

¿Qué es la Energía Geotérmica?

Mary H. Dickson y Mario Fanelli

Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia

Traducción en español: **Alfredo Lahsen**, Universidad de Santiago, Chile

INTRODUCCIÓN

El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre; en este sentido utilizaremos dicho término.

Antecedentes históricos

La presencia de volcanes, fuentes termales y otros fenómenos termales debieron haber inducido a nuestros ancestros a suponer que partes del interior de la Tierra estaban calientes; sin embargo, no fue hasta un período entre los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a algunos cientos de metros de profundidad, que el hombre dedujo, por simple sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra se incrementaba con la profundidad.

Las primeras mediciones mediante termómetros fueron probablemente realizadas en 1740, en una mina cerca de Belfort, en Francia (Bullard, 1965). Hacia 1870, se utilizaron modernos métodos científicos para estudiar el régimen termal de la Tierra, pero no fue hasta el siglo XX, y el descubrimiento del *calor radiogénico*, que podemos comprender

plenamente tal fenómeno como un balance térmico y la historia térmica de la Tierra. Todos los modelos termales modernos de la Tierra deben, en efecto, tomar en cuenta el calor continuamente generado por el decaimiento de los isótopos radioactivos de larga vida del Uranio (U238, U235), Torio (Th 232) y potasio (K40), presentes en la Tierra (Lubimova, 1968). Además del calor radiogénico, en proporciones inciertas, están otras posibles fuentes de calor como ser la energía primordial de la acreción planetaria. Recién en los años 1980s, se dispuso de teorías realistas de estos modelos, cuando se demostró que no había equilibrio entre el calor radiogénico generado en el interior de la Tierra y el calor disipado al espacio desde la Tierra, y que nuestro planeta esta lentamente enfriándose. Para dar una idea del fenómeno involucrado y su magnitud, citaremos un balance térmico de Stacey y López (1988), en el cual el flujo calórico total de la Tierra se estimó en 42.10^{12} W (conducción, convección y radiación). De este total, 8×10^{12} W provienen de la corteza, la cual representa sólo el 2% del volumen total de la Tierra, pero que es rica en isótopos radioactivos; 32.3×10^{12} W provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen total de la Tierra y 1.7×10^{12} W provienen del núcleo, el cual corresponden al 16% del volumen total y no contiene isótopos radioactivos (Fig. 1). Considerando que el calor radiogénico del manto se estima en 22.10^{12} W, la tasa de enfriamiento de esta parte de la Tierra es $10,3 \times 10^{12}$ W.

Estimaciones más recientes, basadas en un mayor número de datos, indican que el flujo calórico total de la Tierra es alrededor del 6% mayor que el estimado por Stacey y López (1988). Aún así, el proceso de enfriamiento es aún muy lento. La temperatura del manto ha disminuido en no más de 300 a 350°C en tres mil millones de años, quedando a unos 4.000°C en su base. Se ha estimado que el contenido total de calor de la Tierra, calculado

a partir de una temperatura ambiente media estimada en 15°C , es del orden de $12,6 \times 10^{24}$ MJ y que el contenido de calor de la corteza es de unos $5,4 \times 10^{21}$ MJ (Armstead, 1983).

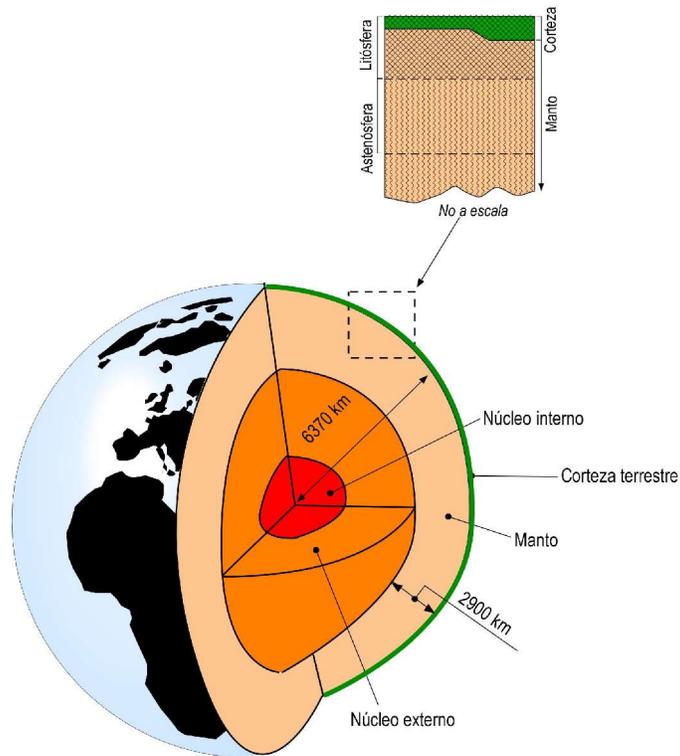


Figura 1

La corteza, manto y núcleo de la Tierra. Arriba a la derecha: una sección a través de la corteza y del manto superior.

La energía térmica de la Tierra es por lo tanto inmensa, pero solo una fracción de ella podría ser utilizada por la humanidad. Hasta ahora la utilización de esta energía ha estado limitada a áreas en las cuales las condiciones geológicas permiten un transporte (agua en la fase líquida o vapor), para “transferir” el calor desde zonas calientes profundas hasta o cerca de la superficie, dando así origen a los recursos geotérmicos; sin embargo, en el futuro cercano técnicas innovativas podrían brindar nuevas perspectivas a este sector.

En muchos casos, las aplicaciones prácticas preceden a la investigación científica y a los desarrollos tecnológicos, la energía geotérmica es un buen ejemplo de esto. A comienzos

del siglo XIX los fluidos geotermales fueron explotados por su contenido energético. En ese período se instaló en Italia una industria química (en la zona actualmente conocida como Larderello), para extraer el ácido bórico de las aguas calientes boratadas que emergían naturalmente o bien, de pozos perforados con ese objeto. El ácido bórico se obtenía mediante evaporación de las aguas boratadas en bateas de fierro, usando como combustible la madera de los bosques de los alrededores. En 1827 Francisco Larderel, 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 (Figura 2).

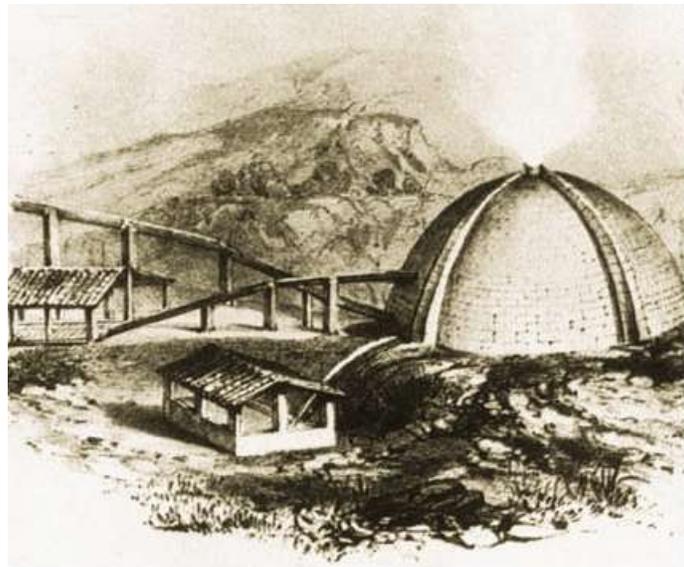


Figura 2

La “laguna cubierta” utilizada en la primera mitad del siglo XIX en el área de Larderello, Italia para coleccionar las aguas calientes boratadas y extraer el ácido bórico.

La explotación del vapor natural por su energía mecánica empezó ese mismo tiempo. El vapor geotérmico se utilizó para elevar líquidos en primitivos elevadores por presión de

gas y más tarde en bombas recíprocas y centrífugas y en poleas, todo lo cual fue utilizado en las perforaciones o en la industria local de ácido bórico. Entre 1850 y 1875 la planta de Larderello mantuvo en Europa el monopolio de la producción de ácido bórico. Entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión fue utilizado para calefaccionar invernaderos, edificios industriales y residenciales, en esta parte de Toscana. Otros países también empezaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escala industrial. En 1892 entró en operaciones el primer sistema distrital de calefacción geotermal, en Boise, Idaho (USA). En 1928 Islandia, otro país pionero en la utilización de la energía geotérmica, también inicio la explotación de sus fluidos geotermales (principalmente agua caliente) para calefacción doméstica.

En 1904 se llevo a cabo el primer intento de generar electricidad a partir de vapor geotérmico; nuevamente, esto tuvo lugar en Larderello (Fig. 3).

El éxito de estas experiencias fue una clara demostración del valor industrial de la energía geotérmica y marcó el comienzo de una forma de explotación que se ha desarrollado significativamente desde entonces. La generación de electricidad en Larderello fue un suceso comercial. En 1942 la capacidad geotermoelectrica instalada alcanzaba los 127.650 kW_e pronto, varios países siguieron el ejemplo de Italia; en 1919 los primeros pozos geotermales de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados The Geysers, California, USA, y en el Tatio, Chile. En 1958 entra en operación una pequeña planta geotermoelectrica en Nueva Zelanda, en 1959 otra en México, en 1960 en USA, seguidos por otros países en los años siguientes.

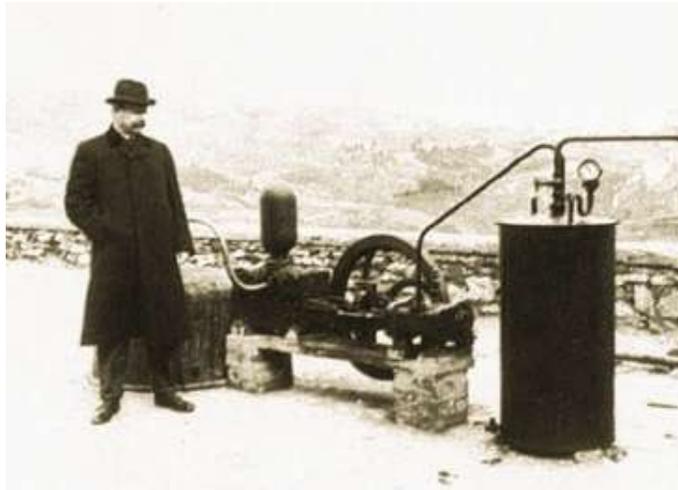


Figura 3

La máquina usada en Larderello en 1904 en la primera experiencia de generación de energía eléctrica mediante vapor geotérmico, con su inventor, el Príncipe Piero Ginori Conti.

