

INFRAESTRUCTURA HIDROTHERMAL

1. Introducción

2. Origen del calor

3. Origen de las aguas termales

4. Fuentes termales

5. Mecanismos de surgencia de las aguas termales

INFRAESTRUCTURA HIDROTHERMAL

Juan Ignacio Pinuaga Espejel
Ingeniero de Minas
Instituto Tecnológico GeoMinero de España

1. INTRODUCCION

La presencia de manifestaciones termales en la superficie de la Tierra ha permitido utilizar las aguas termales con fines terapéuticos y recreativos desde tiempos seguramente prehistóricos. Muy al contrario, el estudio de su origen y naturaleza ha sido objeto de las más controvertidas tendencias hasta finales del siglo pasado, al suponersele a las aguas termales un origen volcánico y hasta casi milagroso.

Las observaciones y estudios posteriores han puesto de manifiesto que es la infiltración del agua de lluvia la fuente principal de todas las aguas subterráneas y que la mineralización y la temperatura de las aguas minerales y termales se explica por la circulación de las aguas subterráneas a diferentes profundidades, donde entran en contacto con materiales del basamento, más caliente, lo que produce movimientos convectivos que provocan su emigración hacia zonas porosas y permeables, llegando en algunos casos a aparecer en superficie como manifestaciones hidrotermales: fuentes termales, escapes de vapor, hervideros, etc.

2. EL ORIGEN DEL CALOR

La observación directa de las zonas más superficiales de la Litosfera y las medidas de temperatura en sondeos profundos han proporcionado datos que demuestran el gradual aumento de la temperatura de la Tierra con la profundidad. Dicho gradiente, muy variable de unas regiones a otras en función de la conductividad térmica de las rocas y del flujo de calor existente desde el interior de la Tierra hacia su superficie, es de unos 3°C por cada 100 m. de profundidad y se le denomina Gradiente Geotérmico.

El estudio de la distribución del flujo calorífico en la superficie terrestre demuestra como existen dos tipos de regiones muy diferentes: zonas que pueden denominarse normales, que cubren más de un noventa por ciento de la corteza terrestre, con un flujo medio de 1,4 $\mu\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{seg}$ y un aumento de la temperatura de 3°C cada 100 metros de profundidad; y zonas anormalmente calientes donde el flujo puede ser de dos y hasta diez veces superior al normal, lo que equivale a gradientes geotérmicos de 15 a 50 °C cada 100 metros.

Las zonas denominadas normales comprenden en particular las grandes cuencas sedimentarias, los escudos continentales, dominios externos y plataformas de las cordilleras alpinas periféricas y las vastas llanuras abisales situadas a una media de 4.000 metros bajo el nivel del mar.

Las zonas anormalmente calientes se encuentran en regiones de actividad volcánica reciente o de gran actividad sísmica, como es el caso de las dorsales medio-oceánicas, arcos insulares, etc.

A la vista de las cifras antes mencionadas es necesario pensar en la existencia de alguna gran fuente de calor que haya sido o sea capaz de generar esa gran cantidad de calor. La teoría más aceptada a nivel mundial es que el origen de la energía calorífica de nuestro planeta se debe en gran parte a la radiactividad de las rocas. Todas las rocas de la corteza terrestre tienen pequeñas cantidades de elementos radiactivos, entre los que se encuentran el U^{238} , U^{235} , Th^{232} , y el K^{40} . Estos elementos se desintegran paulatinamente a través de una serie de reacciones nucleares hasta transformarse en Pb los tres primeros y en Calcio 40

el último, liberando suficiente energía como para producir el flujo de calor que se observa en la superficie terrestre y para mantener las altas temperaturas que se detectan bajo la misma.

En los siguientes cuadros puede observarse la generación de calor por los elementos radiactivos mencionados y la producción media de calor en las rocas.

