



GEOLOGÍA

# Potencialidad del recurso geotérmico en la Argentina

Eduardo Jorge Llambías

Nuestro planeta, la Tierra, aún conserva parte de su calor primigenio, acumulado durante su creación, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años. Encerrado en las capas más altas de la corteza, calienta el agua subterránea de la cual se puede extraer energía de forma no contaminante.

La Tierra todavía no ha alcanzado el equilibrio térmico. Por eso, el calor tiende a escapar hacia la atmósfera y luego hacia el espacio. En el interior del núcleo es donde se encuentran las mayores temperaturas, de alrededor de 6.000 °C. En el contacto núcleo-manto la temperatura es de unos 4.000 °C y disminuye gradualmente hasta la superficie (figura 2).

Estas altas temperaturas implican que una gran parte del interior de la Tierra se comporta como un fluido de elevada viscosidad, por lo cual se desarrollan corrientes convectivas. Solamente el interior del núcleo y la capa más externa de la Tierra sólida, denominada litósfera, se comportan como cuerpos rígidos. El resto fluye muy lentamente y permite el ascenso de masas de rocas de menor densidad y mayor temperatura desde la base del manto hasta chocar con la litósfera. Estas masas, como se ve en la figura 2, se llaman “plumas térmicas”, y están compuestas por rocas parcialmente fundidas que al toparse con la litósfera se derraman por debajo de ella, creando tensiones que las fragmentan y las arrastran como balsas.

La litósfera es la capa que dificulta la salida del calor a la atmósfera. La energía

## Pluma térmica

Las plumas térmicas funcionan como cintas transportadoras que llevan hacia arriba rocas con menor densidad y mayor temperatura que las del ambiente que las rodea. Estas plumas atraviesan el manto, desde su límite con el núcleo hasta la base de la litósfera. Muchas islas volcánicas, como las del archipiélago de Hawái, tienen su origen en el impacto de una pluma térmica con la litósfera (véase figura 2).



calórica, en su esfuerzo por escapar hacia el espacio, fractura la litósfera, formando placas que se desplazan unos pocos centímetros por año y chocan entre sí, generando las montañas. Por este motivo, a las placas se las denomina comúnmente placas tectónicas, por la intensa deformación que ocurre en sus bordes. El calor se escapa con preferencia a través de los

1 - Fuente termal El Humazo, en el volcán Domuyo, provincia de Neuquén. Fotografía tomada por el autor en 1975.

contactos entre placas, ya sea en aquellas zonas donde las placas se apartan como en las que las placas chocan. La actividad volcánica, presente en ambos casos, es el mecanismo más eficiente del escape de calor, ya que los grandes volúmenes de

## Corrientes convectivas

En el seno de un líquido en reposo comúnmente se producen movimientos internos denominados corrientes convectivas. Esto se debe a que el líquido no es térmicamente homogéneo, por lo cual éste se desplaza desde las zonas más calientes, o menos densas, hacia las zonas más frías. Un ejemplo se puede observar cuando se calienta agua en un recipiente. El agua de la base del recipiente asciende hacia la superficie mientras que ésta por ser más fría, y por lo tanto más densa, desciende. También, las corrientes convectivas se originan debido a diferencias en la composición del líquido. Un ejemplo ocurre cuando el magma contiene agua disuelta y debido a que el volumen específico de ésta es muy alto respecto al magma, tiende a ascender buscando las zonas de menor presión, por lo cual las porciones del magma más ricas en agua disuelta se acumulan en la parte superior de la cámara magmática.

magma que salen a la superficie también transportan gran cantidad de calor, el cual se disipa en la atmósfera.

Si la litósfera fuera de cobre, la Tierra ya se habría equilibrado térmicamente, y no existiría la tectónica de placas. Pero en el interior de las placas tectónicas, el calor se escapa lentamente por conducción. La placa, que se calienta desde abajo, es mala conductora del calor: el coeficiente de conductividad térmica es muy pequeño, casi unas cuatrocientas veces menor que el del cobre. La variación del calor en relación con la profundidad en la litósfera se denomina gradiente geotérmico, y su valor promedio es de 30 °C/km, o sea que la temperatura aumenta 1 °C cada 33 metros de profundidad.