Estado Actual de la Utilización Geotérmica

Después de la Segunda Guerra Mundial muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica, considerándola económicamente competitiva respecto de otras fuentes energéticas. Esta no requiere ser importada y, en algunos casos, es la única fuente de energía localmente. Los países que utilizan la energía geotérmica para generar electricidad aparecen en la Tabla 1, la cual incluye la capacidad eléctrica instalada en 1995 (6.833 MW_e), en 2.000 (7.974 MW_e), y el incremento entre 1995 y el año 2000 (Huttrer , 2001). La misma Tabla también reporta la capacidad total instalada a comienzos de 2003 (9.028 MW_e). La capacidad instalada en países en vía de desarrollo en 1995 y 2000 representa un 38 y un 47% del total mundial respectivamente.

La utilización de la energía geotérmica en países en vía de desarrollo muestra una interesante tendencia a través de los años. En los 5 años comprendidos entre 1975 y 1979

la capacidad geotermoelectrica instalada en tales países aumentó de 75 a 462 MW_e); a fines del siguiente período de 5 años (1984) se habían alcanzado los 1.495 MW_e, mostrando una tasa de incremento durante estos 2 períodos de 500% y 223% respectivamente (Dickson y Fanelli, 1988). En los siguientes diez y seis años, de 1984 al 2000, hubo un incremento de casi 150%. La geotermoelectricidad juega un rol bastante significativo en el balance energético de algunas áreas; por ejemplo, en 2001 la energía eléctrica producida mediante recursos geotérmicos representó el 27% de la electricidad total generada en Filipinas, el 12,4% en Kenia, el 11,4% en Costa Rica y el 4,3% en el Salvador.

En cuanto a los *usos no eléctricos* de la energía geotérmica, la Tabla 2 muestra la capacidad instalada (15.145 MW_t) y la energía utilizada (199.699 TJ/año) en el mundo durante el año 2000. Ese mismo año, 58 países informaron acerca de usos directos, en comparación con los 24 países que informaron en 1985, y los 28 países en 1995. El número de países que utiliza en forma directa la energía geotérmica se incrementa desde entonces, como también la capacidad total instalada y la energía utilizada.

El uso no eléctrico más común en el mundo (en términos de capacidad instalada) corresponden a bombas de calor (34,80%), seguido de baños (26,20%), calefacción (21,62%), invernaderos (8,22%), acuicultura (3,93%) y procesos industriales (3,13%) (Lund y Freeston, 2001).

Tabla 1. Capacidades de generación geotermal instaladas en el mundo desde 1995 a 2000 (Huttrer, 2001), y al comienzo del 2003

Pais	1995 (MW _e)	2000 (MW _e)	1995-2000 (incremento in MW _e)	% incremento (1995-2000)	2003 (MW _e)
Argentina	0.67	-	-	-	-
Australia	0.15	0.15	-	-	0.15

Austria	-	-	-	-	1.25
China	28.78	29.17	0.39	1.35	28.18
Costa Rica	55	142.5	87.5	159	162.5
El Salvador	105	161	56	53.3	161
Ethiopia	-	7	7	-	7
France	4.2	4.2	-	-	15
Germany	-	-	-	-	0.23
Guatemala	-	33.4	33.4	-	29
Iceland	50	170	120	240	200
Indonesia	309.75	589.5	279.75	90.3	807
Italy	631.7	785	153.3	24.3	790.5
Japan	413.7	546.9	133.2	32.2	560.9
Kenya	45	45	-	-	121
Mexico	753	755	2	0.3	953
New Zealand	286	437	151	52.8	421.3
Nicaragua	70	70	-	-	77.5
Papua New Guinea	-	-	-	-	6
Philippines	1227	1909	682	55.8	1931
Portugal	5	16	11	220	16
Russia	11	23	12	109	73
Thailand	0.3	0.3	-	-	0.3
Turkey	20.4	20.4	-	-	20.4
USA	2816.7	2228	-	-	2020
Total	6833.35	7972.5	1728.54	16.7	8402.21

Tabla 2. Usos no eléctricos de la energía geotérmica en el mundo (2000): energía térmica instalada (en MWt) y uso de la energía (en TJ/año). Tomado de Lund y Freeston, (2001)

Pais	Energía térmica instalada (MW _t)	Energía (TJ/ año)
Algeria	100	1586
Argentina	25.7	449
Armenia	1	15
Australia	34.4	351
Austria	255.3	1609
Belgium	3.9	107
Bulgaria	107.2	1637
Canada	377.6	1023
Caribbean Islands	0.1	1
Chile	0.4	7
China	2282	37 908
Colombia	13.3	266
Croatia	113.9	555
Czech Republic	12.5	128
Denmark	7.4	75

Egypt	1	15
Finland	80.5	484
France	326	4895
Georgia	250	6307
Germany	397	1568
Greece	57.1	385
Guatemala	4.2	117
Honduras	0.7	17
Hungary	472.7	4086
Iceland	1469	20170
India	80	2517
Indonesia	2.3	43
Israel	63.3	1713
Italy	325.8	3774
Japan	1167	26933
Jordan	153.3	1540
Kenya	1.3	10
Korea	35.8	753
Lithuania	21	599
Macedonia	81.2	510
Mexico	164.2	3919
Nepal	1.1	22
Netherlands	10.8	57
New Zealand	307.9	7081
Norway	6	32
Peru	2.4	49
Philippines	1	25
Poland	68.5	275
Portugal	5.5	35
Romania	152.4	2871
Russia	308.2	6144
Serbia	80	2375
Slovak Republic	132.3	2118
Slovenia	42	705
Sweden	377	4128
Switzerland	547.3	2386
Thailand	0.7	15
Tunisia	23.1	201
Turkey	820	15756
United Kingdom	2.9	21
USA*	3766	20302
Venezuela	0.7	14
Yemen	1	15
Total	15145	190699

NATURALEZA DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

La máquina térmica de la Tierra

El *gradiente geotérmico* es el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. A profundidades accesibles mediante perforaciones con tecnología modernas, esto es, sobre 10.000 metros, el gradiente geotérmico promedio es alrededor de 25 a 30 °C/km. Por ejemplo, a temperatura ambiente media anual de 15°C podemos razonablemente asumir una temperatura de 65 a 75°C a 2000 metros de profundidad, 90° a 105°C a 3000 metros de profundidad y así para otros miles de metros. Sin embargo, hay regiones de la Tierra en las cuales el gradiente geotérmico es muy diferente al valor promedio. En áreas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante es rellenada con sedimentos geológicamente “(muy jóvenes)”, el gradiente geotérmico puede ser menor que 1°C/km. Por otra parte, en algunas “áreas geotermales” el gradiente es más de diez veces el valor promedio.

La diferencia de temperatura entre zonas calientes profundas y zonas superficiales más frías genera un flujo conductivo de calor hacia la superficie, tendiendo a crear condiciones uniformes de temperatura, a pesar que a menudo debido a fenómenos naturales esta situación nunca se alcanza. El flujo calórico terrestre promedio en los continentes y en los océanos es de 65 y 101mWm⁻² respectivamente; que considerados arealmente entregan un promedio mundial de 87 mWm⁻² (Pollack et al., 1993). Estos valores se basan en 24.774 mediciones en 20.201 sitios que cubren cerca del 62% de la superficie de la Tierra. Estimaciones empíricas basadas en unidades de mapas geológicos permiten hacer estimaciones de flujo calórico en áreas sin mediciones. La publicación más reciente acerca

de análisis de flujo calórico es de Pollack et al. (1993). La Universidad de North Dakota actualmente proporciona acceso vía internet a una actualizada base de datos de flujo calórico, tanto de áreas oceánicas como de áreas continentales.

El aumento de temperatura con la profundidad, como también los volcanes, los geysers, las fuentes termales etc., constituyen la expresión visible del calor en el interior de la Tierra, también este calor origina otros fenómenos que son menos visible por el hombre; estos fenómenos son de tal magnitud que la tierra ha sido comparada con una inmensa “máquina térmica”. Describiremos en términos simples estos fenómenos, referidos colectivamente como la teoría de Tectónica de Placas” y su relación con los recursos geotérmicos.

Nuestro planeta consiste en una corteza, la cual alcanza un espesor de alrededor de 20 a 65 km. en los continentes y alrededor de 5 a 6 km en los océanos, un manto de unos 2.900 km de espesor y un núcleo de aproximadamente de 3470 km de radio (Figura 1). Las características físicas y químicas de la corteza, manto y núcleo varían desde la superficie de la Tierra hasta su centro. La envoltura más externa de la Tierra, conocida como la litosfera corresponde a la corteza y al nivel superior del manto, su espesor varía de menos 80 km en las zonas oceánicas hasta sobre 200 km en áreas continentales, la litosfera se comporta como un cuerpo rígido. Bajo la litosfera está la zona conocida como astenósfera, de 200 a 300 km de espesor, la cual tiene un comportamiento menos rígido o más plástico que la litosfera, en otras palabras, a escala geológica en la cual el tiempo se mide en millones de años, esta porción de la Tierra se comporta prácticamente, en ciertos procesos, como un fluido.

Debido a la diferencia de temperatura entre los distintos niveles de la astenósfera, se han originado movimientos convectivos y posiblemente celdas de convección, hace algunas decenas de millones de años. Su extremadamente lento movimiento convectivo

(unos pocos centímetros por año), se mantiene mediante el calor producido por el decaimiento de elementos radioactivos y por el calor proveniente de las partes más profundas de la Tierra. Grandes volúmenes de rocas calientes profundas, menos densas y más livianas que el material circundante, ascienden con estos movimientos hacia la superficie, mientras que rocas superficiales más pesadas, densas y frías tienden a hundirse, se recalientan y ascienden a la superficie una y otra vez, en forma muy similar a lo que sucede al agua hirviendo en una caldera.