CUADRO I

Generación de calor por los isótopos radiactivos y sus productos de desintegración

Isótopos	Decae a	Vida media (10 ⁹ años)	Proporción de Isótopo %	Generación de calor (1) ¹ cal/gr.año
U ²³⁸	Pb ²⁰⁶	4,50	99,27	0,70
U ²³⁵	Pb ²⁰⁷	0,71	0,72	0,03
Th ²³²	Pb ²⁰⁸	13,90	100	0,20
K ⁴⁰	Ca ⁴⁰ A ⁴⁰	1,31	0,012	27.10 ⁻⁵

Bullard E., 1973.

CUADRO II

Producción media de calor en rocas

Tipo de roca	Concentración			Producción de calor (ucal/gr.año)			
	U p.p.m.	Th p.p.m.	K %	U	Th	K	TOTAL
Granito	4,7	20	3,4	3,4	4	0,9	8,3
Basalto	0,6	2,7	0,8	0,44	0,54	0,23	1,21
Peridotita	0,016	0,004	0,0012	0,012	0,001	0,0003	0,013

Bullar E., 1973.

Por último, cabe decir que existen otra serie de procesos, como reacciones químicas, fenómenos tectónicos, terremotos, variaciones del campo magnético terrestre, etc., que también generan calor, aunque en cantidades pequeñas normalmente en comparación con el flujo terrestre de calor observado.

¹(1) por gramo de elemento químico, incluyendo todos los isótopos

3. ORIGEN DE LAS AGUAS TERMALES

Las aguas de origen meteórico que se infiltran en el subsuelo descienden por gravedad hacia capas más profundas, elevando su temperatura en el curso de su circulación subterránea. Estas aguas pueden ascender posteriormente hasta la superficie, a través de las fisuras y fracturas existentes en las rocas, gracias a ciertos mecanismos de surgencia que se comentarán más adelante.

Este es sin lugar a dudas el origen más frecuente de las aguas termales, denominándose comúnmente origen geotérmico (ver fig.1).

Las características físico-químicas de estas aguas vienen dadas por la de los terrenos de donde provienen. Por ello, su contenido en sales, su temperatura y las características hidrológicas son muy variables. No obstante, su temperatura en el punto de surgencia raramente supera los 35-40 °C.