## Qué es la Geotermia

Geotermia es la ciencia que estudia la evolución del calor en la parte más superficial de la litósfera, esto es, en la parte alta de la corteza superior. Uno de los objetivos más importantes de esta ciencia es la transformación del calor en energía eléctrica, por lo cual recibe la denominación de *energía geotérmica*. Puesto que este recurso debe ser económico, la exploración geotérmica debe realizarse a profundidades que no superen en promedio los 5 km, porque a partir de esta profundidad los costos operativos resultan muy elevados. El recurso favorable para la transformación del calor en energía eléctrica es el agua, debido a la facilidad de su transporte y a la propiedad de transformarse en vapor por encima de los 100°C. Por esto, la exploración geotérmica tiende a detectar en el subsuelo cuerpos de agua caliente, que luego extraerá para darles un uso adecuado.

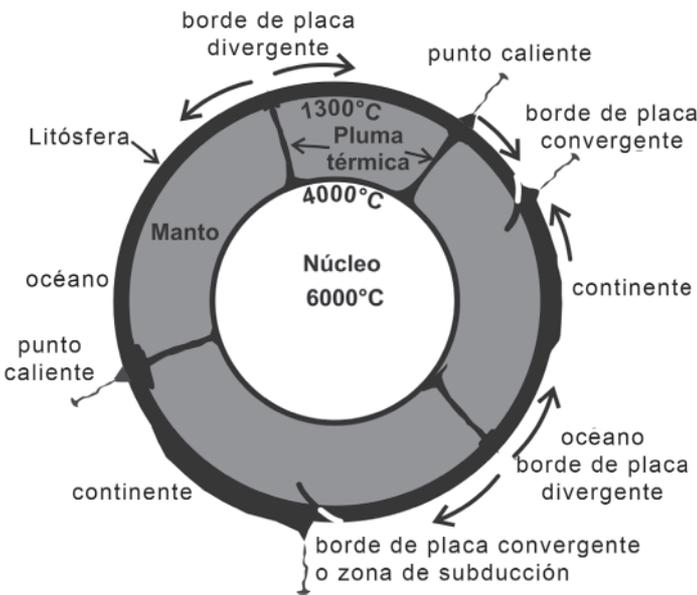
En la clasificación de los yacimientos geotérmicos es importante tener en cuenta la temperatura del agua, cuya variación expresa la energía calórica disponible en el sistema. Esta energía interna al cuerpo puede medirse cuando se intercambia de un sistema a otro, y recibe el nombre de *entalpía*. De acuerdo con la temperatura del agua confinada en profundidad se pueden tener dos tipos de yacimientos geotérmicos:

- 1) yacimientos geotérmicos de baja entalpía, con temperaturas normalmente inferiores a 90 °C y
- 2) yacimientos geotérmicos de alta entalpía, con temperaturas por encima de 120 °C.

Estos últimos son los que pueden producir energía eléctrica con costos competitivos, ya que el costo de la transformación de agua en vapor lo hace la naturaleza.

## Yacimientos geotérmicos de baja entalpía

Los yacimientos geotérmicos de baja entalpía en general obtienen su calor por el gradiente geotérmico. Por esto, vulgarmente también se los denomina yacimientos geotérmicos de gradiente. En su



2 - Estructura interna de la Tierra, donde se muestra el núcleo, el manto y la litósfera, la cual está dividida en placas que se desplazan pocos centímetros por año. El lugar donde las placas se separan se llama borde divergente de placas, generalmente situado en el medio de los océanos, y donde chocan, borde convergente de placas. En estos últimos se origina la subducción, lo cual significa que una de las placas se desliza por debajo de la otra, y es aquí donde se originan las grandes cordilleras y la actividad sísmica y volcánica. Las plumas térmicas son masas de rocas de menor densidad y mayor temperatura que ascienden desde el límite manto-núcleo hasta chocar con la litósfera. Cuando estas plumas intersectan la litósfera oceánica se genera un punto caliente, sobre el cual se desarrollan los volcanes oceánicos, como por ejemplo los grandes volcanes del archipiélago de Hawái.



3 . Mapa de la República Argentina que muestra la distribución de los volcanes más jóvenes de la Argentina, Cuaternario Tardío y de los recursos geotérmicos de baja y alta entalpía. Campos termales de baja entalpía: 1 Río Valdez; 2 Bahía Blanca-Pedro Luro; 3 El Ramal; 4 Acuífero Guaraní, cuya extensión se muestra en gris. Campos termales de alta entalpía: 5 Copahue; 6 Domuyo; 7 Volcán Tuzgle; 8 Valle del Cura.

mayoría, no están en relación con campos volcánicos, y en los casos en que sí lo están, los campos volcánicos se encuentran en vías de extinción o los yacimientos están alejados de un campo volcánico activo.