En aquellas zonas donde la litosfera es más delgada y especialmente en las áreas oceánicas, la litosfera es empujada hacia arriba y quebrada por el material parcialmente fundido muy caliente, que asciende desde la astenosfera, en concordancia con la rama ascendente de las celdas convectivas. Este es el mecanismo que originó y aún origina las *dorsales oceánicas*, que se extienden por más de 60.000 kilómetros debajo de los océanos, emergiendo en algunos lugares (Azores, Islandia) e incluso desplegándose entre continentes, como en el Mar Rojo. Una relativamente pequeña fracción de rocas fundidas que asciende desde la astenosfera emerge en la cumbre de estas dorsales, y en contacto con el agua de 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 pocos centímetros por año. Consecuentemente 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 una simple conclusión: ya que no hay un incremento de la superficie de la Tierra a través del tiempo, la formación de nueva litósfera 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. Esto realmente sucede en las *zonas de subducción*, la mayoría de las cuales están representadas por inmensas fosas oceánicas, como aquellas que se extienden a lo largo del 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 “digerida” por el manto y el ciclo se reinicia nuevamente. Parte del material litosférico vuelve al estado fundido y puede ascender hacia la superficie a través de facturas 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 márgenes continentales los arcos magmáticos consisten en cadenas de montañas con numerosos volcanes, como en los Andes. La figura 4 ilustra este fenómeno.

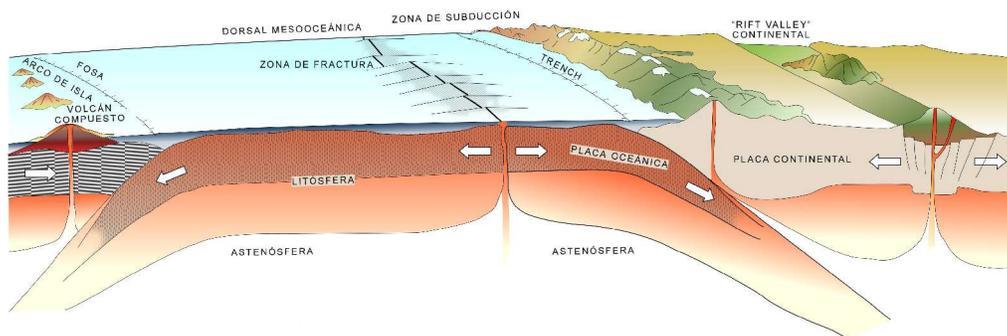


Figura 4

Perfil esquemático mostrando los procesos de tectónica de placas.

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 varias otras placas más pequeñas (Figura 5). Debido a las enormes tensiones generadas por la máquina termal de la Tierra y la asimetría de las zonas que generan y consumen material litosférico, estas placas derivan lentamente unas respecto de otras, cambiando continuamente de posición. Los márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo calórico terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Como se muestra en la Figura 5, las áreas geotermales más importantes se ubican alrededor de los márgenes de placas.



Figura 5

Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas, zonas de subducción y campos geotérmicos. Las flechas muestran la dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción 1) Campos geotérmicos que producen electricidad; 2) Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes (largas fracturas transversales); 3)

Zona de subducción, donde la placa subducida se inclina hacia abajo y se funde en la astenosfera

Sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos pueden por lo tanto encontrarse en regiones, con un gradiente geotérmico normal o levemente superior, especialmente en regiones alrededor de los márgenes de placas, donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio. En el primer caso, los sistemas se caracterizarán por bajas temperaturas, normalmente inferiores a 100°C, a profundidades económicamente alcanzables (2-3 km); en el segundo caso las temperaturas podrían cubrir un amplio rango, desde bajas hasta muy altas e incluso sobre 400°C.

¿Qué es un sistema geotérmico? y que ocurre en tal sistema? Puede ser descrito esquemáticamente como *“agua convectiva en la corteza superior de la Tierra la cual, en un espacio confinado, transfiere calor desde una fuente de calor hasta una abertura de calor, usualmente la superficie libre”* (Hochstein, 1990). Un sistema geotérmico está constituido por 3 elementos principales: una fuente de *calor*, un *reservorio* y un *fluido*, el cual es el medio que transfiere el calor. La fuente de calor puede ser tanto una intrusión magmática a muy alta temperatura (> 600°C), emplazada a profundidades relativamente someras (5-10 km) o bien, como en sistemas de baja temperatura donde el gradiente geotérmico normal el calor. El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen el calor. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables y está conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua meteorica puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos. El fluido geotermal es agua en la mayoría de

los casos de origen meteorico, ya sea en la fase líquida o en la fase vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Esta agua a menudo contiene sustancias químicas disueltas y gases tales como CO₂, H₂S, etc. La Figura 6 es una representación muy simplificada de un sistema geotérmico ideal.

El mecanismo que sustenta los sistemas geotérmicos está controlado fundamentalmente por *convección de fluidos*. La figura 7 describe esquemáticamente el mecanismo en el caso de un sistema hidrotermal de temperatura intermedia. La convección tiene lugar debido al calentamiento y a la consecuente expansión térmica de los fluidos; el calor, que es suministrado en la base del sistema de circulación, es la energía que acciona el sistema. El fluido calentado de menor densidad tiende a ascender y a ser reemplazado por fluido frío de mayor densidad, proveniente de los márgenes del sistema.

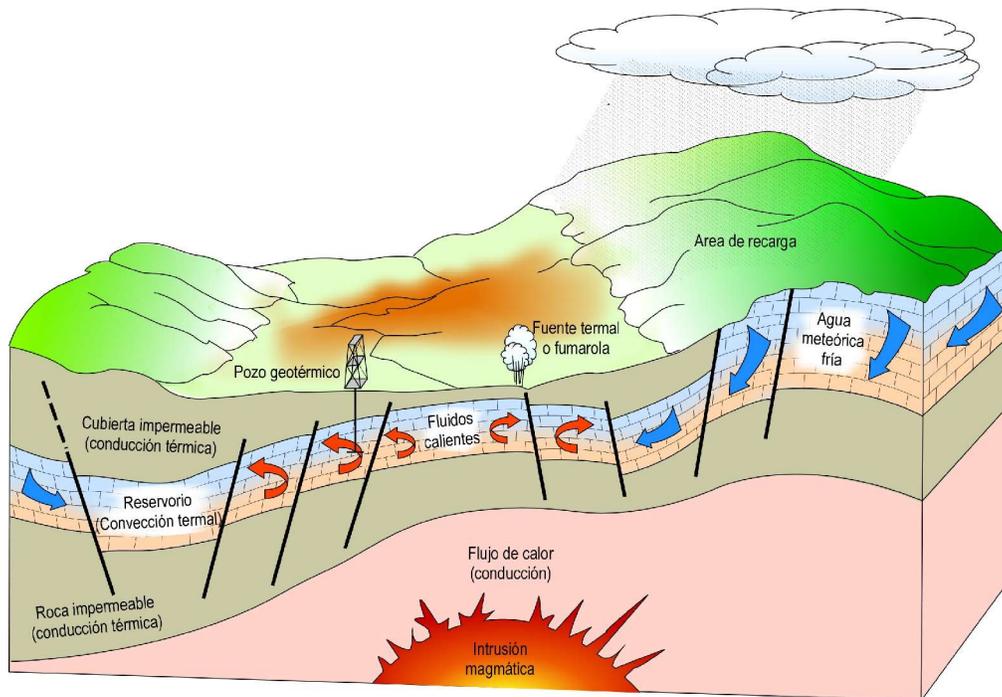


Figura 6

Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal

La convección, por su naturaleza, tiende a incrementar las temperaturas de la parte superior del sistema, mientras que las temperaturas en la parte inferior disminuye (White, 1973).

El fenómeno descrito puede parecer bastante simple pero la reconstrucción de un buen modelo de un sistema geotérmico real no es fácil de realizar. Ello requiere destreza en muchas disciplinas y una vasta experiencia, especialmente cuando se trata de sistemas de alta temperatura. Los sistemas geotérmicos también se encuentran en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas, dando así origen a diferentes tipos de sistemas.

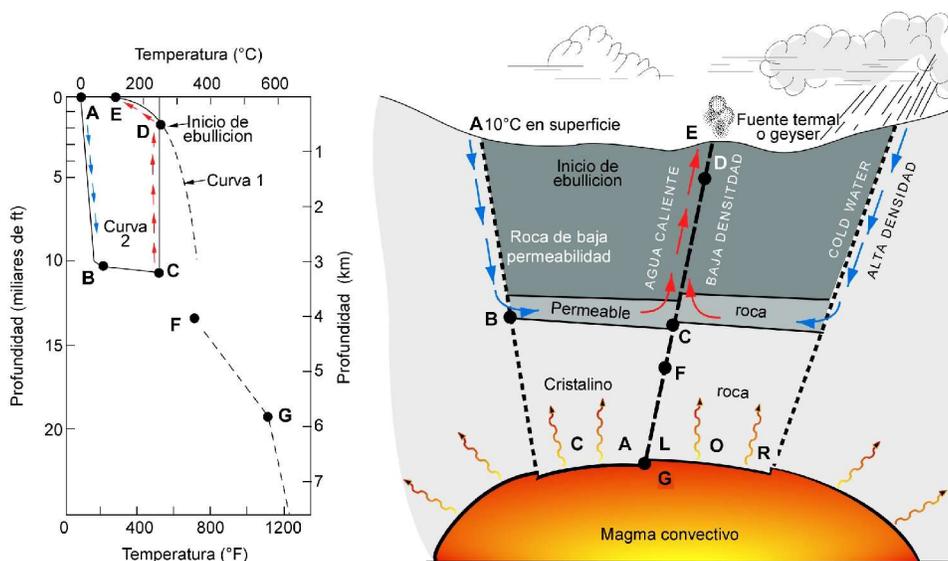


Figura 7

Modelo de un sistema geotérmico. La curva 1 es la curva de referencia para el punto de ebullición del agua pura. La curva 2 muestra el perfil de temperatura a lo largo de una

*típica ruta de circulación desde la recarga en el punto A hasta la descarga en el punto E.
(Según White, 1973)*

De todos los elementos que constituyen un sistema geotérmico la fuente de calor es el único que debe ser natural. Si las condiciones son favorables, los otros dos elementos pueden ser “artificiales” por ejemplo los fluidos geotermales extraídos de un reservorio para accionar una turbina en una planta geotermoelectrica podrían, después de su utilización, ser reinyectados al reservorio mediante pozos de inyección. De este modo, la recarga natural del reservorio está integrada además por una recarga artificial. Por muchos años la reinyección ha sido empleada en varias partes del mundo como una forma de reducir drásticamente el impacto ambiental de la operación de plantas geotérmicas. La recarga artificial mediante pozos de reinyección puede también ayudar a mantener campos geotérmicos “viejos o agotados”. Por ejemplo, en el campo de The Geysers en California, USA, uno de los campos geotérmicos mas grandes del mundo, la producción empezó a declinar dramáticamente a fines de los años 1980 debido a una falta de fluidos. El primer proyecto de este tipo the Southeast Geysers Effluent Recycling Project, iniciado en 1997 para transportar por 48 km aguas servidas tratadas hasta el campo geotérmico. Este proyecto permitió la reactivación de numerosas plantas eléctricas que habían sido abandonadas por falta de fluidos. En el segundo sistema, el Santa Rosa Geysers Recharge Project, 41,5 millones de litros diarios de aguas servidas tratadas por tercera vez serán bombeadas desde la planta de tratamiento de aguas cloacales regionales de Santa Rosa y de otras ciudades, a través de una tubería de 66 km hasta el campo de The Geysers, donde esta agua recargará el reservorio a través de pozos perforados para tal efecto.

