ENERGÍA GEOTÉRMICA



Pedro Fernández Díez

pfernandezdiez.es

I.- ENERGÍA GEOTÉRMICA

pfernandezdiez.es

I.1.- INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es la energía natural almacenada en la Tierra a profundidades lo suficientemente cercanas a la superficie en forma de calor, para que pueda salir y utilizarse en la generación de energía eléctrica, o bien, para usarla como energía térmica.

La geotermia se puede considerar como el conjunto de técnicas que permiten utilizar y aprovechar el calor generado en el interior de la Tierra.

Se sabe que la temperatura de la corteza terrestre aumenta a medida que se profundiza en la misma; la existencia de este calor se manifiesta directamente en las erupciones volcánicas en las que hay una proyección de rocas fundidas (lava) y de gas, y en forma menos brutal, pero no por ello menos espectacular, en el fenómeno del geyser, que consiste en el ascenso de vapor de agua a presión a lo largo de una fractura, a una temperatura que varía entre los 200°C y 250°C.

Este tipo de energía está almacenada en forma de vapor de agua seco, agua caliente, agua caliente con gas metano disuelto y en roca seca caliente.

Antecedentes históricos.- La presencia de volcanes, fuentes termales y otros fenómenos termales debieron haber inducido a nuestros ancestros a suponer que el interior de la Tierra estaba caliente; sin embargo, no fue hasta los siglos XVI y XVII, cuando se excavaron las primeras minas a algunos cientos de metros de profundidad, observándose que la temperatura se incrementaba con la profundidad.

Las primeras medidas, con termómetros, se realizaron en 1740 en una mina de Belfort, en Francia. Sin embargo, el aprovechamiento de esta energía se inicia en Toscana en 1777, cuando se detecta la presencia de ácido bórico en algunas fuentes termales, comenzando rápidamente su explotación; estas aguas contenían una concentración de boro del orden de un 0,5 por mil, observándose que esta concentración aumentaba con la temperatura del agua, descubriéndose así un método de obtención del boro. El ácido bórico se obtenía mediante evaporación de las aguas geotérmicas, usando co-

mo combustible la madera de los bosques de los alrededores. En 1827 Francisco Larderello, fundador de esta industria, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación, en vez de quemar la madera de los bosques en rápido agotamiento. A lo largo del siglo XIX, se mejoraron estas explotaciones, se hicieron pequeños sondeos y se utilizó el vapor que se desprendía para concentrar el contenido en boro del agua termal. Entre 1850÷1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de la producción de ácido bórico.

Al comienzo del siglo XX, en la zona de Larderello, el vapor geotérmico seco se aprovecha para accionar una turbina de 5 kW, constituyendo la primera central geotérmica del mundo de generación de energía eléctrica; a partir de este momento comienza un desarrollo progresivo de esta fuente de energía, hasta alcanzarse en la actualidad los 500 MW; se extiende sobre una superficie de 200 km^2, por lo que dada su gran extensión, se hizo necesario multiplicar los sondeos de esta explotación, ampliando asimismo el número de centrales geotérmicas, que están bastante próximas a los sondeos, con los que están conectadas mediante conducciones de gran diámetro aisladas térmicamente.

Otros países también empezaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escala industrial

En 1892 entró en operaciones el primer sistema de calefacción geotermal, en Boise, Idaho (USA)

En 1919 se perforan los primeros pozos geotérmicas de Japón, en Beppu

En 1921 los pozos The Geyser, California, USA, y en el Tatio, Chile

En 1928 Islandia, otro país pionero en la utilización de la energía geotérmica, inicia la explotación de sus fluidos geotérmicos (principalmente agua caliente) para calefacción doméstica.

Entre 1910 y 1940 el vapor de agua de baja presión se utiliza para calefactar invernaderos, edificios industriales y residenciales, en esta parte de Toscana.

En 1958 entra en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelandia, y en 1959 otra en México.

La energía geotérmica se empezó a utilizar en Estados Unidos en 1960, cuando se usó vapor seco de los géiseres al norte de San Francisco para generar 11 MW de energía eléctrica; las condiciones del vapor de estos géiseres son del orden de 7,6 Atm y 180°C; en 1980, las plantas geotérmicas de este lugar producían unos 800 MW de potencia y hacia 1990 esta capacidad se había casi duplicado.

I.2.- TRANSFERENCIA DE ENERGÍA TÉRMICA A TRAVÉS DE LA CORTEZA TERRESTRE

El globo terráqueo está formado, a partir del centro, por un núcleo sólido de 3470 km de radio a

4200ºC y rodeando a éste por un núcleo líquido compuesto exclusivamente de Fe y Ni (NiFe), de un diámetro del orden de 5200 km; ambos núcleos tienen la misma composición, siendo su densidad del orden de 13 Tm/m^3 y su presión del orden de 3,7 millones de bars; rodeando al núcleo líquido se extiende el manto de 2900 km de espesor y 3000ºC y a éste le envuelve la astenosfera que es una zona de débil resistencia Fig I.1.

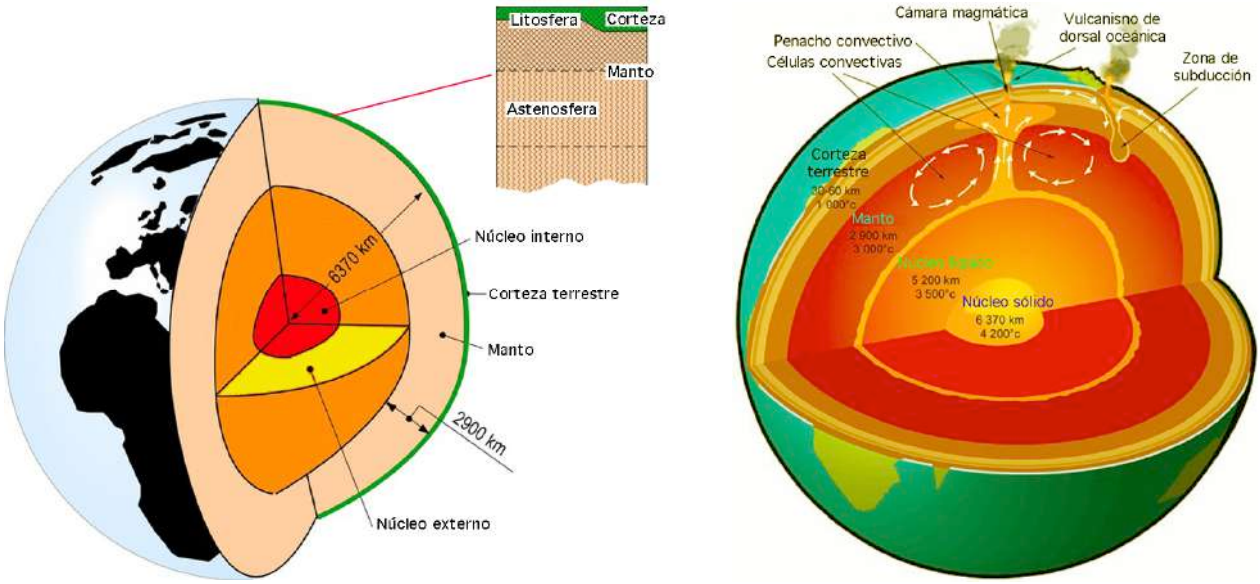


Fig I.1.- Corteza, manto y núcleo de la Tierra

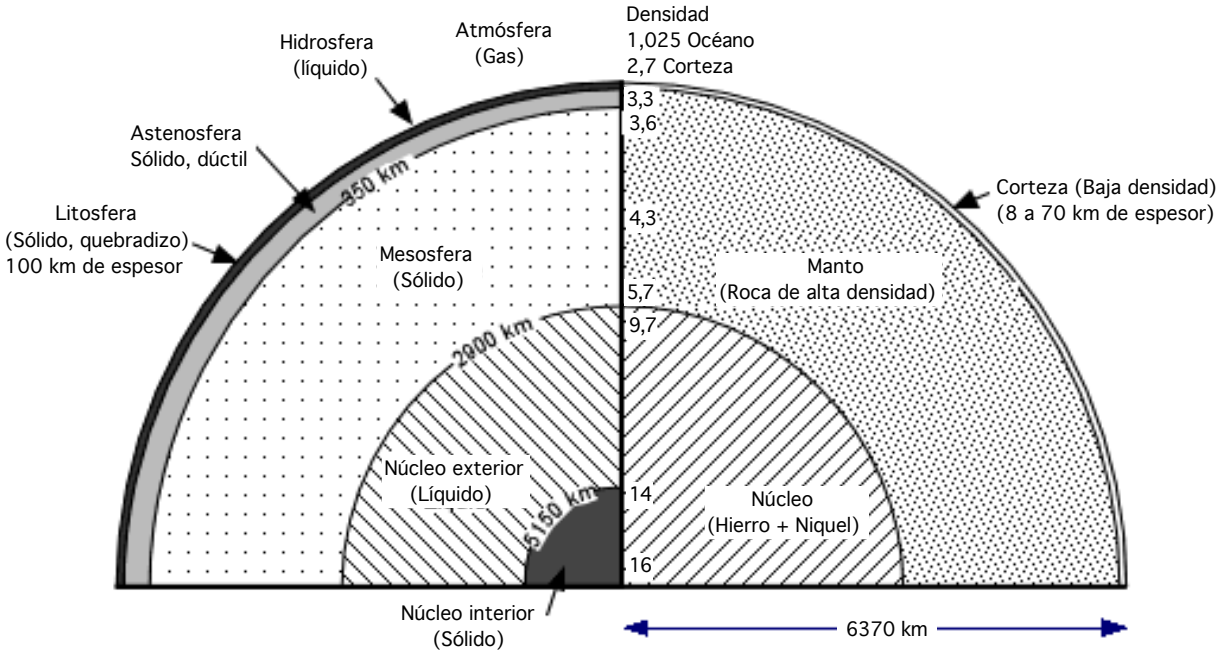


Fig I.2.- Densidad de la corteza, manto y núcleo de la Tierra

La envoltura más externa de la Tierra es la litosfera que corresponde a la corteza y al nivel superior del manto; su espesor varía de menos 80 km en las zonas oceánicas hasta más de 200 km en