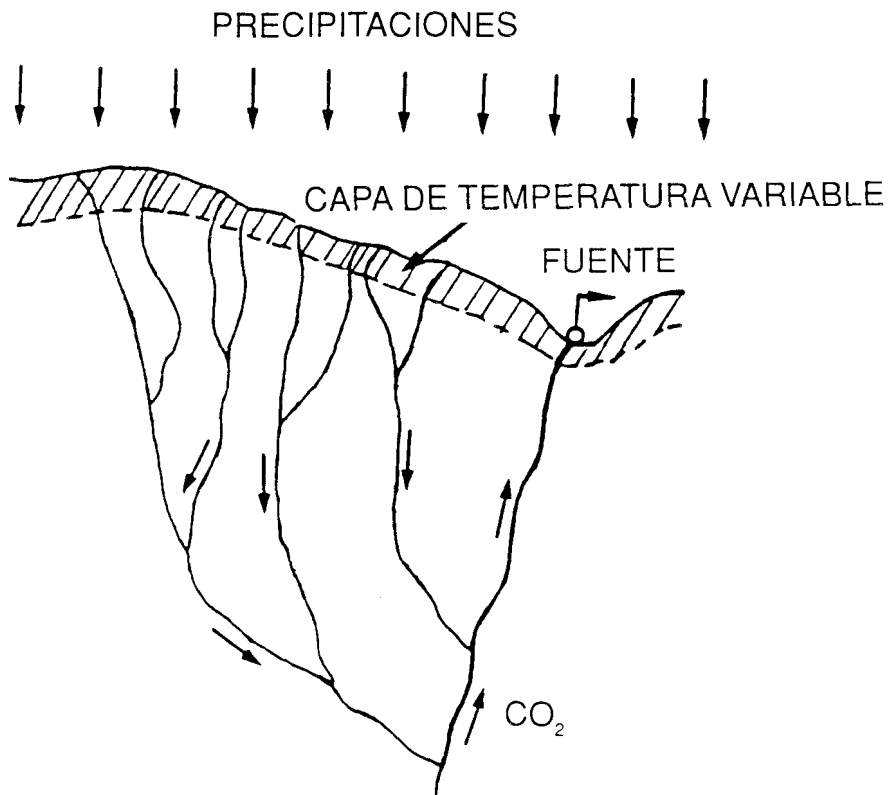


FIGURA 1. - ESQUEMA DEL ORIGEN METEORICO DE LAS AGUAS TERMALES

En algunos casos, sin embargo, la sola circulación de las aguas de origen meteórico en profundidad no permite explicar satisfactoriamente las características físico-químicas de las aguas termales, debiéndoles atribuir un origen endógeno, es decir magmático, volcánico y químico.

Respecto a las **aguas de origen magmático** se puede afirmar que existe la posibilidad de que como consecuencia de la cristalización de los magmas se liberen constituyentes volátiles que pueden escaparse en forma de fumarolas, compuestas esencialmente de hidrógeno y vapor de agua, junto con elementos como fluor, cloro, azufre, carbono, fósforo y boro. Así, se ha calculado que al fundirse un km³ de granito se liberarían 26 millones de toneladas de agua (1 kg de granito produce 10 gr. de agua). Según los estudios de Sosman, confirmados por B. Geze, una intrusión magmática con una potencia de 1000 metros contendría un 5% en peso de agua y al enfriarse lentamente podría producir durante un millón de años una cantidad de agua de unos 23,8 litros de agua por minuto y por kilómetro cuadrado.

La composición en sales y la temperatura de estas aguas termales de origen endógeno, con independencia de la roca de la que proceden, son relativamente constantes y de carácter hipertermal.

De forma análoga, las aguas juveniles o endógenas pueden también proceder de la consolidación de lavas y de vapor de agua de origen volcánico, acompañados generalmente de gases como el anhídrido carbónico, nitrógeno, sulfhídrico, fluorhídrico, etc.

Hasta hace no muchos años, ciertos vulcanólogos se resistían a admitir que los volcanes produjesen agua, hecho que en la actualidad está totalmente probado, al igual que la relación existente entre algunas fuentes de aguas termales y ciertas manifestaciones volcánicas.

De igual forma, hay que tener en cuenta que ciertas reacciones químicas de carácter intenso en el seno de la corteza terrestre pueden liberar agua, y que algunos sedimentos al depositarse sobre los fondos marinos dan lugar a un proceso de oclusión de parte del agua de arrastre, originando las denominadas aguas fósiles, particularmente ricas en cloruro sódico (Na Cl), bromo (Br) y Yodo (I).

No obstante, las aguas termales pueden tener también un origen mixto, por mezcla de aguas meteóricas de infiltración reciente con aguas endógenas o fósiles (Figura nº 2).

4. FUENTES TERMALES

Las fuentes de agua termal están unidas esencialmente al concepto de «ascensión» de aguas profundas». Esta condición, que evidencia el importante papel de las fracturas abiertas, limita los tipos de surgencias a estructuras muy particulares, que admiten menos variaciones que las de las aguas subterráneas en general.

Entre los accidentes geológicos que favorecen la circulación del agua se pueden citar:

- Las diaclasas y fisuras finas.
- Las fallas y zonas de milonitización.
- Los contactos geológicos.
- Los filones y diques eruptivos.
- Los filones metalíferos.

Pero la sola presencia de fisuras y fracturas no es suficiente para que se produzca una surgencia de agua termal. Es necesario que estos accidentes se encuentren abiertos. De ahí la noción de "fisuración activa".