En los proyectos de *Rocas Secas Calientes* (RSC) de los cuales se experimentó por primera vez, en 1970, en Los Alamos, Nuevo México, USA. El fluido y el reservorio se lograron artificialmente. En este caso, se bombea agua a alta presión a través de pozos hasta un cuerpo 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 un reservorio natural. Este reservorio es posteriormente alcanzado por un segundo pozo que se emplea para extraer el agua calentada. Por lo tanto, el sistema consiste en: (i) el pozo empleado para fracturamiento hidráulico a través del cual se inyecta el agua fría (ii) el reservorio artificial y (iii) el pozo utilizado para extraer el agua caliente. Todo el sistema, conjuntamente con la planta de utilización en la superficie del terreno, puede conformar un circuito cerrado (Garnish, 1987) (ver Figura 8).

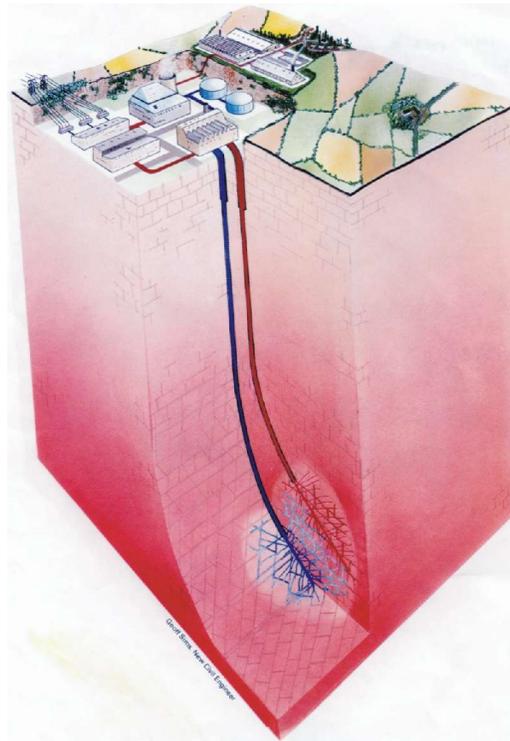


Figura 8

Esquema de un sistema de roca seca caliente a escala comercial.

El proyecto Los Alamos fue el precursor de proyectos similares en Australia, Francia, Alemania, Japón y el Reino Unido. Después de un período de relativo abandono, estos proyectos han sido reimpulsados a partir del descubrimiento que en profundidad las rocas tienen cierto grado de fracturamiento natural, y además, que las metodologías y tecnologías empleadas dependerían de las condiciones geológicas locales. Las investigaciones más avanzadas en RSC han sido llevadas a cabo en Japón y mediante el proyecto Europeo en Alsacia (Francia). Varios proyectos emprendidos en Japón en la década de 1980 (en Hijiori, Ogachi and Yunomori), fuertemente financiados por el Gobierno y la industria Japones, han dado interesante resultados tanto del punto de vista científico como el industrial. El proyecto Europeo de RSC por otra parte, ha sido programado en varias fases, incluyendo la perforación de 2 pozos, uno de los cuales ha alcanzado 5.060 metros de profundidad. Resultados muy promisorios se han obtenido de sus estudios geofísicos y pruebas hidráulicas; el proyecto Europeo, por ahora, parece ser el más exitoso (Tenzer 2001).

DEFINICIÓN Y LOS CLASIFICACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

Desafortunadamente no hay en uso una terminología internacional standard de la comunidad geotermal, como para facilitar una mutua comprensión. Las siguientes son algunas de las definiciones y clasificaciones mas comunes en esta disciplina.

Según Muffler y Cataldi (1978), cuando hablamos genéricamente acerca de recursos geotérmicos nos referimos usualmente a lo que en forma más precisa se denomina *recurso accesible base*; esto es, toda la energía térmica almacenada hasta una determinada

profundidad en la corteza, en una determinada área y calculada a partir de la temperatura media anual de la localidad. El recurso accesible base incluye el *recurso accesible base utilizable* (= Recurso) – que corresponde al recurso que puede ser económica y legalmente extraído en un determinado tiempo futuro (menos de 100 años). Esta categoría incluye el *recurso económico identificado* (= Reserva) – aquella parte de los recursos de un área determinada que pueden ser legalmente extraídos, a un costo competitivo con respecto a otras fuentes comerciales de energía y que son conocidos y caracterizados mediante sondajes o por evidencias geológicas, geoquímicas y geofísicas. La Figura 9 ilustra gráficamente estos y otros términos que pueden ser utilizados por especialistas geotérmicos.

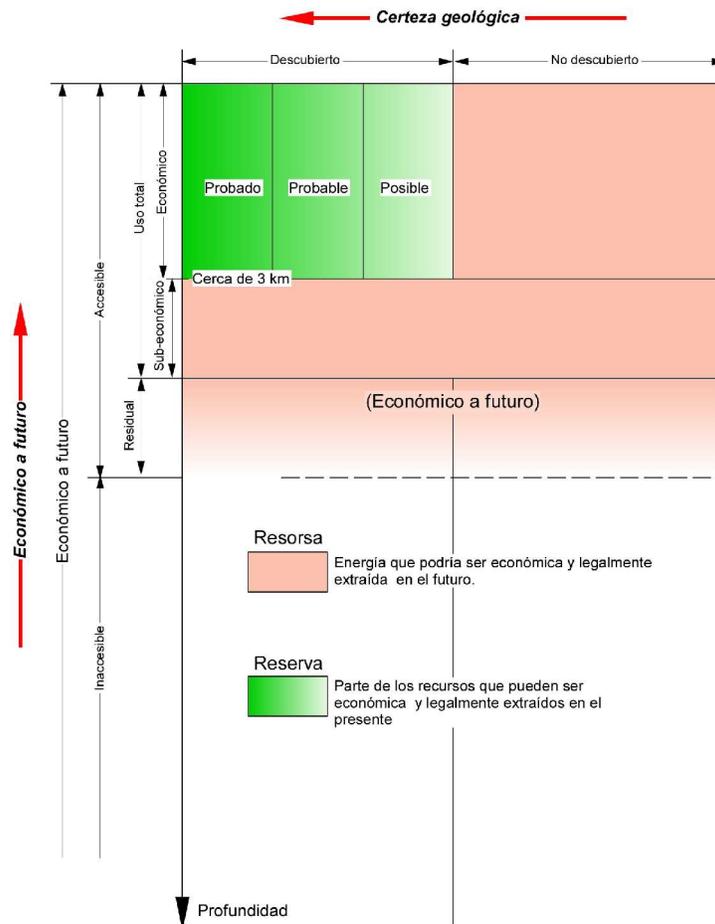


Figura 9

Diagrama de las diferentes categorías de recursos geotérmicos (según Muffler y Cataldi 1978). El eje vertical es el grado de factibilidad económica; el eje horizontal es el grado de certeza geológica.

El criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos es, sin embargo, el basado en la entalpía de los fluidos geotermiales que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie. *La entalpía*, puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura, este término se utiliza para expresar el contenido de calor (energía térmica) de los fluidos y da una idea de su “valor”. Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía (o temperatura), de acuerdo con criterios basados generalmente en la energía contenida en los fluidos y en su posibles formas de utilización. La tabla 3 incluye clasificaciones propuestas por numerosos autores. Un método standard de clasificación y su terminología, podría evitar confusiones y ambigüedades, pero mientras ese método no exista debemos indicar los valores y rangos de temperatura en cada caso; ya que, los términos tales como bajo, intermedio y alto tienen poco sentido y son frecuentemente engañosos.

Tabla 3. Clasificación de recursos geotérmicos (°C)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Recursos de baja entalpía	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Recursos de entalpía intermedia	90-150	125-225	100-200	-	-
Recursos de alta entalpía	>150	>225	>200	>150	>190

Ref: (a) Muffler and Cataldi (1978).
 (b) Hochstein (1990).
 (c) Benderitter and Cormy (1990).
 (d) Nicholson (1993).
 (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

Frecuentemente se distingue entre sistemas geotérmicos de agua o líquido dominante y sistemas geotérmicos de vapor dominante (o vapor seco) (White, 1973). En los *sistemas de agua dominante* el agua líquida es la fase de fluidos controlado por la presión. Puede contener algo de vapor en forma de burbujas. Estos sistemas geotérmicos cuya temperatura puede variar de < 125 a > 225 °C, son los de mayor distribución en el mundo. Dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, estos sistemas pueden producir agua caliente, mezclas de agua y vapor, vapor húmedo y en algunos casos, vapor seco. En los *sistemas de vapor, dominante* normalmente coexisten agua líquida y vapor en el reservorio, con la fase vapor controlada por la presión. Los sistemas geotérmicos mejor conocidos de este tipo son Larderello en Italia y The Geysers en California; estos sistemas, bastante escasos son de alta temperatura y normalmente, producen vapor seco a sobrecalentado. Los términos *vapor húmedo, seco y sobrecalentado*, frecuentemente utilizados, requieren algunas explicaciones para aquellos lectores sin una preparación ingenieril. Para hacer esto lo más simple posible, se puede tomar el ejemplo de un tiesto lleno de agua líquida en el cual la presión puede mantenerse constante a 1 atm (101,3 kPa). Si se calienta el agua, empezará a hervir cuando alcance los 100°C de temperatura (temperatura de ebullición a 1 atm de presión) y a pasar de la fase líquida a la fase vapor. Después de un cierto tiempo el tiesto contendrá líquido y vapor. El vapor coexistiendo con el líquido, en equilibrio termodinámico, es vapor húmedo. Si se continúa calentando el tiesto, manteniendo la presión a 1 atm, el líquido se evaporará completamente y el tiesto contendrá solo vapor. Esto es lo que se denomina vapor seco. El vapor húmedo y el vapor seco se denominan “vapor saturado”. Finalmente, incrementando la temperatura a 120°C y manteniendo la presión a 1 atm, se obtiene vapor sobrecalentado con un sobrecalentamiento de 20°C; esto es 20°C por encima de la temperatura de evaporización a esa presión. A

otras temperaturas y presiones, estos fenómenos también tienen lugar en el subsuelo, a lo que un autor hace muchos años denominó “tetera de la naturaleza” .