áreas continentales, comportándose como un cuerpo rígido. Bajo la litosfera está la zona conocida como astenosfera, de 200÷300 km de espesor, que tiene un comportamiento menos rígido o más plástico que la litosfera,de forma que, a escala geológica en la que el tiempo se mide en millones de años, esta porción de la Tierra se comporta, en ciertos procesos, como un fluido. La capa más externa de la litosfera es la corteza terrestre que alcanza un espesor de 10÷17 km y de 5÷6 km en los océanos; bajo los continentes la corteza se conoce como SIAL (Si-Al) y bajo los océanos como SIMA (Si-Mn); la litosfera está compuesta por placas que conservan una gran rigidez cuando se desplazan, lo que origina grandes divisiones en la tectónica terrestre.

La corteza está separada del manto por la discontinuidad de Mohorovivich.

La energía del magma se encuentra en enormes regiones de roca fundida, o en la roca seca caliente que se forma cuando se enfría el magma. El magma puede generar energía térmica a temperaturas cercanas a los 1.100°C. No se conocen métodos ni materiales para llegar al magma.

Cuando se profundiza en el suelo, la radiación solar deja de influir a partir de los 70 m en donde la temperatura viene a ser del orden de 12°C. A partir de ahí, la temperatura aumenta con la profundidad, definiéndose el grado geotérmico como el número de metros a profundizar en el interior de la corteza terrestre, a razón de 1°C por cada 33 m por término medio, que es un valor medio teórico para las capas superficiales, que se corresponde con una evacuación térmica de 60 mW/m^2; varía de unas zonas a otras de la corteza terrestre, con valores tan dispares como los 19 m de Australia ó los 111 m de Johannesburgo.

El *grado geotérmico* se obtiene dividiendo el intervalo de profundidad entre el intervalo de temperatura.

Gradiente geotérmico.- Es el número de grados centígrados que aumenta la temperatura al profundizar 100 m en el interior de la corteza terrestre; tanto el grado como el gradiente geotérmico varían con:

- La conductividad térmica de las rocas (a mayor conductividad térmica de las rocas menor gradiente geotérmico, y mayor grado geotérmico)

- El tipo de reacciones químicas que predominen en la zona (endotérmicas y exotérmicas). Si predominan las reacciones endotérmicas o de absorción de calor, el gradiente geotérmico será menor que en zonas en que predominen las reacciones exotérmicas

- La presencia y concentración de elementos radiactivos, que desprenden calor en su desintegración, elevando el gradiente geotérmico y disminuyendo el grado geotérmico

- La proximidad de rocas eruptivas aún no consolidadas, que aportan calor en forma considerable

Otros factores que pueden influir son
- *La existencia de aguas termales en la zona considerada*
- *El alejamiento o proximidad de éstas a los océanos*
- *La tectónica de la zona, etc*

En zonas normales, para obtener 150°C es preciso alcanzar profundidades de 4000 m.

En zonas de flujo anómalo se alcanzan temperaturas entre 200÷300°C a profundidades entre 1500÷2500 m. En zonas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante se ha rellenado con sedimentos geológicamente *muy jóvenes*, el gradiente geotérmico puede ser menor que 1°C/km. El flujo calórico terrestre promedio en los continentes es de 65 mW/m^2 y en los océanos de 101 mW/m^2.

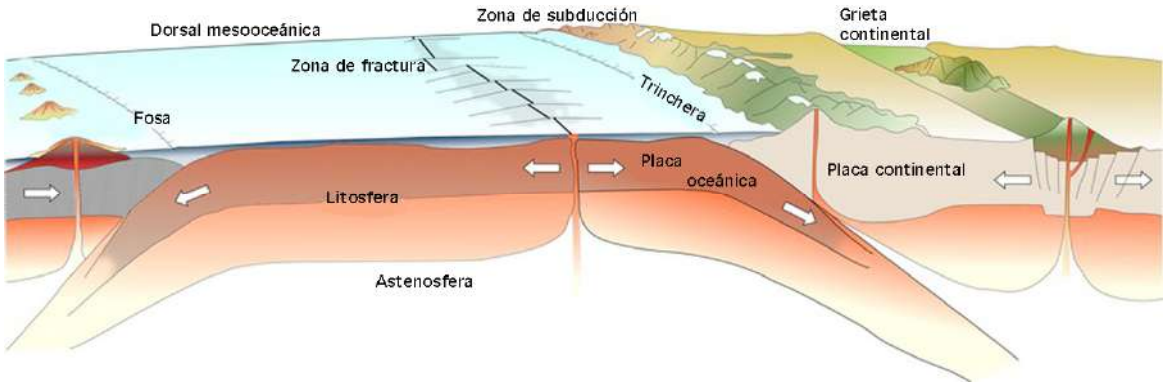


Fig I.3.- Perfil esquemático mostrando los procesos de tectónica de placas

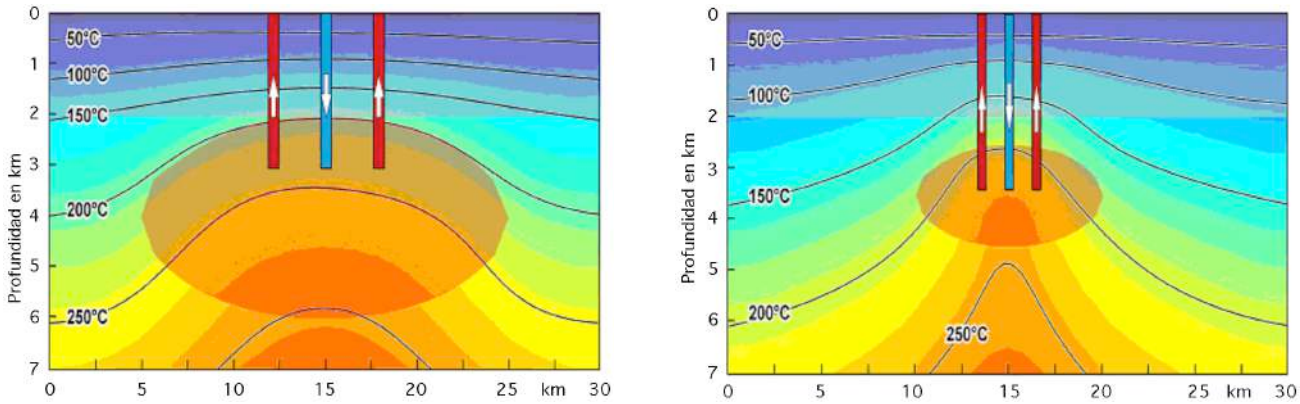


Fig I.4.- a) Flujo anómalo para granito caliente ; b) Flujo anómalo para un cuerpo radiogénico

El flujo de energía interna es debido, en gran medida, a la desintegración radiactiva de los isótopos ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K, ^{87}Rb que están presentes en todas las rocas metamórficas e ígneas conocidas, así como al movimiento de las placas continentales.

En el interior de la Tierra existen otras fuentes de energía menos conocidas tales como:

- El calor latente de solidificación y de fusión de las partes interna y externa del núcleo

- La energía potencial almacenada por la Tierra que no está todavía en una configuración de equilibrio de mínima energía puede ser debido a restos del calor primitivo almacenado desde cuando se formó el planeta

En la década de 1980 se comprobó que no existía equilibrio entre el calor radiogénico generado en el interior de la Tierra y el calor disipado al espacio, de lo que se dedujo que nuestro planeta se

está enfriando lentamente; la temperatura del manto ha disminuido del orden de 350°C en tres mil millones de años; se ha estimado que el calor almacenado en la Tierra, calculado a partir de una temperatura ambiente media de 15°C, es del orden de $12{,}6.10^{24}$ MJ siendo el calor de la corteza de unos $5{,}4.10^{21}$ MJ.