Las aguas termales de gradiente provienen de acuíferos profundos, donde adquieren temperaturas moderadamente elevadas. A veces llegan en forma natural a la superficie como manantiales de aguas calientes. En estos casos el agua asciende rápidamente hasta la superficie a través de fracturas que interceptan el acuífero, sin llegar a enfriarse. El aprovechamiento industrial de este agua caliente se realiza por perforaciones que alumbran el acuífero profundo.

La utilidad en los yacimientos de baja entalpía consiste en calefacción urbana, calefacción de viveros y otros usos agrícolas. También se utilizan como aguas termales para piscinas y balnearios termales.

En la Argentina los campos geotérmicos de baja entalpía más importantes son Río Valdez en Tierra del Fuego, Bahía Blanca-Pedro Luro en la provincia de Buenos Aires, El Ramal en la provincia de Jujuy, y el acuífero Guaraní, que abarca varias provincias de la Mesopotamia Argentina y se extiende a Brasil y Uruguay (figura 3).

El campo termal Río Valdez en Tierra del Fuego se encuentra a unos escasos kilómetros al sur de Tolhuin. Está asociado a las fallas del flanco norte de la cordillera fueguina. Se han reconocido 13 manantiales de aguas bicarbonatadas sódicas,

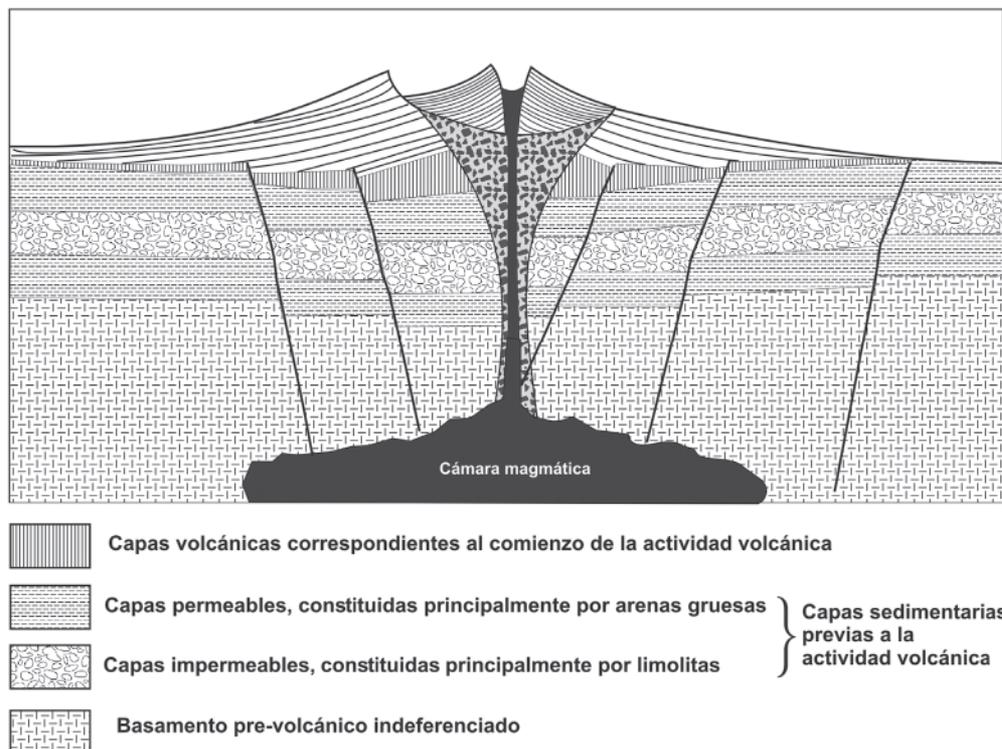
con una acidez (pH) que varía entre 7,8 y 8,2. Las temperaturas medidas en superficie varían entre 31° y 40 °C, con un promedio general de 38,5 °C y un caudal aproximado total de 65.213 l/h. La temperatura del agua en profundidad se ha estimado entre 88° y 98 °C (fuente: <http://proyectoargentino.org.ar/geoter1.html>).

El yacimiento Bahía Blanca-Pedro Luro se encuentra en el extremo sudoeste de la provincia de Buenos Aires y abarca más de 37.000 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por presentar capas acuíferas surgentes de baja termalidad, con temperaturas entre 50° y 74°C, a profundidades entre 500 y 1.300 m.

El reservorio termal se encuentra en dos niveles de profundidad. El superior se encuentra entre 530 y 570 m, con temperaturas entre 55° y 60°C. El nivel inferior representa el acuífero más importante de la región, con profundidades entre 660 y 886 m y temperatura entre 65° y 85°C (fuente: <http://proyectoargentino.org.ar/geoter1.html>).