Otra división de los sistemas geotérmicos se basa en el *estado de equilibrio del reservorio* (Nicholson, 1993), que considera la circulación de los fluidos del reservorio y el mecanismo de transferencia de calor. *En los sistemas dinámicos* el reservorio se recarga continuamente con agua que es calentada y entonces descargada desde el reservorio a la superficie o en formaciones permeables en sub-superficie. El calor es transferido en el sistema por convección y circulación de fluido. Esta categoría incluye sistemas de alta temperatura (>de 150°C) y baja temperatura (< 150°C). En los *sistemas estáticos* (también conocidos como sistemas estancados o almacenados) hay una mínima o nula recarga al reservorio y el calor es solo transferido por conducción. Esta categoría incluye sistemas de baja temperatura y sistemas geopresurizados. Los *sistemas geopresurizados* se encuentran habitualmente en grandes cuencas sedimentarias (por ej.: Golfo de México, USA) a profundidades de 3 a 7 km. Los reservorios geopresurizados consisten en rocas sedimentarias permeables, intercalados en estratos impermeables; el agua presurizada permaneció atrapada desde el momento de la depositación de los sedimentos. La presión del agua caliente es cercana a la presión litoestática, excediendo por mucho la presión hidrostática. Los reservorios geopresurizados también pueden contener cantidades significativas de metano y podrían producir energía térmica e hidráulica (aguas calientes presurizadas) como también gas metano. Estos recursos han sido intensamente investigados pero aún, no han sido industrialmente explotados.

Campo geotérmico es una definición de carácter geográfico que usualmente corresponde a un área de actividad geotermal en la superficie de la tierra. En aquellos casos

donde no hay actividad superficial este termino puede utilizarse para indicar el área de la superficie bajo la cual hay un reservorio geotérmico (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).

Ya que la energía geotérmica es habitualmente calificada como *renovable y sustentable*, es importante definir tales términos. Renovable corresponde a una propiedad de la fuente de energía, mientras que sustentable se refiere a la forma como el recurso es utilizado.

El factor más crítico de la clasificación de energía geotérmica como una fuente de energía renovable es la tasa de recarga de la energía. Durante la explotación de un sistema geotérmico natural, la recarga de energía tiene lugar por el ingreso de agua termal al mismo ritmo como se extrae el recurso. De este modo se justifica la clasificación de la energía geotérmica como un recurso energético renovable. En el caso de las rocas secas calientes y de algunos acuíferos de agua caliente en cuencas sedimentarias, la recarga de energía se produce solamente por conducción térmica; debido a lo lento de la tasa de este último proceso, las rocas secas calientes y algunos reservorios sedimentarios como recursos deberían ser considerados energéticos finitos (Stefansson, 2000).

La *sustentabilidad del consumo* de un recurso depende de su abundancia inicial, de la tasa de generación y de su tasa de consumo. Obviamente el consumo puede ser sustentable en cualquier período durante el cual un recurso se va creando con mayor rapidez de la que esta siendo explotado. El término desarrollo sustentable es empleado por la Comisión Mundial del Desarrollo y Medio Ambiente para indicar que el desarrollo “.....*satisface las necesidades de la actual generación sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones*”. En este contexto, el desarrollo sustentable no implica que un determinado recurso energético requiere ser utilizado de un modo totalmente sustentable sino simplemente, que pueda encontrarse un recurso de reemplazo que permita abastecer a futuras generaciones, a pesar de que ese recurso en particular haya sido agotado. Así, no es

necesario que un campo geotérmico sea explotado en forma sustentable. En cambio, estudios de sustentabilidad geotermal deberían estar orientados hacia alcanzar y mantener un cierto nivel total de producción geotermal a nivel nacional o regional, para generación de electricidad y usos directos del calor, por un cierto período, unos 300 años, mediante el ingreso de nuevos sistemas geotérmicos a medida que otros se van agotando (Wright, 1998).

EXPLORACIÓN

Objetivos de la exploración

Los objetivos de la *exploración geotérmica* son (Lumb, 1981):

1. Identificar el fenómeno geotermal
2. Averiguar si existe un campo geotérmico utilizable
3. Estimar el tamaño del recurso
4. Determinar el tipo de campo geotérmico
5. Localizar las zonas productivas
6. Determinar el contenido calórico de los fluidos que serán erogados por los pozos en el campo geotérmico
7. Compilar un conjunto de antecedentes básicos con los cuales pueden ser confrontados los futuros controles.
8. Determinar aquellos parámetros ambientalmente sensibles, en forma previa a la explotación
9. Tomar conocimiento acerca de algunas características que pudiesen ocasionar problemas durante el desarrollo del campo.

La importancia relativa de cada objetivo depende de numerosos factores, la mayoría de los cuales están ligados al recurso mismo. Estos incluyen la utilización prevista, la tecnología disponible, los aspectos económicos, como también la situación, localización y

tiempo, todos los cuales influyen en el programa de exploración. Por ejemplo el reconocimiento preliminar de las manifestaciones geotermales tiene mucho mayor importancia en un área remota e inexplorada que en un área bien conocida; la estimación de la magnitud del recurso puede ser menos importante si este va a ser utilizado en pequeña escala, para lo cual se requiere mucho menos calor que el que se descarga naturalmente; si la energía va a ser utilizada para calefacción distrital o para alguna otra aplicación que requiera un bajo grado de calor, entonces no es un objetivo de gran importancia encontrar fluidos de alta temperatura (Lumb, 1981).

Numerosas metodologías y tecnologías están disponibles para alcanzar estos objetivos. Muchos de estos métodos son de uso corriente y han sido ampliamente comprobados en otros ámbitos de la investigación. Las técnicas y metodologías que han sido probadas exitosamente en la exploración de minerales y en petróleo y gas, no necesariamente serán la mejor solución en la exploración geotérmica. En cambio, técnicas de poco uso en la exploración de petróleo podrían ser herramientas ideales en la búsqueda de calor natural (Combs and Muffler, 1973).

MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

Estudios Geológicos e Hidrogeológicos Son el punto de partida de cualquier programa de exploración, su función básica es identificar la ubicación y extensión de áreas promisorias a ser investigadas con mayor detalle y recomendar los métodos de exploración más apropiados para esas áreas. Los estudios geológicos e hidrogeológicos tienen un importante papel en todas las siguientes etapas de la investigación geotérmica, hasta en la localización de los pozos exploratorios y de producción. Estos estudios también aportan la información básica para interpretar los datos obtenidos con otros métodos de exploración y,

finalmente, para elaborar un modelo realista del sistema geotermal y evaluar el potencial del recurso. La información obtenida de los estudios geológicos e hidrogeológicos puede inclusive ser usada en la etapa de producción, aportando valiosa información para la ingeniería del reservorio y la producción. La duración y el costo de la exploración puede ser reducida considerablemente con un programa bien elaborado y una eficiente coordinación de las investigaciones.

Prospecciones geoquímicas (incluyendo geoquímica isotópica) son un medio útil para determinar si un sistema geotérmico es de agua o de vapor dominante, para estimar la temperatura mínima esperada en profundidad, para estimar la homogeneidad del abastecimiento de agua, para inferir las características químicas de los fluidos profundos, y para determinar la fuente de recarga del agua. También se obtiene información valiosa acerca del tipo de problemas que pudiesen surgir durante la etapa de re-inyección y de la utilización de la planta (esto es.: cambios en la composición del fluido, corrosión e incrustación en los ductos y en los equipos de la planta, impacto ambiental) y la forma como evitarlos o aminorarlos. Los estudios geoquímicos consisten en el muestreo y análisis químicos y/o isotópicos de agua y gas de las manifestaciones termales (fuentes termales, fumarolas, etc.) o de pozos del área en estudio. Como los estudios geoquímicos proporcionan datos útiles para planificar la exploración y como sus costos son relativamente bajos en comparación con otros métodos exploratorios más sofisticados, tales como los métodos geofísicos, las técnicas geoquímicas deberían ser utilizadas en la mayor medida posible, antes de avanzar con otras metodologías más costosas.

Prospecciones geofísicas, están orientadas a obtener indirectamente, desde la superficie o desde ciertos intervalos de profundidad cercana a la superficie, los parámetros físicos de las formaciones geológicas en profundidad. Estos parámetros físicos incluyen:

- Temperatura (prospección térmica)
- Conductividad eléctrica (métodos eléctricos y electromagnéticos)
- Velocidad de propagación de ondas elásticas (prospección sísmica)
- Densidad (prospección gravimétrica)
- Susceptibilidad magnética (prospección magnética).