Se ha considerado un *calor radiogénico* de $4{,}2.10^{7}$ GW, del que:

- 8.10^{6} GW provienen de la corteza, la cual representa el 2% del volumen total de la Tierra, pero que es rica en isótopos radioactivos

- $3{,}23.10^{7}$ GW provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen total de la Tierra

- $1{,}7.10^{6}$ GW provienen del núcleo, el cual corresponden al 16% del volumen total y no contiene isótopos radiactivos

Considerando que el calor radiogénico del manto se estima en 22.10^{12} W, el enfriamiento de esta parte de la Tierra se estima en $10{,}3.10^{12}$ W.

I.3.- NATURALEZA DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

Debido a la diferencia de temperaturas entre los distintos niveles de la astenosfera, se originan movimientos convectivos extremadamente lentos (unos pocos centímetros por año), que se mantienen mediante el calor producido por la desintegración de elementos radiactivos y por el calor proveniente de las partes mas profundas de la Tierra.

Enormes rocas calientes profundas, menos densas y más ligeras que el material circundante, ascienden con estos movimientos hacia la superficie, mientras que rocas superficiales más pesadas, densas y frías tienden a hundirse, recalentándose y ascendiendo a la superficie una y otra vez.

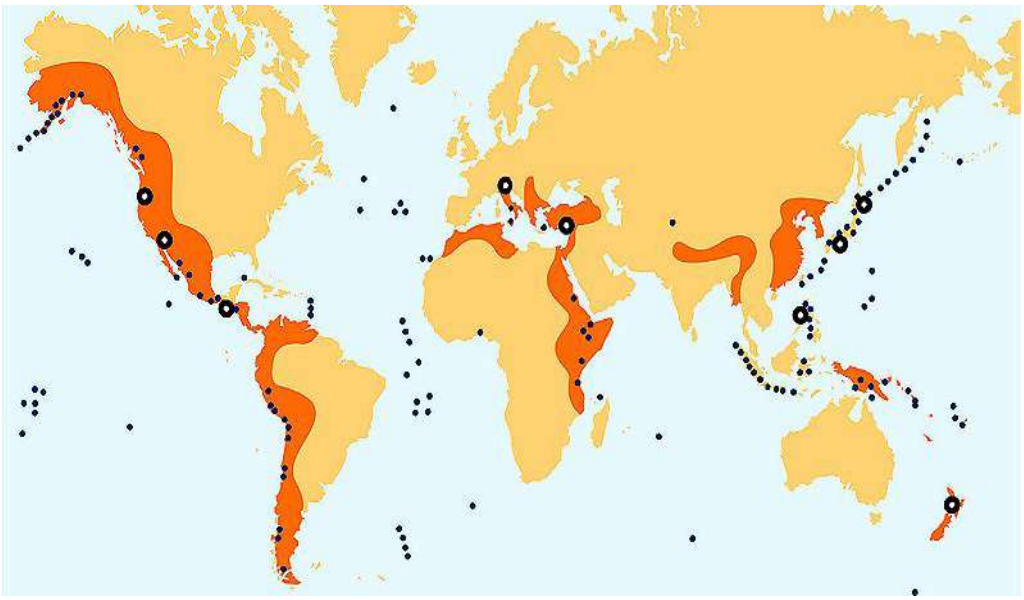
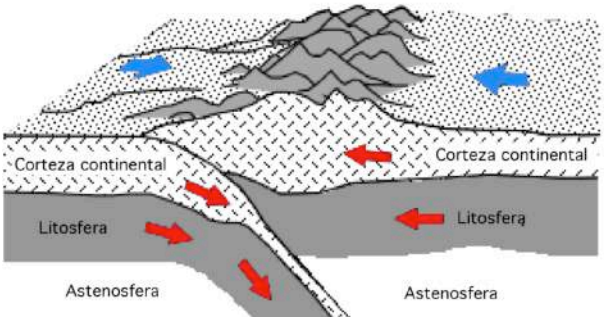


Fig. I.5.- Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos

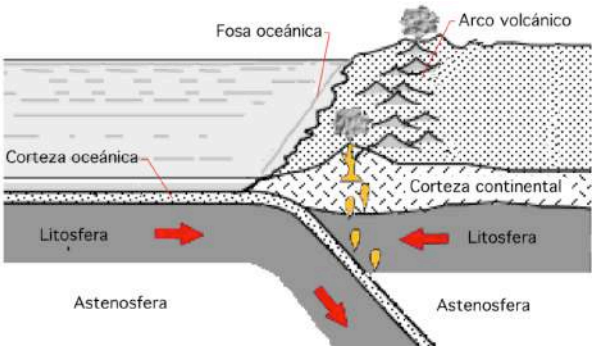
En las zonas donde la litosfera es mas delgada, especialmente en las áreas oceánicas, es empujada hacia arriba y quebrada por el material parcialmente fundido muy caliente, que asciende desde la astenosfera. Este es el mecanismo que originó y origina las *dorsales oceánicas,* que se extienden por más de 60.000 km debajo de los océanos, emergiendo en algunos lugares (Azores, Islandia) e incluso desplegándose entre continentes, como en el Mar Rojo. Una pequeña fracción de rocas fundidas que asciende desde la astenosfera emerge en la cumbre de estas dorsales, y en contacto con el agua del mar se solidifica para formar nueva corteza oceánica. La mayor parte del material que asciende desde la astenosfera se divide en dos ramas que fluyen en dirección opuesta debajo de la litosfera. La continua generación de nueva corteza y el empuje en direcciones opuestas de estas dos ramas provoca que cada lado de la dorsal se separe a una velocidad de unos pocos centímetros por año, por lo que la litosfera oceánica tiende a incrementarse. Las dorsales están cortadas perpendicularmente por enormes fracturas que en algunos casos alcanzan unos pocos miles de kilómetros de longitud, denominadas *fallas transcurrentes*.

Estos fenómenos conducen a la conclusión de que dado que no existe un incremento de la superficie de la Tierra a través del tiempo, la formación de nueva litosfera a lo largo de las dorsales y la expansión de la corteza oceánica, debe estar acompañada por una comparable merma de la litosfera en otras partes del globo, lo que sucede en las *zonas de subducción,* la mayoría de las cuales están representadas por inmensas fosas oceánicas, como las que se extienden a lo largo de la margen occidental del Océano Pacífico y de la costa occidental de Sudamérica. En las zonas de subducción la litosfera se pliega y sumerge bajo la litosfera adyacente hasta zonas profundas muy calientes, donde es absorbida por el manto y el ciclo se reinicia nuevamente. Parte del material de la litosfera vuelve al estado líquido y puede ascender hacia la superficie a través de fracturas en la corteza.

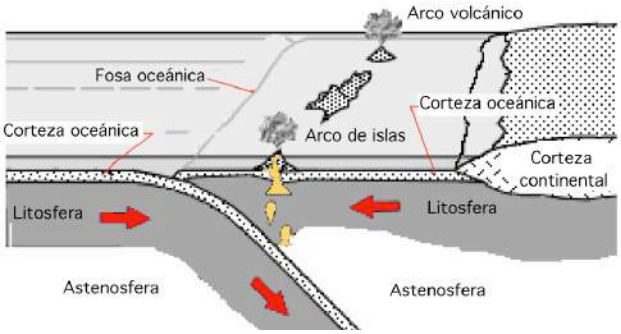
Consecuentemente, se forman *arcos magmáticos* con numerosos volcanes paralelos a las fosas, en el lado opuesto al de las dorsales; en las fosas localizadas en el océano, como en el Pacífico Occidental estos arcos magmáticos corresponden a cadenas de islas volcánicas; en las fosas ubicadas a lo largo de bordes continentales los arcos magmáticos consisten en cadenas de montañas con numerosos volcanes, como en los Andes.



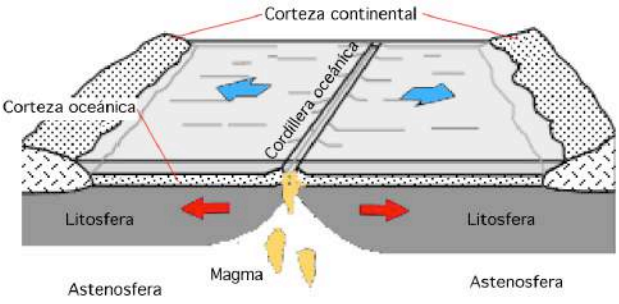
Convergencia continente-continente



Convergencia continente-océano



Convergencia continente-continente



Frontera de placas divergentes
Cordillera oceánica-centro de propagación

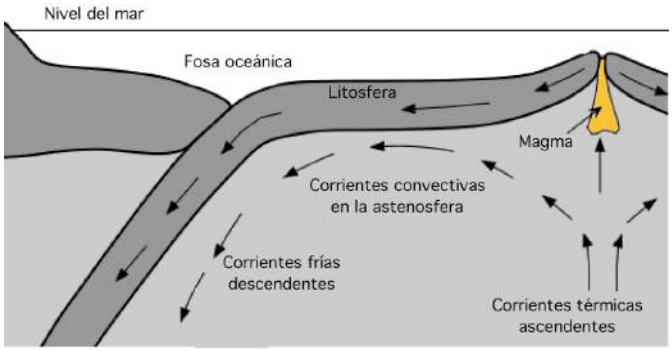


Fig I.6.- Desplazamiento de placas que conforman la litosfera

Las dorsales oceánicas, fallas transcurrentes y zonas de subducción constituyen una vasta red que divide nuestro planeta en *seis placas* o áreas litosféricas de grandes dimensiones además de otras placas más pequeñas, Fig I.7.