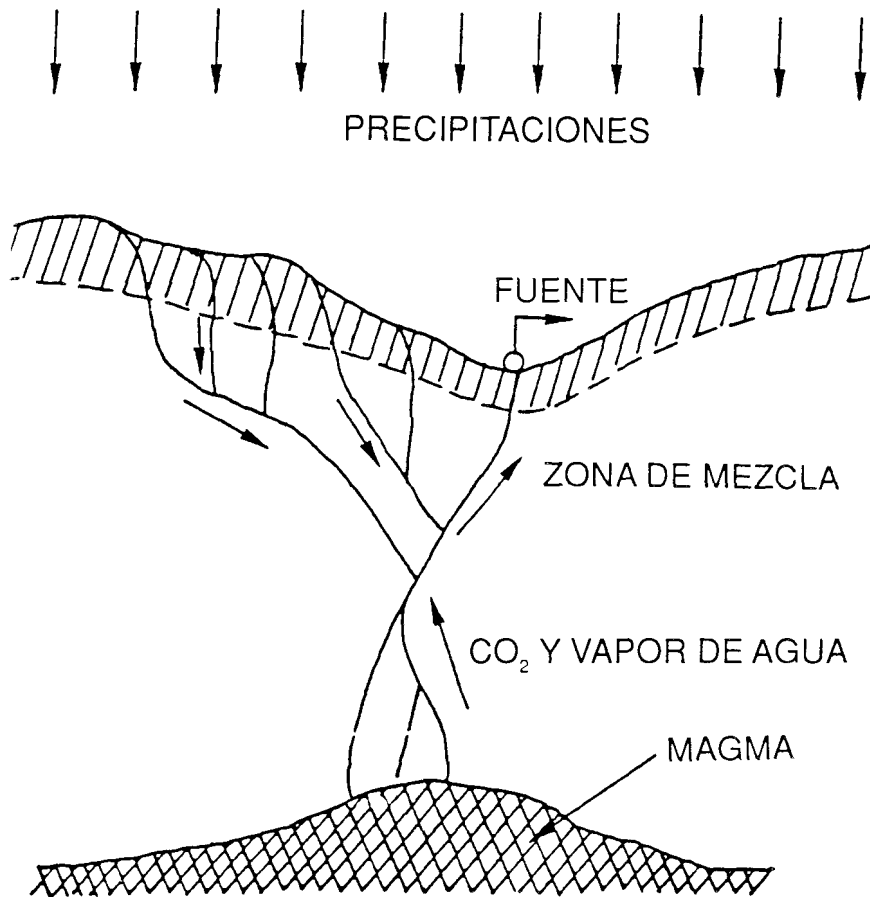


FIGURA 2 - ESQUEMA DEL ORIGEN MIXTO DE LAS AGUAS TERMALES

Los estudios de geología estructural muestran que los accidentes primitivamente abiertos y posteriormente ampliados y desarrollados por la circulación de las aguas subterráneas, aunque pueden verse colmatados por depósitos minerales, pueden reactivarse también en fases tectónicas posteriores. Por ello, las surgencias de aguas termales se sitúan, sobre todo, en zonas de movimientos recientes o de tectónica activa.

Las diaclasas y fisuras finas raramente constituyen el origen de la circulación de las aguas termales, no así las fallas y las zonas milonitizadas que las acompañan que cuando están abiertas son las vías naturales de surgencia de las aguas termales, siendo frecuente la localización de surgencias termales sobre grandes fracturas de zócalo. La importancia de las fracturas ha sido reconocida por numerosos autores, al igual que el importante papel de las fallas de distensión. Asimismo, es en la intersección de accidentes jóvenes donde se sitúan las surgencias importantes, siendo más abundantes cuanto más joven es la fractura.

Los contactos geológicos entre rocas graníticas y sedimentarias son también vías preferentes por las que circulan y emergen las aguas termales. Del mismo modo, los filones y los diques eruptivos favorecen la emergencia rápida de las aguas termales.

Por último, los filones metalíferos son a menudo una vía privilegiada para la emergencia de aguas termales. En este sentido hay que resaltar que los filones se corresponden normalmente con las grandes

fracturas del zócalo que continúan activas y juegan un doble papel: por un lado hidráulico, favoreciendo la ascensión de las aguas profundas hacia la superficie, y por otro lado químico, favoreciendo el enriquecimiento en sales debido a la disolución de sus sustancias minerales.