Algunas de estas técnicas, tales como las sísmicas, gravimétricas y magnéticas, que son tradicionalmente empleadas en exploración petrolífera, pueden aportar valiosa información acerca de la forma, tamaño, profundidad y otras características importantes de las estructuras geológicas profundas que podrían constituir un reservorio geotermal; sin embargo, ellas entregan poco o ninguna información en cuanto a que estas estructuras contengan fluidos, que es el objetivo primordial de la investigación. Estas metodologías son, por lo tanto, más apropiadas para definir ciertos detalles durante las etapas finales de la exploración, antes que sean localizados los pozos exploratorios. La existencia de fluidos geotermales en las estructuras geológicas puede determinarse mediante prospecciones eléctricas y electromagnéticas, las cuales son más sensibles que otras prospecciones a la presencia de estos fluidos y a las variaciones de la temperatura; estas dos técnicas han sido ampliamente empleadas con resultados satisfactorios. El método magnetotelúrico, que utiliza las ondas electromagnéticas generadas por las tormentas solares, ha sido enormemente mejorado en los últimos años, y actualmente ofrece un vasto espectro de posibles aplicaciones, a pesar del hecho que requiere una sofisticada instrumentación y que es muy sensible a los ruidos de fondo en áreas urbanas. La mayor ventaja del método magnetotelúrico es que puede ser utilizado para definir las estructuras más profundas que las que son alcanzadas con técnicas eléctricas o electromagnéticas. El método

Audiomagnetotélurico de Fuente Controlada (Controlled Source Audiomagnetotelluric method, CSAMT), desarrollado recientemente, utiliza ondas inducidas artificialmente en vez de ondas electromagnéticas naturales. La profundidad de penetración es menor con esta técnica, pero es más rápida, menos costosa, y proporciona mucho mayor detalle que el método MT clásico.

Las técnicas termales (mediciones de temperatura, determinación de gradientes geotérmicos y de flujo calórico terrestre) pueden a menudo proporcionar una buena aproximación acerca de la temperatura en el techo del reservorio.

Todas las técnicas geofísicas son costosas, algunas más que otras. Estas no deben ser utilizadas indiscriminadamente en cualquier situación o condición, como es un método que produce resultados excelentes en un determinado ambiente geológico en otros puede entregar resultados muy poco satisfactorios. Con el fin de reducir costos, es por lo tanto muy importante que los métodos geofísicos sean cuidadosamente seleccionados por geofísicos en estrecha colaboración con geólogos (Meiday, 1998).

La perforación de *pozos exploratorios* constituye la etapa final de cualquier programa de exploración geotérmica y es el único medio para determinar las reales características de un reservorio geotermal y así poder evaluar su potencial (Combs and Muffler, 1973). Los datos proporcionados por los pozos exploratorios deberán ser aptos para verificar toda las hipótesis y los modelos elaborados a partir de los resultados de las exploraciones de superficie, como asimismo, confirmar si el reservorio es productivo y si contiene suficientes fluidos de características adecuadas para la utilización, para la cual está determinado; por lo tanto, la ubicación de los pozos exploratorios es una operación muy delicada.

Programa de exploración

Antes de formular un programa de exploración geotérmica debe colectarse la totalidad de los datos geológicos, geofísicos y geoquímicos existentes e integrarse con los datos disponibles de trabajos anteriores sobre agua, minerales y recursos petrolíferos del área en estudio y de áreas adyacentes. Esta información juega, frecuentemente, un importante papel en la definición de los objetivos del programa de exploración geotérmica y podría permitir una reducción significativa de los costos.

Usualmente el programa de exploración se lleva a cabo paso a paso: *reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad*. En cada una de estas etapas se va gradualmente eliminando las áreas menos interesantes y se va concentrando en aquellas más prometedoras. A medida que se desarrolla el programa, los métodos utilizados se tornan también progresivamente más sofisticados y más detallados. La magnitud y presupuesto de todo el programa debería ser proporcional a sus objetivos, a la importancia de los recursos que se espera encontrar y a las proyectadas formas de utilización. El itinerario del programa debería ser flexible y reevaluado de acuerdo con los resultados obtenidos de las distintas prospecciones de cada etapa; igualmente el modelo geológico-geotermal debería ser progresivamente actualizado y mejorado. Estas revisiones periódicas del programa deberían eliminar cualquier operación que no fuese absolutamente necesaria e incorporar otras actividades, de acuerdo con los resultados alcanzados en cada etapa. Cualquier reducción en el número y tamaño de las áreas en estudio conducirá a una disminución de los costos, como también a un correspondiente aumento en el riesgo de error o fracaso. Contrariamente, disminuyendo los riesgos y errores se incrementa el costo total. El éxito económico de un programa de exploración geotérmica depende del adecuado balance entre ambas posiciones.

UTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

La generación de electricidad es la forma de utilización más importante de los recursos geotérmicos de alta temperatura ($> 150^{\circ}\text{C}$). Los recursos de temperatura media a baja ($< 150^{\circ}\text{C}$), son apropiados para muchos tipos diferentes de utilización. El diagrama clásico de (Lindal, 1973; Figura 10), que muestra los posibles usos de los fluidos geotermales de diferentes temperaturas, aún se mantiene válido, pero la generación de electricidad mediante plantas de ciclo binario puede actualmente permitir la utilización de fluidos sobre 85°C .

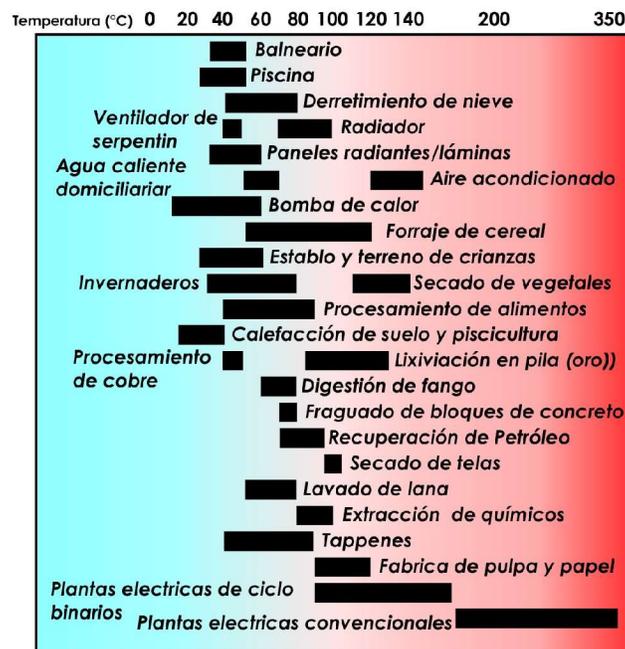


Figura 10

Diagrama que muestra la utilización de los fluidos geotérmicos, modificando el diagrama de Lindal, 1973.

El límite inferior de 20°C esta solamente sobrepasado en condiciones muy particulares, especialmente mediante el uso de bombas de calor. El diagrama de Lindal enfatiza dos aspectos importantes de la utilización de los recursos geotérmicos (Gudmundsson, 1988): (a) con usos combinados y en línea es posible mejorar la factibilidad de un proyecto

geotérmico y (b) la temperatura del recurso puede limitar los posibles usos. Los diseños existentes para procesos termales pueden sin embargo, modificarse para la utilización de los fluidos geotermales en ciertos casos, ampliando así su campo de aplicaciones.

Generación de electricidad

Dependiendo de las características del recurso geotérmico, la generación de electricidad se realiza principalmente mediante turbinas de vapor convencionales y plantas de ciclo binario,

Las turbinas de vapor convencionales, requieren fluidos a temperaturas de a lo menos 150°C y están disponibles con descarga atmosférica (back-pressure) o bien con descarga de condensación. Las turbinas con escape atmosférico son más simples y de menor costo. El vapor, directamente de pozos de vapor seco o, después de la separación, desde pozos de vapor húmedo, es pasado a través de la turbina y descargado a al atmósfera (Figura 11).

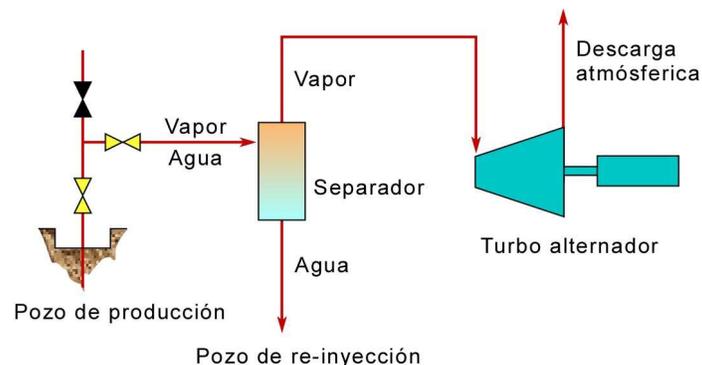


Figura 11

Esquema de una planta geotermoelectrica de descarga atmosférica. El flujo del fluido geotermal está indicado en rojo.

Con este tipo de unidad, el consumo de vapor (de la misma presión de ingreso) por kilowatt-hora producido es casi el doble de las unidades de condensación. Sin embargo, las

turbinas de descarga atmosférica son inmensamente útiles como plantas pilotos, plantas portátiles en el caso de pequeños abastecimientos desde pozos aislados, y para generar electricidad con pozos exploratorios durante el desarrollo del campo. Ellas son útiles también cuando el vapor tiene un alto contenido de gases no condensables ($> 12\%$ en pesos). Las unidades de descarga atmosférica pueden ser construidas e instaladas muy rápido y puestas en operación en poco más de 13-14 meses desde la fecha que son ordenadas. Este tipo de máquinas está usualmente disponible en tamaños pequeños (2,5 – 5 MWe). Las unidades de condensación, como tienen más equipos auxiliares, son más complejas que las unidades de descarga atmosférica y como son de tamaños mayores requieren el doble del tiempo para su construcción e instalación. El consumo específico de vapor de las unidades de condensación es, sin embargo, cerca de la mitad de las unidades de descarga atmosférica. Las plantas de condensación de 55-60 MWe de capacidad son muy comunes, y recientemente se han construido e instalado plantas de 110 MWe (Figura 12).