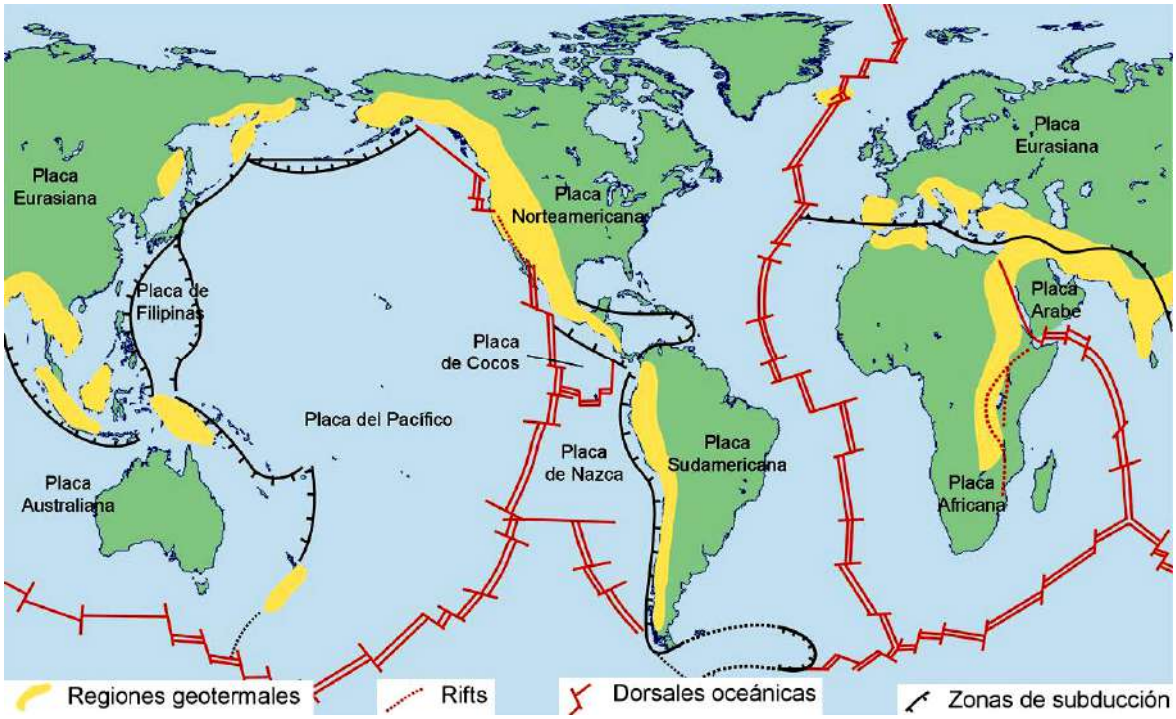


Fig. I.7.- Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos

Debido a las enormes tensiones generadas por el calor de la Tierra y la asimetría de las zonas que generan y consumen materia de la litosfera, estas placas derivan lentamente unas respecto de otras, cambiando continuamente de posición.

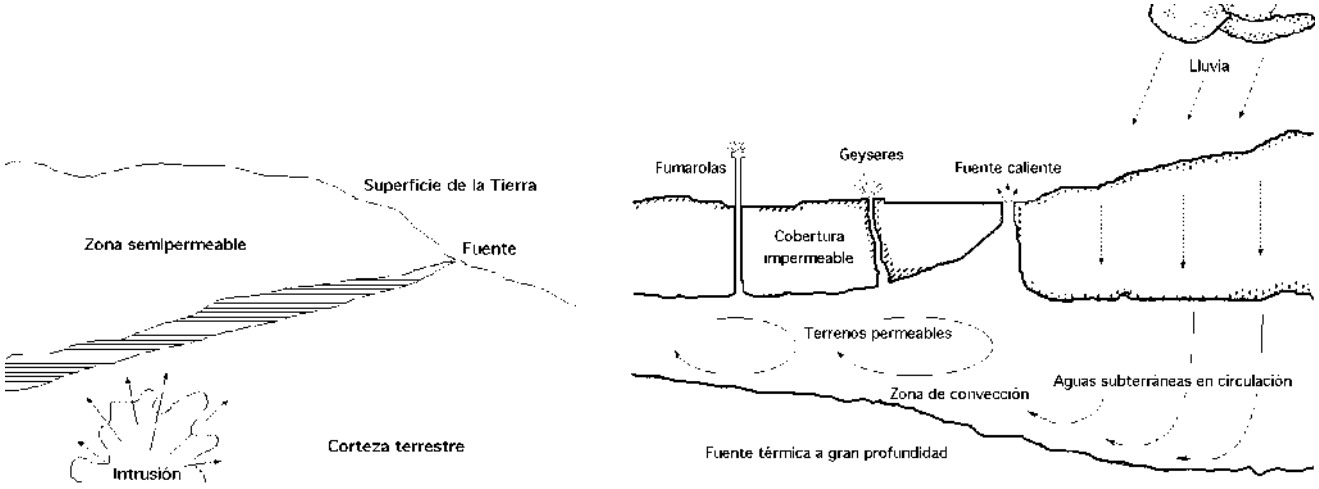
Los bordes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo térmico terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Las áreas geotérmicas mas importantes se ubican alrededor de los bordes de placas.

I.4.- MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Los mecanismos de transferencia de calor geotérmico que intervienen en estos procesos son, por un lado, la convección, que es el mecanismo predominante de transferencia térmica desde el centro de la Tierra hasta profundidades del orden de 50 km (formación de volcanes) interviniendo en menor medida la conducción térmica. Las transferencias convectivas originadas por la inclinación de las soluciones acuosas son muy comunes en la corteza terrestre; estos procesos son los responsables de la conformación de yacimientos y depósitos minerales, y de los géiseres y fumarolas, Fig I.8

Cuando los silicatos fundidos calientan una roca sólida (intrusión), se producen en las rocas encajonadas, contracciones mecánicas propias o inducidas por los efectos térmicos que pueden causar una fractura importante. El agua fría de la superficie de origen meteórico (lluvia), se infiltra en estas fracturas, se calienta a su paso por la proximidad de la intrusión, se eleva de nuevo y sale así al exterior. Tales procesos se ponen en evidencia mediante métodos geoquímicos indirectos, en los que la relación isotópica $^{18}O/^{16}O$ es muy diferente en las aguas de superficie y en las rocas ígneas.

En la actualidad se admite que la mayor parte del vapor geotérmico proviene del agua que se infiltra desde la superficie, la cual progresivamente se recalienta y vaporiza en contacto con las rocas calientes del yacimiento geotérmico.



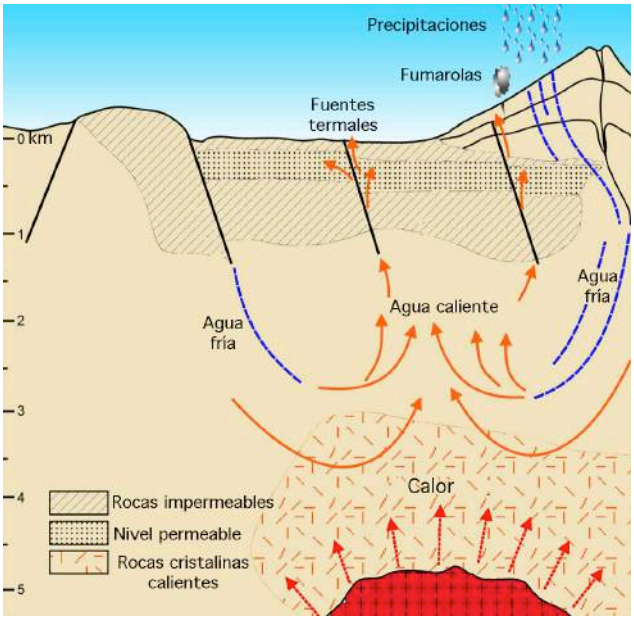


Fig I.8.- Formación de fuentes termales, fumarolas, géyseres, etc

Flujo térmico.- La energía geotérmica se evacúa en forma de calor hacia el exterior de la Tierra, lentamente, debido a la baja conductividad térmica de los materiales que componen la corteza terrestre.

El flujo térmico convectivo viene representado por la ecuación: $Q_{conv} = \rho\, c_p T v\ (\frac{W}{m^2})$, en la que ρ es la densidad del fluido, c_p su calor específico, T su temperatura absoluta y v su velocidad.

