánico que constituye el Cerro Domuyo. El emplazamiento forzado de éste ha originado en el extremo este del graben, una región elevada, permitiendo aflorar a las rocas del "basamento".

De este modo el reservorio tendría su área de recarga en las nacientes de los arroyos Manchana-Covunco y Covunco (flanco SO del Cerro Domuyo) donde las aguas se infiltran con un descenso lento y profundo y son luego calentadas por la fuente de calor. Con posterioridad estas aguas ascienden mezclándose en distintas proporciones con acuíferos de niveles superiores y alimentando el reservorio en sentido general de circulación OSO. En la zona de la anomalía térmica los fluidos confinados a elevadas temperaturas saldrían a la superficie a través de las vías de escape que originaron los planos de dislocación horizontal al cortar y desplazar las estructuras tensionales profundas, en la cubierta impermeable.

## RECOMENDACIONES Y OBJETIVOS PARA LA FASE SIGUIENTE

El conjunto de los estudios realizados ha permitido evaluar en forma integral las características de la zona y

establecer un modelo geotérmico preliminar (Fig. 14) que, como se ha señalado deberá ser precisado mediante el desarrollo de la segunda fase de exploración (geofísica y perforaciones) del estudio de prefactibilidad, y que deberá estar preferentemente concentrada en el sector delimitado del Cerro Domo, que se considera de mayor interés geotérmico (Fig. 10), por cuanto se estima que ofrecerá la mayor posibilidad de la extracción de fluido de alta entalpía.

Los objetivos a tener en cuenta mediante la prospección geofísica deberán definir el modelo antes delimitado y, a su vez, tender a esclarecer los siguientes aspectos:

I. El control de las estructuras en profundidad en las que se deberá:

- a) Delimitar en su extensión (ancho y largo) la estructura de graben formada por las fallas tensionales este-oeste. Al respecto se deberá precisar su límite norte, ya que su límite sur estaría dado por la falla Covunco (en donde se desarrolla la zona de silicificación). Con relación a su longitud, se deberá precisar su extensión hacia el oeste, ya que su límite este está definido: lo constituye el umbral que debería existir en profundidad por efecto de la falla compresiva Butalón (Fig. 8). Estos esfuerzos compresivos, que han actuado sobre las rocas del basamento, han originado una elevación del bloque este, que define el límite oriental del reservorio. Este rasgo no se observa en superficie debido a que la estructura, en este sector, está enmascarada por el vulcanismo cuartario.
- b) Constatar y precisar la disposición geotérmica de los sistemas de cizalla compresivo que actúan como fallas de desplazamiento de rumbo, (cuyas direcciones generales son N 35°E y N 70°O, con sus sistemas conjugados de N 30°O y NS, respectivamente) que serían unas de las principales vías de circulación de los fluidos termales.

II. Determinar las características geométricas, espesores y profundidad de las unidades que actúan de cubierta impermeable y de reservorio. Los estudios geofísicos deberán precisar el espesor total de las piroclastitas ácidas en el área que se delimitó como de mayor interés geotérmico y a su vez verificar su condición de roca tapón. Se estima que en este lugar las piroclastitas tendrían un espesor de 450 a 500 m. A su vez se debe considerar que sobre esta unidad se

encontrará a la Formación Atreuco con espesores que se calculan entre 50 y 60 m. Los depósitos freatomagmáticos, cuya potencia oscilaría entre 50 y 80 m y a las coladas liparíticas del Cerro Domo, que presentan un espesor máximo (en la planicie desarrollada sobre las coladas recientes, sector marcado por un círculo, Fig. 10) de aproximadamente 100 m.

De lo expresado, surge que el techo del reservorio se encontraría entre los 650 y 740 m.

En síntesis, los objetivos principales de la prospección geofísica se pueden expresar de la siguiente manera:

- a) Individualizar las fallas regionales que afectan el basamento.
- b) Situar la unidad o unidades en profundidad de cubierta impermeable.
- c) Reconstrucción estructural del basamento, cuya profundidad puede estar entre los 650 y 740 m y de su estructura interna.
- d) Individualizar en profundidad las zonas hidrotermales y analizar el comportamiento en profundidad del área silicificada ubicada a lo largo de la falla Covunco, en la zona de Los Géiseres y Los Tachos.
- e) Estudio de las características químicas e hidrotermales de los fluidos del subsuelo, en especial los fluidos profundos que ascienden por zonas de fracturas.