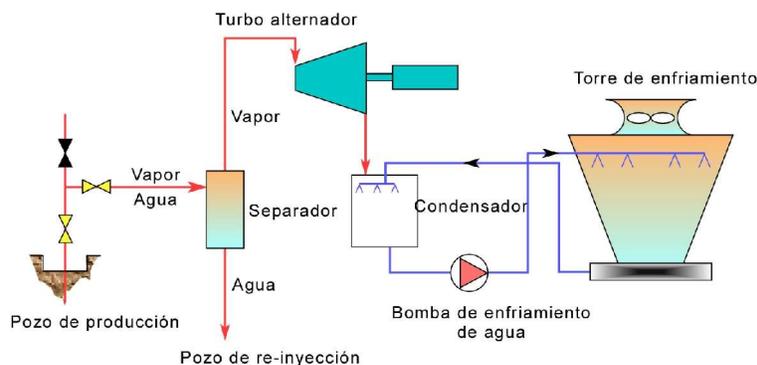


Figura 12

Esquema de una planta geotermoelectrica de condensación. El flujo del fluido de alta temperatura esta indicado en rojo y el agua fría en azul

La generación de electricidad a partir de fluidos de temperatura baja a media, o bien, a partir de aguas calientes provenientes de los separadores en campos geotérmicos de tipo

agua dominante, ha tenido significativos progresos debido al mejoramiento logrado en la tecnología de fluidos binarios. *Las plantas binarias* utilizan un fluido secundario, usualmente de carácter orgánico (principalmente n-pentano), que tiene un bajo punto de ebullición y una alta presión de vapor a bajas temperaturas, en comparación con el vapor de agua. El fluido secundario es manejado según el ciclo convencional Rankine (ORC): el fluido geotermal entrega calor al fluido secundario a través de intercambiadores de calor, en los cuales este fluido es calentado y vaporizado; el vapor producido acciona una turbina normal de flujo axial, posteriormente es enfriado y condensado, y el ciclo comienza nuevamente (Figura 13).

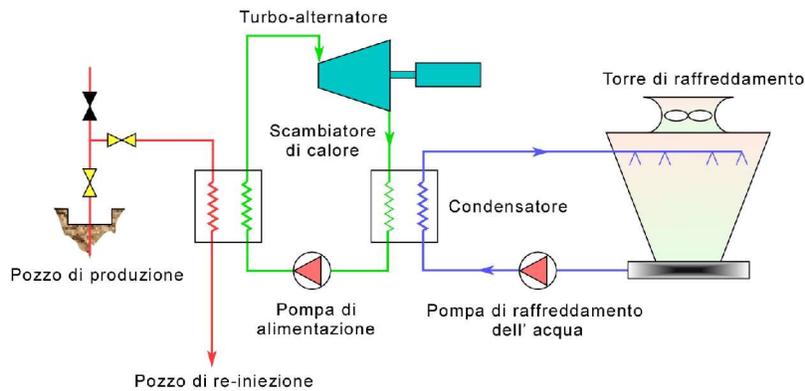


Figura 13

Esquema de una planta geotermal binaria. El flujo del fluido geotermal está en rojo, el fluido secundario en verde y el agua fría en azul

Seleccionando un fluido secundario apropiado, el sistema binario puede diseñarse para utilizar fluidos geotermales con un rango de temperatura entre 85 y 170°C. El límite superior depende de la estabilidad térmica del fluido binario orgánico, y el límite inferior depende de factores técnicos-económicos: A menor temperatura el tamaño de los intercambiadores de calor requeridos haría el proyecto no económico. Además de los fluidos geotermales de baja a media temperatura y fluidos de deshecho los sistemas

binarios también son utilizados cuando resulte preferible evitar el “flashing” de fluidos geotermales (por ejemplo, para evitar incrustación del pozo). En este caso, bombas ubicadas dentro del pozo pueden utilizarse para captar los fluidos en estado líquido presurizado, y la energía calórica puede extraerse del fluido mediante unidades binarias.

Las plantas binarias se construyen normalmente en pequeñas unidades modulares, de pocos cientos de KWe a pocos MWe de capacidad. Estas unidades pueden así ser interconectadas para constituir plantas eléctricas de decenas de megawatts. Sus costos dependen de numerosos factores pero principalmente de la temperatura del fluido geotermal utilizado, que define el tamaño de la turbina, los intercambiadores de calor y el sistema de enfriamiento. El tamaño total de la planta es poco significativo con respecto al costo específico, ya que es posible interconectar una serie de unidades modulares standard para lograr mayores capacidades de generación.

La tecnología de plantas binarias es un medio seguro y de costos apropiados para convertir en electricidad la energía disponible de campos geotérmicos del tipo agua dominante (bajo 170°C).

Un nuevo sistema binario, el ciclo Kalina, que utiliza una mezcla de agua y amoníaco como fluido secundario, se desarrolló en la década de los años 19 90. El fluido secundario se expande, en condiciones de sobrecalentamiento, a través de turbinas de alta presión y posteriormente recalentado antes de accionar la turbina de baja presión. Después de la segunda expansión el vapor saturado es conducido hacia un ebullición recuperativo, antes de ser condensado en un condensador enfriado por agua. El ciclo Kalina es más eficiente que las plantas geotermoelectricas binarias del tipo ORC, pero es de un diseño más complejo.

Las pequeñas plantas portátiles, ya sean convencionales o no, no solo reducen los riesgos relativos a la perforación de nuevos pozos, sino lo más importante, que pueden

ayudar a proporcionar los requerimientos de energía de áreas aisladas. La calidad de vida de muchas comunidades podría ser considerablemente mejorada al tener la posibilidad de disponer de fuentes de energía local. La electricidad podría facilitar muchas actividades aparentemente banales, pero extremadamente importantes, tales como bombeo de agua para riego, congelamiento de frutas y vegetales para conservación.

La conveniencia de pequeñas plantas portátiles es aún más evidente para aquellas áreas que no tienen acceso a combustibles convencionales y también para comunidades donde sería demasiado costosa la conexión al sistema eléctrico nacional o regional, a pesar de la existencia de líneas de transmisión de alto voltaje en las cercanías. El costo de abastecer estas pequeñas comunidades aisladas es prohibitivo, ya que los transformadores necesarios para obtener electricidad desde líneas de alto voltaje cuestan más de US\$ 675.000 instalados cada uno y, la forma más simple de distribución local de electricidad, a 11 kV usando postes de madera, tiene un costo mínimo de US\$ 20.000 por kilómetro (US\$ 1994). En comparación, el costo de capital (US\$ 1998) de una unidad binaria instalada es del orden de 1.500 – 2.500 US\$/kW, sin incluir los costos de sondajes. La demanda de capacidad eléctrica por persona, en lugares fuera de los sistemas de transmisión fluctúa entre 0,2 kW en áreas menos desarrollada a 1.0 kW o más en áreas desarrolladas. Una planta de 100 kWe puede abastecer de 100 a 500 personas. Una planta de 1.000 kWe puede abastecer de 1.000 a 5.000 personas (Entingh et al., 1994).

Usos directos del calor

El uso directo del calor es una de las formas más antiguas, versátiles y comunes de la utilización de la energía geotérmica (Tabla 2). Las aplicaciones en baños, calefacción ambiental y distrital, en agricultura, acuicultura y algunos usos industriales constituyen las

formas más conocidas de utilización, pero las bombas de calor son las más generalizadas (12,5% del total de la energía utilizada en el año 2000). En menor escala hay muchos otros tipos de utilización, siendo algunos de ellos poco usuales.

La calefacción ambiental y distrital ha tenido un gran desarrollo en Islandia, donde la capacidad total de los sistemas de calefacción distrital ha aumentado a unos 1.200 MWt a fines de 1999 (Figura 14), Esta forma de calefacción está ampliamente distribuida en los países de Europa Oriental, como también en Estados Unidos, China, Japón, Francia, etc.

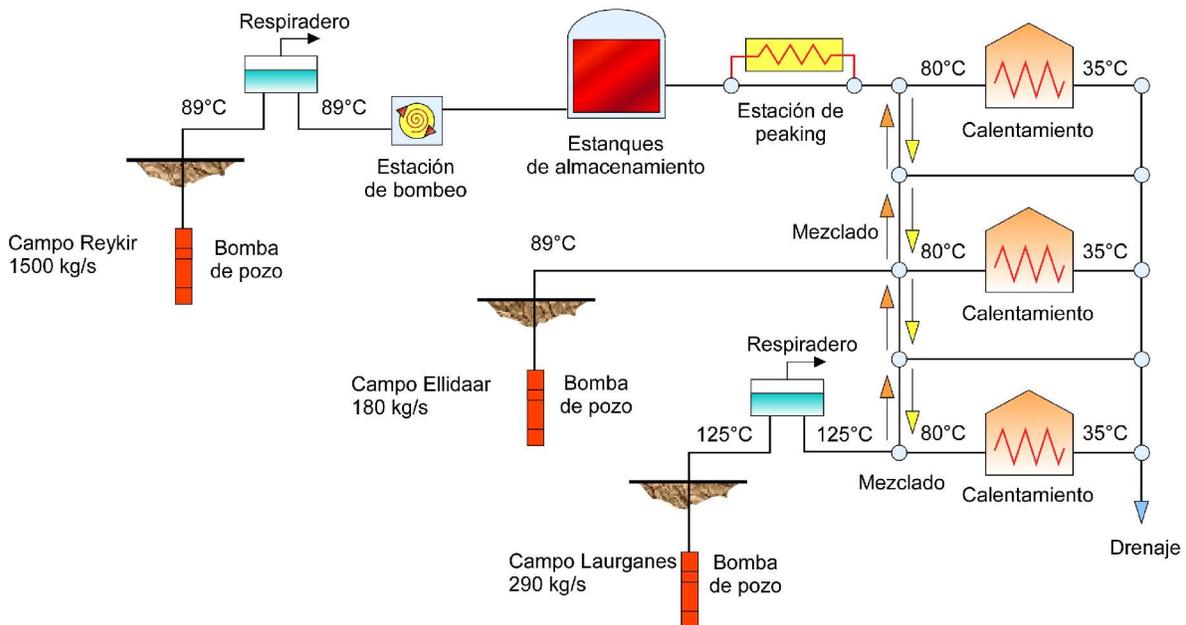


Figura 14

Diagrama de flujos simplificados de un sistema geotermal de calefacción distrital de Reykjavik (Gudmundsson, 1988)

Los sistemas geotermales de calefacción distrital requieren grandes inversiones de capital. Los mayores costos corresponden a la inversión inicial, en pozos de producción y de reinyección, en bombas dentro de pozos, tuberías y redes de distribución, en equipos de

monitoreo y control, en estaciones de peaking y estanques de almacenamiento. Sin embargo, los costos de operación son comparativamente más bajos que en los sistemas convencionales y corresponden a energía para bombeo, a sistemas de mantención, control y gestión. Un factor crucial en la estimación del costo inicial de un sistema es la densidad de carga termal, o la demanda de calor dividida por el área de terreno del distrito. Una alta densidad de calor determina la factibilidad económica de un proyecto de calefacción distrital ya que la red de distribución es costosa. Algunos beneficios económicos pueden conseguirse combinando calefacción y enfriamiento en aquellas áreas donde el clima lo permita. El factor de carga en un sistema que convine calefacción y enfriamiento podría ser mayor que el factor de carga para calefacción solamente y consecuentemente mejoraría el precio de la unidad de energía (Gudmundsson, 1988).