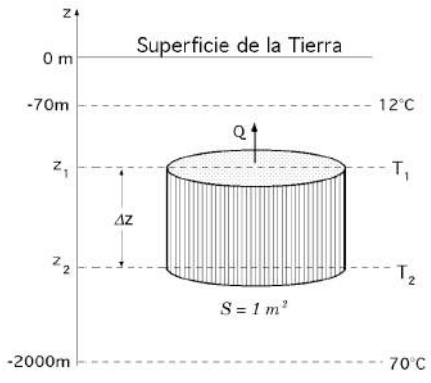


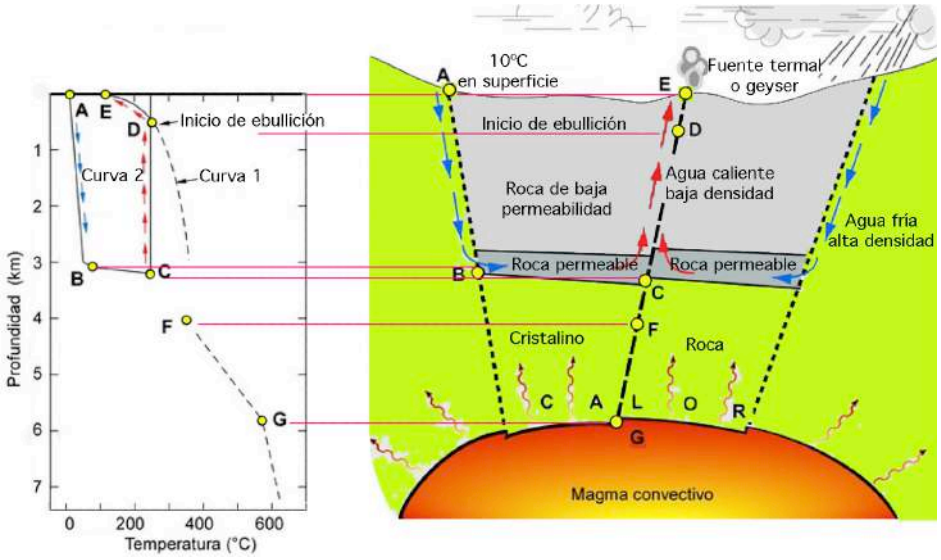
Fig I.9. - Gradiente geotérmico

Supongamos un cilindro vertical de sección transversal S = 1 m² y altura Δz, Fig I.9, que es atravesado de abajo hacia arriba por un flujo de calor Q que es por definición el flujo geotérmico.

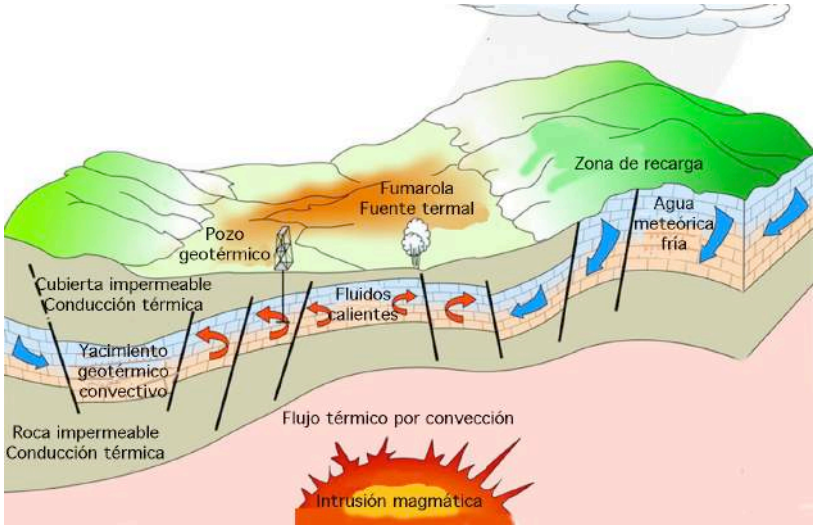
Si la roca es impermeable, sólo interviene la transferencia de calor por conducción. Admitiendo que el gradiente geotérmico se mantiene constante a una gran profundidad, se puede deducir el flujo geotérmico normal (media mundial para todas las tierras emergidas. El flujo geotérmico conductivo viene dado por la ley de Fourier en la forma:

$$Q_{cond} = -\,k\,\frac{\Delta T}{\Delta z} = \left| \begin{array}{l} \text{Gradiente geotérmico: } \dfrac{\Delta T}{\Delta z} = -\,\dfrac{1}{33}\,\dfrac{^oC}{m} \\ \text{Conductividad térmica: } k \approx 2\,\dfrac{W}{m\,^oC} \end{array} \right| = 60{,}6.10^{-3}\,\frac{W}{m^2} = 1{,}447.10^{-5}\,\frac{Kcal}{m^2\,seg}$$

y que aunque no representa el flujo geotérmico total, ya que no se ha tenido en cuenta el flujo térmico por convección, es un indicativo de su orden de magnitud.



La curva 1 es la curva de referencia para el punto de ebullición del agua pura
La curva 2 muestra el perfil de la temperatura a lo largo de una ruta de circulación típica desde la recarga en el punto A hasta la descarga en el punto E, (White, 1973)
Fig I.10.- Modelo de un sistema geotérmico.



Figs 1.11.- Representación esquemática de algunos sistemas geotérmicos

Desgraciadamente no se dispone en la actualidad de técnicas que permitan medir el flujo de calor de origen convectivo en la corteza terrestre, sin modificar el régimen convectivo del mismo.

En las rocas sólidas, la conducción térmica es débil, ya que en primera aproximación, las rocas se pueden considerar como buenos aislantes térmicos; cuando esté presente la convección, ésta predominará casi siempre sobre la conducción. La transferencia de calor por conducción es un proceso disipativo, mientras que la transferencia de calor por convección puede conducir a acumulaciones anormales de calor, por lo que las cámaras magmáticas forman en la corteza terrestre concentraciones muy importantes, antes de ser refrigeradas hasta la temperatura ambiente.

Una cámara magmática de 10 km de radio y 1 km de espesor, contiene ≈ $1{,}5.10^{15}$ kg de magma a 1200°C, a una profundidad de 10 km en la corteza (donde la temperatura es del orden de los 300°C), representa una reserva de energía del orden de 6.10^{20} calorías ó 7.10^{4} GW.

La disipación de esta energía se efectuará a lo largo de algunas decenas de miles de años. Esto explica las anomalías del flujo geotérmico en las regiones de origen volcánico, en donde el gradiente geotérmico puede alcanzar un valor doble del valor normal indicado anteriormente. Es interesante comparar el flujo geotérmico con el flujo solar correspondiente al Sol en su cenit y un cielo brillante; se encuentra:

$$\frac{Flujo\ geotérmico}{Flujo\ solar} = \frac{60{,}6.10^{-3}}{10^{3}} = \frac{1}{16500}$$

resultado que indica que el flujo geotérmico es muy débil comparado con el solar, lo que condiciona fuertemente la utilización de las fuentes geotérmicas.

La diferencia con la energía solar radica en que aparte de ser ésta inagotable a la escala de la humanidad, el flujo geotérmico es mucho más débil con relación al flujo solar.

Las zonas de gradiente térmico anómalo, Fig I.4, suelen presentar unas manifestaciones superficiales que facilitan su localización, como:

- *Vulcanismo reciente*
- *Alteraciones hidrotermales*
- *Emanación de gases y vapores*
- *Fuentes termales y minerales*
- *Anomalías térmicas superficiales, etc.*

I.4.- YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS

Un sistema geotérmico es *agua convectiva en la corteza superior de la Tierra que, en un espacio confinado, transfiere calor desde una fuente térmica hasta la superficie libre*

Los sistemas geotérmicos se pueden encontrar:

a) En regiones con un gradiente geotérmico normal o ligeramente superior que se caracterizan por bajas temperaturas, normalmente inferiores a 100°C, a profundidades de (2-3 km)

b) En las regiones que rodean los bordes de las placas, donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio, de forma que las temperaturas cubren un amplio rango desde las más bajas hasta los 400°C.

Un yacimiento geotérmico esta constituido por tres elementos principales:

- *Una fuente de calor que puede ser una intrusión magmática a muy alta temperatura superior a 600°C,*

emplazada a profundidades de 5 a 10 km

- Un volumen de rocas calientes permeables del que el agua circundante extrae el calor, que está cubierto por rocas impermeables y conectado a una zona de recarga superficial a través de la cual el agua meteórica reemplaza al agua geotérmica que escapa a través de las fuentes termales o que es extraída mediante pozos

- Un fluido geotérmico que es el medio que transfiere el calor; en la mayoría de los casos es agua de origen meteórico, en fase líquida o en fase vapor, dependiendo ésto de su temperatura y presión, que a menudo contiene sustancias químicas y gases disueltos

Por lo tanto, un yacimiento geotérmico se puede considerar como un volumen de roca con temperatura anormalmente elevada para la profundidad a que se encuentra, susceptible de ser recorrido por una corriente de agua que puede absorber y transportar calor a la superficie.

Los sistemas hidrotérmicos se pueden clasificar en la siguiente forma:

a) Según su entalpía.- Es el criterio más común utilizado para clasificar los recursos geotérmicos, por cuanto la entalpía de los fluidos geotérmicos que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie, se puede considerar más o menos proporcional a la temperatura; el concepto de entalpía se utiliza para dar una idea del contenido de energía térmica de los fluidos proporcionando datos sobre su calidad.