El campo termal de la región del Ramal se encuentra en las sierras subandinas, departamento de Santa Bárbara, Jujuy. Abarca un área de 1.250 km<sup>2</sup> en la cual se encuentran las áreas de Caimancito, laguna La Quinta y El Palmar. Las temperaturas en superficie varían entre 37° y 58 °C pero en profundidad es mayor. Los cálculos geotermométricos arrojan temperaturas entre 90° y 120 °C. Los acuíferos se encuentran en diversas profundidades con una cota máxima en el interior de la cuenca de 4.000 m, donde se registran las mayores temperaturas.

*Los que tienen presente su pasado,  
tendrán certezas de su futuro*



Las aguas son sulfatadas cloruradas sódicas, clorurado sódico sulfatadas bicarbonatadas y cloruradas sódicas, respectivamente.

Otro campo termal de baja entalpía de importancia es el que está relacionado con el sistema del acuífero Guaraní, cuya inmensa extensión, 1.190.000 km<sup>2</sup>, lo incluye entre las reservas de agua dulce más grandes de nuestro planeta. El campo de aguas termales con mayor explotación turística abarca el este de la provincia de Entre Ríos y oeste de Uruguay. Las aguas termales poseen temperaturas entre 33° y 65 °C y se encuentran a profundidades entre 1.200 y 1.500 m (Para acceder a mayor información véase el resumen publicado por J. N. Santa Cruz, en la revista de divulgación científica *Ciencia Hoy*, número septiembre/octubre 2009).

### Yacimientos geotérmicos de alta entalpía

Los yacimientos geotérmicos de alta entalpía están asociados a volcanes cuaternarios con edades menores a un millón de años. Por este motivo, se encuentran en la cordillera de los Andes, cercanos al límite con Chile. El calor

4 - Esquema que muestra un yacimiento geotérmico en un estrato-volcán de composición andesítica. Las capas sedimentarias permeables delimitan el acuífero, el cual se encuentra confinado entre capas impermeables. El gradiente geotérmico de este lugar fue modificado por la existencia de la cámara magmática que alimenta al volcán. Parte del agua de este acuífero es de origen meteórico y parte de origen magmático.

proviene de las raíces volcánicas que todavía no se han equilibrado con la temperatura ambiente. El recurso geotérmico consiste en agua, que comúnmente resulta ser una mezcla de agua meteórica con agua de origen volcánico. La misma se encuentra confinada en un cuerpo poroso y permeable delimitado por capas de baja permeabilidad (figura 4). En los casos en que la permeabilidad del cuerpo poroso es baja, el agua puede estar a mayor presión con respecto al medio que la rodea ya que debido a su escasa permeabilidad no fluye para equilibrarse con la presión ambiente y de esta manera posee una potencialidad energética muy alta. En cambio, cuando la permeabilidad es alta la presión a la que se encuentra el agua entre los poros es igual al peso de la columna de rocas que soporta y está en equilibrio con el medio.

La exploración geotérmica consiste

en encontrar estos cuerpos de agua confinados y por medio de una perforación llevarlos a la superficie. La rápida y fuerte descompresión produce gas con elevada energía, capaz de mover turbinas y producir electricidad. En este sentido, el sistema de generación de energía es el de una clásica máquina de vapor, donde la energía térmica del agua se transforma en energía mecánica, la cual por medio de una turbina es transformada en energía eléctrica. En los yacimientos geotérmicos en los cuales el agua que se extrae se repone por recarga del acuífero la fuente de energía térmica es prácticamente infinita.

Uno de los inconvenientes de la exploración de yacimientos geotérmicos de alta entalpía es la agresividad química de las aguas. Por esto se requieren materiales especiales para evitar la corrosión, lo cual encarece la exploración y producción de energía.

Debido a que los yacimientos geotérmicos de alta entalpía están relacionados con volcanes jóvenes, con todos ellos se encuentran a lo largo de la cordillera, donde la población es muy escasa. Por lo tanto hay que tener en cuenta en el balance económico que la energía producida hay que transportarla a los lugares de consumo.

El yacimiento geotérmico mejor estudiado de la Argentina y con resultados

prometedores es el del volcán Copahue, en Neuquén. Se han realizado tres perforaciones con profundidades entre 1.065 y 1.414 m. Durante esta exploración se halló un reservorio entre 850 y 1.000 m de profundidad, compuesto por una mezcla de agua-vapor a 230 °C, produciendo un fluido geotérmico a 6,7 Tn/hora de vapor saturado (<http://proyecto-argentino.org.ar/geoter1.html>). Se instaló una planta eléctrica piloto y si bien los resultados fueron alentadores, la usina eléctrica no se concretó. En la actualidad, el agua caliente alimenta el centro termal de Copahue, que cuenta con modernas instalaciones y atención médica, que le dan jerarquía internacional.