El programa de exploración geofísica a desarrollar, en el lugar de mayores alternativas debe contemplar los siguientes estudios:

1. Relevamiento de baja resistividad en profundidad por medio de sondeos eléctricos verticales.
2. Relevamiento de sísmica de reflexión, para el estudio en detalle de la estructura del basamento y de los sistemas de fracturas de las rocas cenozoicas.
3. Registro geofísico y análisis de testigo mediante la perforación de 20 pozos de gradientes termales de 100 m de profundidad para el estudio de flujos calóricos subterráneos y la realización de otro pozo de exploración a 400 m con extracción de testigo para su estudio petrográfico.

Se interpreta que el mencionado programa debería desarrollarse dentro del área que fue delimitada como de mayor interés geotérmico (Fig. 10), colocando la ejecución de alguno de los pozos en los límites externos, especialmente el occidental, en función de los gradientes termales que se obtengan. A su vez, el pozo que alcanzaría los 400 m se debería ubicar en la planicie desarrollada sobre las coladas recientes en el sector marcado con un círculo en la (Fig. 10).

## REFERENCIAS

- BRACACCINI, I.O., 1970. Rasgos tectónicos de las acumulaciones mesozoicas en las provincias de Mendoza y Neuquén, República Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Arg. Bs. As.* 25(2):275-282.
- BROUSSE, R. & PESCE, A.H., 1982. Cerro Domo. Un volcán Cuartario con posibilidades geotérmicas. Provincia del Neuquén, Argentina. 5º Cong. Latin. Geol. IV. 197-208.
- BUDDINGTON, A.F. & LINDSLEY, D.M., 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journ. Petrol.* 5:310-357.
- COIRA, B.L.; NULLO, F.; PROSERPIO, C. & RAMOS, V., 1975. Tectónica de basamento de la región occidental del Macizo Nordpatagónico. Provincia de Río Negro y Chubut, República Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Arg. Bs. As.* 30(30):361-383.
- GROEBER, P., 1929. Líneas fundamentales de la Geología del Neuquén, sur de Mendoza y regiones adyacentes. *Dir. Minas. Geol. e Hidrol. Bs. As. Public.* 58.



- GROEBER, P., 1951. La alta Cordillera entre las latitudes 34° y 29°30' Mus. Arg. Cien. Nat. "Bernardino Rivadavia". Rev. Cien. Geol. Bs. As. 1(5):235-352.
- JURIO, R.L., 1978. Algunos aspectos geotérmicos de las manifestaciones hidrotermales del Cerro Domuyo. Provincia del Neuquén. Argentina. Rev. Minería 179:45-52.
- KUDO, A.M. & WEILL, D.F., 1970. An igneous plagioclase Thermometer, Contr. Min. Petrol. 25:52-65.
- LLAMBIAS, E.J.; DANDERFER, J.C.; PALACIOS, M. & BROGIONI, N., 1979. Las rocas ígneas cenozoicas del Volcán Domuyo y áreas adyacentes. Séptimo Cong. Geol. Arg. 11:569-584. Neuquén.
- PECCERILLO, A. & TAYLOR, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene-Calc-alkaline rocks from Kastamosu Area. northern Turkey, Cont. Min. and Petrol. 68:63-81.
- PESCE, A.H., 1981. Estratigrafía de las nacientes del río Neuquén y Nahuever, Provincia del Neuquén. VIII Cong. Geol. Arg. 111:439-445.
- PESCE, A.H. & BROUSSE, R., 1984. Características de la asociación magmática Shoshonítica: su evolución a términos ácidos. Provincia del Neuquén. 9° Cong. Geol. Arg. Bariloche. Acta II: 600-613.
- ROSS, C.S. & SMITH, R.L., 1961. Ash flow tuffs: their origin geologic relations and identification. U.S. Geol. Survey, Prof. Pap. 366-81.
- SCHILLER, W., 1912. La alta Cordillera de San Juan y Mendoza y parte de la provincia de San Juan, An. Min. Agr. Nac., Secc. Geol. Miner. y Min. Bs. As. 7(5).