Los recursos geotérmicos se dividen en yacimientos de $\begin{cases} \text{- baja entalpía: } T < 100^{\circ}C \\ \text{- media entalpía: } 100^{\circ}C < T < 150^{\circ}C \\ \text{- alta entalpía: } T > 150^{\circ}C \end{cases}$

b) Según el estado físico del agua.- Los más interesantes son:

- Agua líquida con temperaturas comprendidas entre $40 \div 400^{\circ}C$ y presiones entre $3 \div 10\ kg/cm^2$

- Sistemas con predominio de vapor de alta entalpía, escasos pero importantes; poseen un contenido energético del orden de 600 Kcal/kg

c) Sistemas con predominio de agua.- Contienen muchas impurezas; su entalpía es del orden de $200 \div 400$ Kcal/kg; las investigaciones actuales se ocupan, entre otros aspectos, de los métodos de perforación, y técnicas de fractura y circulación del agua.

d) Sistemas geopresurizados.- El fluido soporta parte del peso de las rocas superiores, estando por lo tanto, a gran presión. Contienen energía almacenada en forma de calor, presión hidrostática y metano. En épocas geológicas anteriores se depositaron agua y materias orgánicas bajo mantos de pizarra y estas materias orgánicas se han transformado en gas natural o metano; estas fuentes geopresurizadas tienen temperaturas del orden de $100 \div 180^{\circ}C$ a profundidades de $2 \div 6$ km. La presión en estos depósitos es mucho mayor que la originada por el efecto hidrostático a esa profundidad, que llega a ser del orden de 700 atm; aunque se realizan investigaciones en este campo, no se espera que en un futuro cercano se utilice la energía geopresurizada a gran escala.

e) Sistemas de roca caliente.- En este caso, se bombea agua a alta presión a través de pozos

hasta un sistema de rocas calientes y compactas, causando así su *fracturamiento hidráulico*. El agua circula en estas fracturas artificiales, extrayendo el calor de la roca circundante que actúa como una reserva natural que, posteriormente, es alcanzada por un segundo pozo que se emplea para extraer el agua calentada.

El sistema consiste en un pozo de inyección que se utiliza para el fracturamiento hidráulico a través del cual se inyecta el agua fría, la reserva artificial y el pozo de extracción de agua caliente. Todo el sistema, junto con la planta de utilización en la superficie del terreno conforma un circuito cerrado.

También pueden tener un intercambiador de calor en el fondo del pozo, de forma que el fluido de trabajo recibe calor de la roca caliente, Fig II.10, y lo envía al exterior.

I.5.- PUESTA A PUNTO DE LA GEOTERMIA

De todos los elementos que constituyen un yacimiento geotérmico la fuente de calor es el único que debe ser natural. Los otros dos elementos pueden ser artificiales ya que los fluidos geotérmicas extraídos del yacimiento para accionar una turbina en una planta geotermoeléctrica, después de su utilización pueden ser reinyectados al yacimiento geotérmico mediante pozos de inyección; de este modo, a la recarga natural del yacimiento geotérmico se la integra una recarga artificial. Durante muchos años la reinyección se ha empleado en varias partes del mundo como una forma de reducir el impacto ambiental de las plantas geotérmicas mediante pozos de reinyección que también ayudan a la recuperación y mantenimiento de campos geotérmicos viejos o agotados.

El fundamento de la explotación de un yacimiento geotérmico consiste en lo siguiente:

- *Mediante un equipo de sondeo se extrae agua caliente del pozo geotérmico, por encima de los 70°C*
- *Se refrigera a temperaturas entre 10÷40°C en un intercambiador, según proceda*
- *El caudal promedio mínimo tiene que ser del orden de 100 m^3 por hora*

No conviene devolver a un río, o al mar, tal cantidad de agua, la mayor parte de las veces salada, por lo que se procede a su reinyección en el depósito geotérmico, para así mantener la presión en la masa de agua profunda, lo que origina una mejor utilización del depósito geotérmico, ya que supone la recuperación del calor almacenado en la roca depósito y en las paredes de la misma. Supondremos en primer lugar que se reinyecta el agua en el mismo lugar de donde fue extraída; si se considera un cilindro de rocas de 100 m de altura correspondiente al espesor medio de las capas de un determinado lugar y 1 m^2 de sección transversal (100 m^3 de volumen) y se admite que la roca tiene un 15% de porosidad, es decir, que el volumen en cuestión contiene 15 m^3 de agua, la cantidad de calor restituida por el agua, refrigerada por ejemplo de 70÷10°C es:

$$Q = m\, c_p \Delta T = (15.10^3)\ kg\ agua \times 1\ \frac{Kcal}{kg\ ºC} \times (70 - 10)ºC = 9.10^5\ \frac{Kcal}{m^2}$$

El tiempo al cabo del cual el flujo geotérmico recupera la temperatura inicial de esta reserva de agua es, teóricamente, de:

$$\frac{9.10^5}{1,45.10^{-5}} = 6,2.10^{10}\ segundos \approx 2000\ años$$

y aunque este cálculo no es más que una aproximación grosera, por cuanto no se ha reinyectado el agua en los puntos de extracción, y que todos los elementos de la masa no se comportan como el cilindro elegido, sin embargo, el orden de magnitud así encontrado es importante, e indica que la geotermia es una fuente de energía agotable, similar a la del petróleo, con la diferencia de que su utilización como yacimiento activo sólo es posible durante un tiempo del orden de un siglo, y será preciso esperar dos milenios para que la reserva se reconstruya.

Sólo el paso del tiempo permitirá el almacenamiento del calor en la roca porosa y sólo el tiempo permitirá la reconstrucción de esta reserva de calor después de su agotamiento.

I.6.- DOBLETE HIDROTÉRMICO

El método más elemental utilizado en la práctica para aprovechar la energía geotérmica, es el doblete hidrotérmico, que consiste en hacer dos perforaciones con técnicas similares a las que se utilizan en la explotación petrolífera. Para obtener un caudal del orden de 100 m^3/hora, se considera normalmente una separación entre los puntos de perforación, que oscila desde algunos cientos de metros, hasta 1 km. El agua asciende por el pozo de extracción debido a la presión que posee, aunque a veces es necesario recurrir a un bombeo complementario mediante bombas sumergidas; en este proceso hay que tener previsto también otro bombeo complementario para favorecer la reinyección, Fig I.12.

El cálculo del doblete hidrotérmico es una operación compleja; la distancia d en metros entre los puntos de perforación no puede ser cualquiera, y se puede determinar por la expresión:

$$d = \sqrt{\frac{17520\ G\ \Delta t}{\{\Phi + (1 - \Phi)\ \frac{\rho_R\ c_{pR}}{\rho_F\ c_{pF}}\}\ h + \sqrt{\{\Phi + (1 - \Phi)\ \frac{\rho_R\ c_{pR}}{\rho_F\ c_{pF}}\}^2 h^2 + 6,31 \times 10^3\ \frac{k_R\ \rho_R\ c_{pR}\ \Delta t}{\rho_F\ c_{pF}}}}}$$

en la que:

h es la altura del acuífero en metros

G es el caudal de extracción, igual al de inyección en m^3/hora

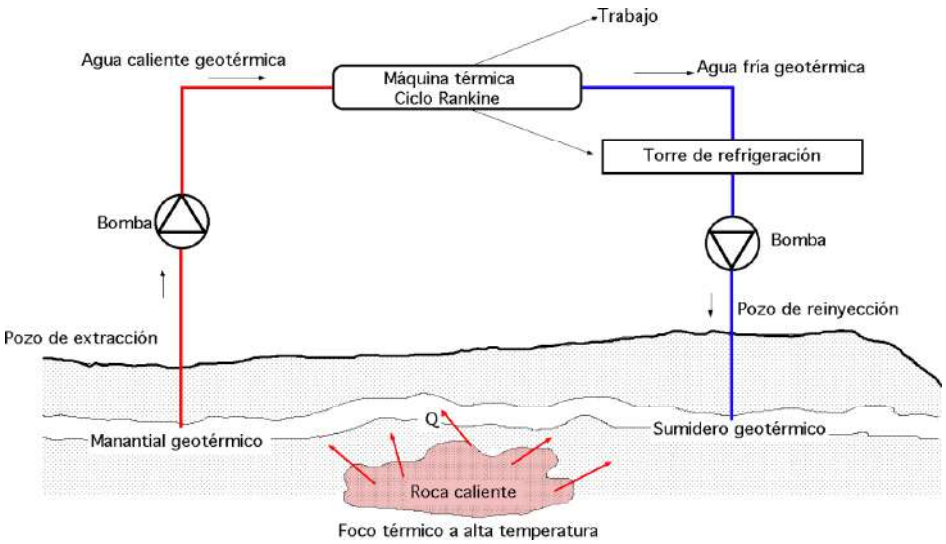
Δt es la duración de la vida del doblete

Φ es el porcentaje de porosidad eficaz del acuífero

$(\rho_F\ c_{pF})$ es la capacidad calorífica del agua = 1 cal/cm^3°C

$(\rho_R\, c_{pR})$ *es la capacidad calorífica de la roca = 0,5 cal / cm³°C*

k_R *es la conductividad térmica de las paredes = 0,6 x* 10^{-3} *cal / cm.seg°C*