En resumen, las surgencias termales vienen determinadas por dos tipos de condicionantes principales:

- Una fracturación intensa con una o varias fases tectónicas, de las que la última, debida a movimientos recientes, está a veces acentuada por algún tipo de actividad volcánica.
- La presencia de valles o depresiones.

No obstante, las rocas fisuradas del sustrato de donde emergen las aguas termales están cubiertas con cierta frecuencia, por formaciones sedimentarias más recientes, que enmascaran auténticos termosifones. En otros casos, puede llegar a existir precipitados que cimentan y colmatan los terrenos permeables que recubren el sustrato, formando una verdadera capa protectora que es preciso perforar para proceder a las captaciones.

5. MECANISMOS DE SURGENCIA DE LAS AGUAS TERMALES

Los sistemas de aguas termales dan lugar al nacimiento de fuentes bajo la influencia de factores hidrogeológicos y físicos de los que unos, como el gradiente hidráulico son comunes a todo tipo de circulación subterránea, y otros, son particulares de las aguas termales profundas. Entre estos últimos, se pueden citar:

- La expansión del vapor de agua,
- La acción de los gases ocluidos y disueltos, y
- La acción de la temperatura.

* **Gradiente hidráulico.** Es el factor principal que afecta a la circulación de las aguas subterráneas, termales o no. Su acción implica zonas de alimentación o recarga más elevada que las zonas de emergencia o acumulación.

* **Expansión del vapor de agua.** Este factor juega un papel esencial en el funcionamiento de los géiseres, fumarolas y en la surgencia de las fuentes hipertermales. Cuando el agua entra en contacto con rocas a alta temperatura, se producen dos acciones físicas: la de la vaporización del agua y la de su disociación con la fijación de oxígeno.

* **Acción de los gases ocluidos y disueltos.** Los gases ocluidos y disueltos tienen una doble acción física y dinámica ya que, por un lado, rebajan el peso específico del agua, y por otro, la presión de los gases emulsiona el agua y provoca su ascenso.

Los gases disueltos y ocluidos actúan sobre la densidad, que a su vez influye sobre la velocidad de flujo, y sobre la relación entre los caudales del gas y del líquido, modificando, por tanto, la carga hidráulica.

El papel principal lo juegan dos tipos de gases: el anhídrido carbónico y el vapor de agua, siendo la influencia del primero más importante que la del segundo. Los carburos de hidrógeno intervienen a veces en zonas particulares, como las regiones petrolíferas.

* **Acción de la temperatura.** La temperatura actúa variando la masa específica del agua y su viscosidad, de forma que si el gradiente de temperatura supera el límite conocido como gradiente adiabático el fluido existente en el acuífero se hace inestable y tiende a fluir por convección térmica hacia superficie. A su vez, la diferencia de densidad entre el agua fría y caliente provoca un fenómeno típico de termosifón, que crece con el caudal.

La acción de la viscosidad parece que influye en general en la velocidad de circulación del agua (La viscosidad del agua disminuye al aumentar la temperatura por lo que el coeficiente de permeabilidad aumenta al hacerlo la velocidad de circulación).

En resumen, el estudio de las aguas termales pone en evidencia el importante papel de la fracturación de las rocas, abiertas por movimientos tectónicos recientes. Las zonas «libres», así producidas, permiten el ascenso rápido de las aguas profundas, cuyo origen es la infiltración y a veces su relación con fenómenos endógenos. En la mayoría de los casos, se suelen producir fenómenos de mezcla de aguas superficiales con aguas hipertermales profundas, vapor de agua o gases, entre los que cabe destacar el anhídrico carbónico por el papel primordial que juega en este tipo de sistemas.

De esta forma, las aguas termales marcan un estadio particular del ciclo del agua, desarrollándose en las capas profundas del subsuelo. Las condiciones quimicofísicas del medio son el origen de su composición química y de su temperatura.

El estudio de la mineralización y la circulación de las aguas termales permite también comprender mejor la formación de los filones metalíferos, aportando pruebas que apoyan la hipótesis de su origen hidrotermal.