En el norte de Neuquén también se encuentra el campo termal del Domuyo, asociado al importante volcanismo riolítico cuaternario de esta área. Estudios posteriores de superficie permitieron delimitar un reservorio entre 650 y 750 m de profundidad confinado por una capa impermeable, con temperaturas de alrededor de los 220 °C (<http://proyectoargentino.org.ar/geoter1.html>). El agua en los manantiales en superficie alcanza la temperatura de ebullición y en algunos casos resulta ser una combinación de agua y vapor como en El Humazo (figura 1).

Otras regiones con recursos geotérmicos de alta entalpía también están relacionadas con actividad volcánica reciente. Los campos termales más importantes todavía carecen de estudios exploratorios, excepto los relacionados con el volcán Tuzgle, en la puna de Jujuy, casi en el límite con la provincia de Salta. El campo geotérmico se evidencia por los manantiales cuyas temperaturas oscilan entre 20 °C y 56 °C. Los estudios realizados han permitido inferir en profundidad temperaturas de 130° a 140 °C, y estas últimas resultarían de la mezcla de aguas calientes de mayor profundidad con aguas más frías y menos profundas.

A 15 km al suroeste del Tuzgle se encuentra el campo geotérmico de Tocomar, cuyos manantiales tienen temperaturas entre 40° y 80 °C, con temperaturas inferidas para el reservorio de 130° y 136 °C.

## Agua magmática y agua meteórica

En los procesos volcánicos participan con frecuencia dos tipos de agua: agua magmática y agua meteórica. El agua magmática es el agua disuelta en el magma, que al llegar cerca de la superficie se libera. El agua meteórica, en cambio, es el agua de lluvia que se infiltra desde la superficie a través de las rocas. En numerosas ocasiones ambos tipos de agua se mezclan y se requieren estudios específicos para determinar la proporción de cada una de ellas.

En la provincia de San Juan se encuentran los prospectos de Valle del Cura probablemente relacionados con el volcán Tórtola, situado en el límite con Chile. Sobre la base de anomalías químicas e isotópicas se infirió la probable existencia, a profundidades accesibles por perforación, de fluidos de tipo agua-vapor con temperaturas superiores a los 200°C y en niveles de circulación y almacenamiento secundarios, temperaturas de 130° - 150°C (fuente: <http://proyectoargentino.org.ar/geoter1.html>).

Otros distritos volcánicos con importantes manantiales de aguas termales son los que se encuentran relacionados con los volcanes activos de Peteroa y Tupungatito en la provincia de Mendoza.

## **El desafío: energías no convencionales**

Los recursos eléctricos provistos por desarrollo de proyectos geotérmicos son cada vez más necesarios porque el consumo de energía en nuestro planeta, y en particular en nuestro país, aumenta constantemente. Debido a los problemas de contaminación ocasionados por las fuentes de energía basadas en el consumo de combustibles fósiles, la energía geotérmica es una alternativa atractiva: es una fuente limpia y su potencial aún no ha sido debidamente explorado.

Un ejemplo del interés por la energía geotérmica es el caso de los yacimientos en el área de The Geysers, en California, Estados Unidos. Con más de 40 años de actividad, el volumen de agua-gas disponible se fue agotando paulatinamente, hasta que nuevas inversiones pudieron implementar un sistema para recargar los acuíferos y solucionar el problema de su agotamiento.

Los recursos geotérmicos de la Argentina con temperaturas adecuadas para la generación de energía eléctrica están relacionados con los volcanes del Cuaternario tardío de la cordillera de los Andes. Por esta razón están alejados de las fuentes de consumo y de las redes troncales de transmisión de energía eléctrica. No

obstante, es imprescindible llevar a cabo los estudios de factibilidad a fin de poder contar con este recurso y utilizarlo en el momento que sea necesario. Es que sin energía no se mueve la industria, y ésta es más competitiva cuanto mayor disponibilidad de energía cuente el país.

El dominio de la tecnología para la creación de energía se puede comparar con el avance de la humanidad cuando transitó de la tecnología del bronce a la tecnología del hierro. Por este motivo, la Argentina debe hacer un gran esfuerzo por implementar políticas de largo plazo para alcanzar un nivel energético no convencional que le permita ponerse entre los países más desarrollados en este tema.◆

*Eduardo Jorge Llambías. Profesor Emérito Universidad Nacional de La Plata. Correo electrónico: llambias@cig.museo.unlp.edu.ar*