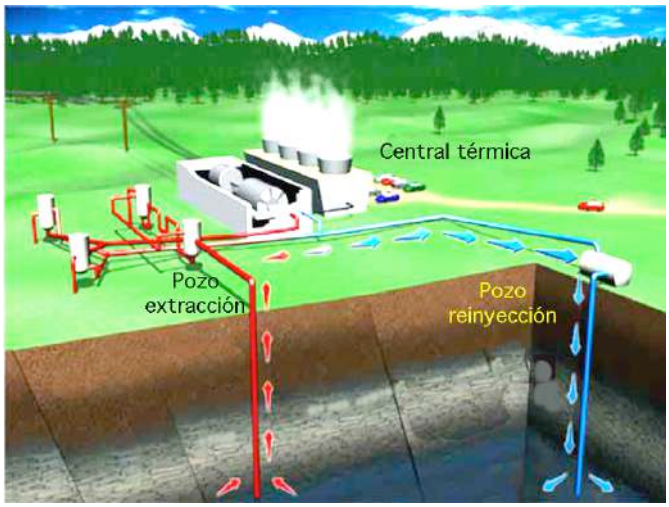


Fig I.12. Esquemas de una instalación geotérmica, con los pozos de extracción e inyección

Si se considera un tiempo base de explotación de 30 años:

$$d = 37\sqrt{G} \;\Rightarrow\; para: \begin{cases} G = 100\ m^3/hora \;\Rightarrow\; d = 370\ m \\ G = 225\ m^3/hora \;\Rightarrow\; d = 555\ m \end{cases}$$

fórmula que no tiene en cuenta la diferencia de viscosidades entre el agua inyectada y el agua extraída.

Expresiones más complicadas tienen en cuenta otros factores debidos a:

- *Las variaciones de presión en los pozos de inyección y extracción*
- *La pérdida de carga en las tuberías y maquinaria*
- *La presión hidrodinámica del caudal, etc*

En el caso de un doblete de perforaciones aisladas, el tiempo que estará fluyendo será función del que tarde el agua fría que se reinyecta en llegar al punto de extracción, siendo proporcional a:

- El cuadrado de la distancia d entre la extracción y la reinyección

- La altura útil del acuífero h

e inversamente proporcional al caudal G bombeado y de inyección.

También depende de la cantidad de calor intercambiado con las paredes del acuífero.

La distancia entre perforaciones, a temperatura constante, se puede determinar también con la ayuda del ábaco que se presenta en la Fig I.13, que se ha construido manteniendo los parámetros térmicos anteriormente indicados correspondientes a un yacimiento ficticio; para su utilización hay que partir de las siguientes consideraciones:

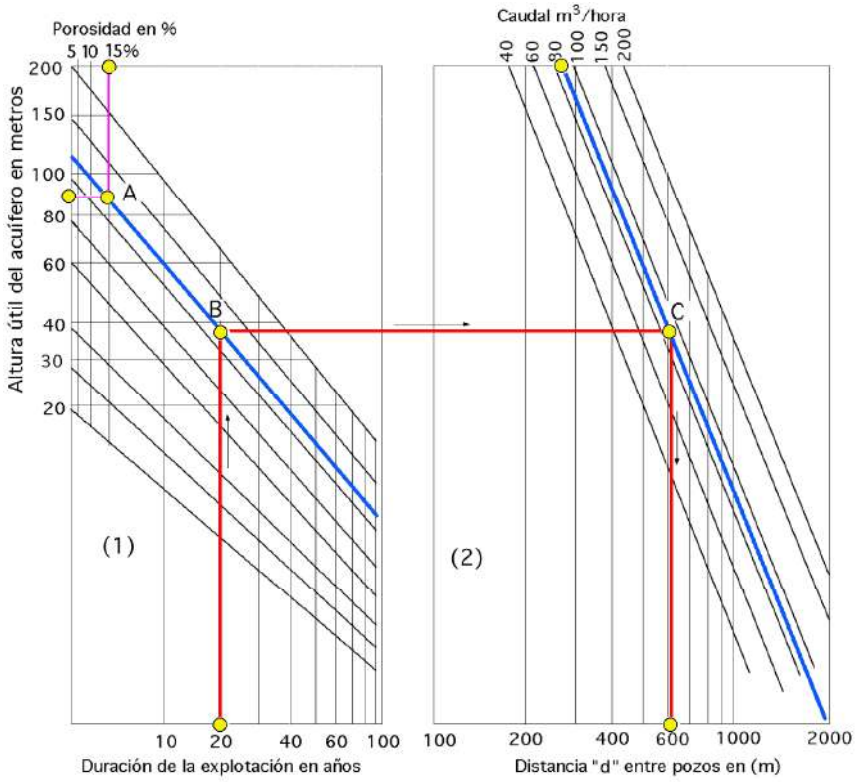


Fig I.13.- Ábaco para el cálculo de la distancia de los pozos de un doblete hidrotérmico

a) El conocimiento de la altura útil h del acuífero en metros (no la profundidad a que se encuentra), y de la porosidad Φ en%, permite determinar el punto de partida A en el primer ábaco

b) A continuación se determina en el mismo ábaco el punto B como intersección de la recta AB con la vertical definida por la duración de la explotación en años

c) Sobre el segundo ábaco se determina el punto C como intersección de la línea que define el caudal a extraer y a inyectar en m^3/hora con la horizontal por B, cuya vertical determina la distancia d entre perforaciones

Operando en sentido inverso se puede encontrar la duración de explotación del doblete a partir de la distancia entre las perforaciones.

Por ejemplo, si se desea una duración de explotación de 20 años a temperatura constante, con un caudal de trasvasamiento y de inyección igual a 90 m^3/hora, en un acuífero que tiene un espesor útil de 100 m y una porosidad del 15%, la distancia entre los pozos no debe ser inferior a los 600 m.

El ábaco presentado no sirve si el número de perforaciones es superior a dos.

Según lo dicho se podría extraer agua caliente a 70°C durante 30 años; a continuación ésta se iría mezclando más y más con el agua fría reinyectada, pero la utilización del depósito geotérmico sería todavía posible durante otros 30 años más, aunque a temperaturas más bajas. La duración de la explotación del doblete hidrotérmico sería, en total, del orden de 60 años, para una superficie de la capa acuífera del orden de 4 km^2, y podría calentar según su rendimiento un grupo de 1000÷2000 viviendas.

Disposición de los pozos.- Para el caso en que existan más de 2 perforaciones se utilizan modelos numéricos de simulación que permiten determinar la mejor disposición de los pozos para una recuperación óptima de la energía calorífica contenida en el acuífero y calcular la evolución de la temperatura en los pozos de extracción.

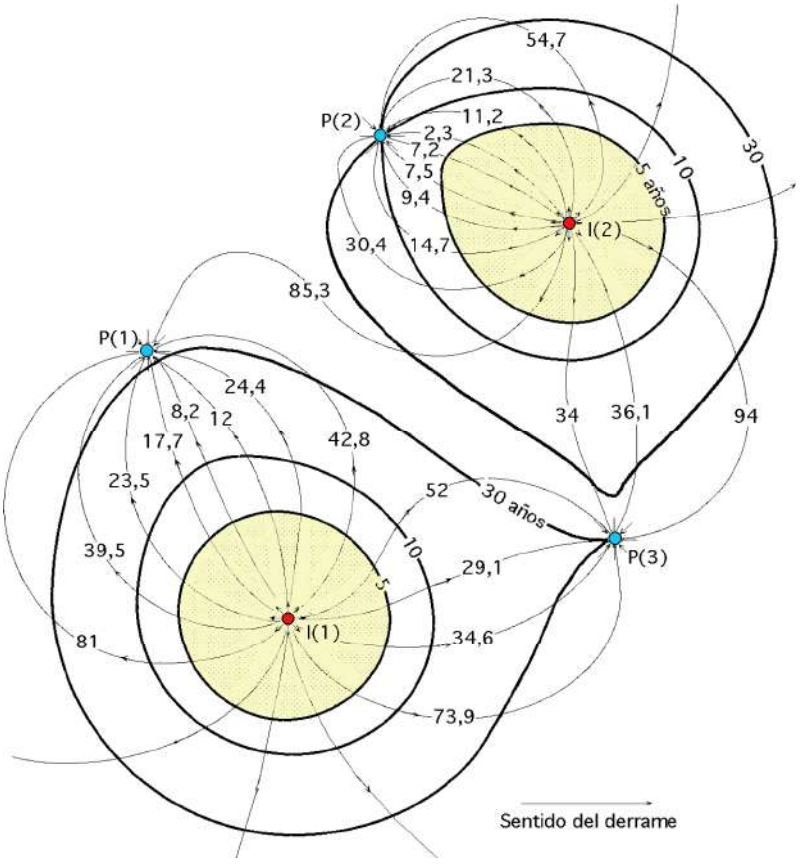


Fig I.14.- Evolución de los frentes térmicos a partir de los puntos de inyección

En la Fig I.14 se representa un esquema ficticio para 3 pozos de extracción P_1, P_2 y P_3 y 2 pozos de inyección I_1 e I_2. El agua geotérmica extraída por los pozos de extracción se reinyecta en el acuífero, refrigerada, a través de los pozos de inyección, creándose alrededor de ellos un sumidero frío que se extiende progresivamente hacia los puntos de extracción, (manantial). Las posiciones de los frentes térmicos a los 5 años, 10 años y 30 años, provenientes de los pozos de inyección, así como las líneas de corriente (líneas a trazos) se indican en la Fig I.14; los tiempos indicados son el dato que proporciona la llegada de la línea de corriente considerada a los pozos de extracción.

De todo ésto se deduce que la geotermia no es una fuente energética que se pueda ampliar a voluntad, por cuanto aunque en su aprovechamiento se utilizan técnicas convencionales que no presentan mayores problemas, es preciso recurrir a una adecuada gestión de la masa del acuífero afectado, ya que si se pretende modificar las condiciones impuestas para la duración de su explotación, o la distancia entre los pozos, para así poder extraer un mayor caudal, aparecen otros factores que limitan el punto superior de funcionamiento, (por lo que no es posible ni física ni económicamente hacer viable la obtención de un caudal mayor fuera de los límites impuestos), tales como:

- *Las propias transmisiones y comunicaciones del acuífero*
- *La presión de fractura que limita la presión de reinyección, ya que si se sobrepasa dicha presión de fractura, se corre el riesgo de provocar filtraciones y comunicaciones rápidas entre el pozo de extracción y el pozo de reinyección, así como el dirigir muy rápidamente el agua refrigerada hacia los pozos de extracción*
- *La calidad y tecnología de los materiales de bombeo que limitan tanto el caudal a inyectar, como la altura de carga*

Estas consideraciones conducen a definir para una situación dada, un caudal maximal que viene a ser del orden de $150 \div 180$ m^3/hora

I.7.- IMPACTO AMBIENTAL

No hay forma de producir y transformar la energía a otras formas que sea utilizable por el hombre sin ocasionar algún impacto directo o indirecto sobre el ambiente. La explotación de la energía geotérmica también tiene un impacto sobre el ambiente, pero sin duda es una de las formas de energía menos contaminante.

Fuentes de contaminación.- En la mayoría de los casos el grado con que la explotación geotérmica afecta el ambiente es proporcional a la magnitud de su explotación. La generación de electricidad en plantas de ciclo binario afecta el ambiente en la misma forma que los usos directos del calor. Los efectos se potencian en el caso de plantas eléctricas convencionales de contrapresión o de condensación, especialmente respecto de la calidad del aire, pero se pueden mantener dentro de límites aceptables. Cualquier modificación del medio ambiente se debe evaluar cuidadosamente, de acuerdo con las disposiciones legales, (que en algunos países son muy severas), pero también debido

al hecho de que una aparentemente modificación insignificante podría provocar una cadena de sucesos cuyo impacto sería difícil de evaluar y prevenir. Por ejemplo, un incremento de $2 \div 3°C$ en la temperatura de evacuación del agua de deshecho de una planta puede dañar su ecosistema, de forma que las plantas y organismos animales que son más sensibles a las variaciones de temperaturas podrían desaparecer.

El primer efecto perceptible sobre el ambiente es el de la perforación, ya sea de pozos simples para medir el gradiente geotérmico en la fase de estudio o de pozos de producción. La instalación de la maquinaria de sondeo y la plataforma de perforación, requieren de una superficie de $300 \div 500$ m^2 para una pequeña sonda montada en camión (profundidad máxima de $300 \div 700$ m), o de $1200 \div 1500$ m^2 para una sonda mediana (profundidad máxima de 2000 m). Estas operaciones modifican la morfología superficial de la zona y podrían dañar las plantas y la vida silvestre local.

Los reventones de los pozos pueden contaminar el agua superficial. Durante la perforación o las pruebas de flujo se pueden descargar a la atmósfera gases no deseados. Los impactos sobre el medio ambiente causados por el sondeo terminan una vez que estos se completan. La instalación de las tuberías que transportarán los fluidos geotérmicas y la construcción de la planta de utilización, también afectan a las plantas y animales y a la morfología del terreno. El paisaje se modifica, aunque ésto a veces tiene su atractivo, como en Larderello, en donde las redes de tuberías que cruzan el paisaje y las torres de refrigeración de las plantas eléctricas, se han convertido en una parte integral del panorama e incluso constituyen una atracción turística.

Otros problemas ambientales surgen durante el funcionamiento de la instalación. Los fluidos geotérmicas (vapor o agua caliente) normalmente contienen gases como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoniaco, metano y trazas de otros gases, y también determinados elementos químicos disueltos cuyas concentraciones aumentan con la temperatura, como cloruro de sodio, boro, arsénico y mercurio, que si se descargan a la atmósfera son una fuente de contaminación. Otros fluidos geotérmicas, como por ejemplo los utilizados en calefacción en Islandia, son aguas potables, pero esto es muy raro. Las aguas de deshecho de las planas geotérmicas tienen también una mayor temperatura que la del ambiente y por lo tanto constituyen una potencial contaminación termal.

La contaminación del aire puede ser un problema cuando se genera electricidad mediante plantas eléctricas convencionales, siendo el sulfuro de hidrógeno uno de los principales contaminantes. El umbral de olor para este gas en el aire es del orden de 5 partes por billón en volumen; concentraciones ligeramente superiores pueden causar ciertos efectos fisiológicos leves, aunque se pueden adoptar varios procesos para reducir las emisiones de este gas.

El CO_2 está también presente en los fluidos utilizados en las plantas geotermoeléctricas, en las que se descarga mucho menos CO_2 (entre $13 \div 380$ gramos/kW), que en las plantas alimentadas por combustibles fósiles, (1042 g/kW de las plantas de gas natural); las plantas de ciclo binario para ge-

neración eléctrica y las de calefacción urbana también pueden ocasionar algunos problemas, que se anulan adoptando sistemas de circuito cerrado que evitan las emisiones gaseosas.

La descarga de aguas de deshecho es también una potencial fuente de contaminación química; el empleo de fluidos geotérmicas con altas concentraciones de constituyentes químicos tales como boro, flúor o arsénico requiere que estos fluidos sean tratados y/o reinyectados en el yacimiento.

Los fluidos geotérmicos de baja y moderada temperatura utilizados en la mayoría de las aplicaciones de uso directo generalmente tienen bajos niveles de productos químicos disueltos y la descarga de los fluidos empleados es rara vez un problema mayor; algunos de estos fluidos a menudo se pueden descargar a las aguas superficiales una vez enfriados. Las aguas se deben enfriar en piletas o estanques especiales de almacenamiento para evitar modificaciones en el ecosistema (ríos, lagos, mar).

Tabla I.1. Potencial geotérmico mundial (International Geothermal Association, 2001)

Tipo de recurso	*Continente*						
Alta temperatura (electricidad)	*Europa*	*Asia*	*África*	*América N.*	*Amér. latina*	*Oceanía*	*Total*
Tec. convencional en 10^6 MWe/año	*1830*	*2970*	*1220*	*1330*	*2800*	*1050*	*11200*
Tec. convenc. y binaria en 10^6 MWe/año	*3700*	*5900*	*2400*	*2700*	*5600*	*2100*	*22400*
Baja temperatura, uso directo (MWt/año)	*> 370*	*> 320*	*> 240*	*> 120*	*> 240*	*> 110*	*>1400*

Tabla I.2. Países con mayor potencial geotérmico para generación de electricidad (2006)

País	*USA*	*Filipinas*	*México*	*Indonesia*	*Italia*	*Japón*	*N. Zelanda*
Potencia instalada MWe	*2564*	*1930*	*953*	*797*	*791*	*535*	*435*
Produc. eléctrica GWh/año	*17917*	*9253*	*6282*	*6085*	*5340*	*3467*	*2774*
País	*Islandia*	*Costa Rica*	*El Salvador*	*Kenya*	*Países*	*Total*	
Potencia instalada MWe	*202*	*163*	*151*	*129*	*283*	*8933*	
Produc. eléctrica GWh/año	*1406*	*1145*	*967*	*1088*	*1062*	*56786*	

La extracción de grandes cantidades de fluidos de un yacimiento geotérmico puede ocasionar un gradual hundimiento del terreno, fenómeno que es irreversible pero no catastrófico, ya que es un proceso lento que se distribuye sobre grandes áreas, aunque en algunos años este descenso podría alcanzar niveles desde unos pocos centímetros hasta incluso metros y, por lo tanto, podría afectar a la estabilidad de las construcciones geotérmicas y a algunas edificaciones; ésto se puede evitar o reducir mediante la reinyección de las aguas geotérmicas previamente utilizadas.

La eliminación y/o reinyección de los fluidos geotérmicas puede provocar o aumentar la frecuencia sísmica en ciertas zonas. El ruido asociado al funcionamiento de las plantas geotérmicas puede ser un problema cuando se trata de plantas geotermoeléctricas; durante la fase de producción, el vapor transportado a través de las tuberías y la ocasional descarga de vapor provocan ruido a niveles normalmente aceptables; en las plantas eléctricas la principal contaminación acústica proviene de los ventiladores de las torres de refrigeración, de los inyectores de vapor y de las turbinas; en las aplicaciones directas del calor, el ruido generado es despreciable.