La refrigeración es una opción factible de utilizar geotermia mediante la adaptación de equipos de absorción. La tecnología de estos equipos es bien conocida y se encuentra a disposición en el mercado. El ciclo de absorción es un proceso que utiliza calor como fuente de energía en vez de electricidad. El efecto de refrigeración se logra mediante la utilización de 2 fluidos: un refrigerante, que circula, se evapora y condensa, y un segundo fluido o absorbente. Para aplicaciones sobre 0°C (principalmente en refrigeración y procesos de aire acondicionado), el ciclo utiliza bromuro de litio como absorbente y agua como refrigerante. Para aplicaciones bajo 0°C se emplea un ciclo de amoníaco/agua, con amoníaco como refrigerante y agua como absorbente, los fluidos geotermiales proporcionan la energía geotérmica que alimenta estos equipos, a pesar que su eficiencia disminuye con temperaturas menores que 105°C.

El aire acondicionado geotermal (calefacción y enfriamiento) ha tenido una considerable expansión desde los años 1980, conjuntamente con la introducción y

generalización del uso de *bombas de calor* . Los diferentes sistemas de bombas de calor disponibles permiten extraer y utilizar económicamente el calor contenido en cuerpos de baja temperatura, tales como suelos, acuíferos someros, lagunas etc. (Sanner, 2001) (ver ejemplo figura 15).

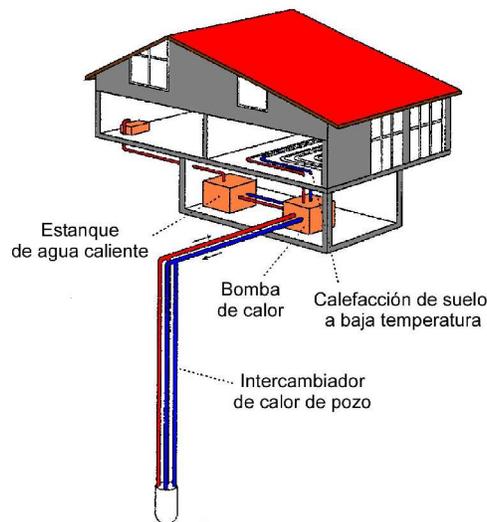


Figura 15

Aplicación típica de sistema de bomba de calor (Sanner et al., 2003)

Como es sabido, las bombas de calor son máquinas que mueven el calor en una dirección opuesta a la dirección que tendería naturalmente, esto es, desde un espacio o cuerpo frío a uno más temperado. Una bomba de calor efectivamente no es más que una unidad de refrigeración (Rafferty, 1997). Cualquier artefacto de refrigeración (acondicionador de aire de ventana, refrigerador, congelador, etc.) transmite el calor desde un espacio (para mantenerlo frío) y descarga este calor a espacios de mayores temperaturas. La única diferencia entre una bomba de calor y una unidad de refrigeración es el efecto deseado, enfriamiento para la unidad de refrigeración y calefacción para la bomba de calor. Un segundo factor distintivo de muchas bombas de calor es que son reversibles y pueden

proporcionar ya sea calor o frío al espacio. Las bombas de calor, por supuesto, necesitan energía para operar pero en condiciones climáticas apropiadas y con un buen diseño, el balance energético sería positivo (Figura 16).

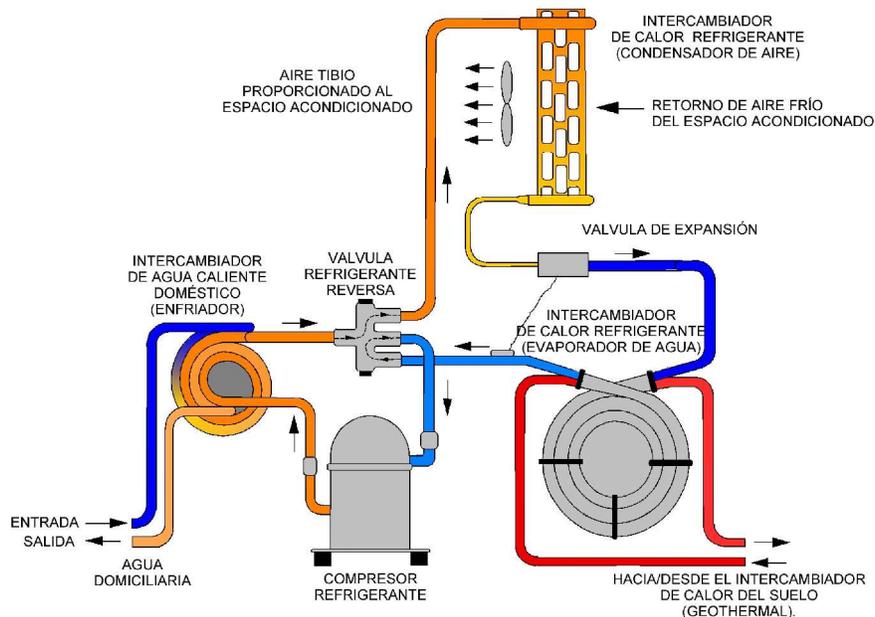


Figura 16

Esquema de una bomba de calor en calefacción (cortesía del Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, Usa).

Los sistemas de bombas de calor del tipo acoplado al suelo y acoplado al agua han sido instalados en gran número, en 27 países y totalizan una capacidad termal de 6.875 MWt (año 2000). La mayoría de estas instalaciones están en USA (4.800 MWt), Suiza (500 MWt), Suecia (377 MWt), Canadá (360 MWt), Alemania (344 MWt) y Austria (228 MWt) (Lund 2001). En estos sistemas se utilizan acuíferos y suelos con temperaturas en un rango de 5 a 30°C.

Las aplicaciones agrícolas de los fluidos geotermales consisten en calefacción a campo abierto e invernaderos. El agua termal puede ser utilizada en agricultura a campo abierto para regar y/o calentar el suelo. La mayor desventaja en el riego con agua tibia es que para

conseguir alguna significativa variación en la temperatura del suelo, se requieren grandes cantidades de agua a temperaturas suficientemente bajas como para no dañar las plantas del campo que se debe regar. Una solución posible a este problema es adoptar un sistema de riego de sub-superficie conectado a una tubería enterrada de calefacción del suelo. La calefacción del suelo mediante tuberías enterradas sin sistema de regadío podría disminuir la conductividad térmica del suelo, a causa de la disminución de la humedad alrededor de la tubería y la consecuente aislación térmica. La mejor solución parece ser aquella que combina la calefacción del suelo con el regadío. La composición química de las aguas termales utilizadas en regadío debe ser cuidadosamente controlada para evitar efectos adversos sobre las plantas. Las principales ventajas del control de la temperatura en la agricultura a campo abierto son: (a) prevenir cualquier daño provocado por bajas temperaturas ambientales, (b) extender la estación de cultivo, aumentar el crecimiento de las plantas y aumentar la producción y (c) esterilizar el suelo (Barbier y Fanelli, 1977).

El empleo más común de la energía geotérmica en agricultura es, sin embargo, en calefacción de invernaderos, los cuales se han desarrollado en gran escala en muchos países. El cultivo de vegetales y flores fuera de estación, o en condiciones climáticas inapropiadas ahora puede basarse ahora en una tecnología ampliamente experimentada. Para conseguir las condiciones óptimas de crecimiento se disponen de varias soluciones basadas en la temperatura óptima de crecimiento de cada planta (Figura 17), en la cantidad de luz, en la concentración de CO₂ en el invernadero, en la humedad del suelo y del aire y en el movimiento del aire dentro del invernadero.

Las paredes del invernadero pueden ser de vidrio, de fibra de vidrio de paneles rígidos de plástico o de membrana plástica. Los paneles de vidrio son muchos más transparentes que los de plástico y dan mayor luminosidad, pero proporcionan una menor aislación

térmica, son menos resistentes a los impactos y son más pesados y costosos que los paneles plásticos.

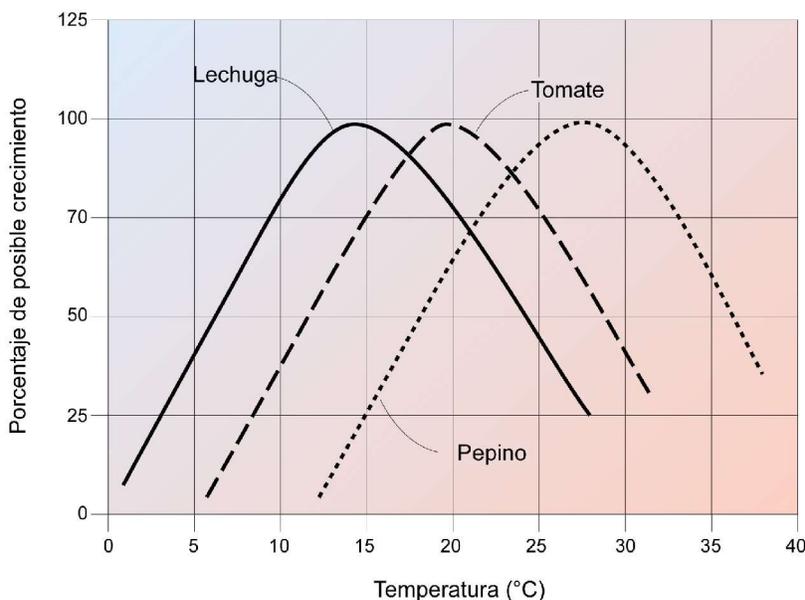


Figura 17

Curva de crecimiento de algunas cosechas (Beall and Samuels, 1971)

Los invernaderos más simples se hacen con membranas plásticas y recientemente, algunos invernaderos se construyen con doble membranas separadas por un espacio de aire. Este sistema disminuye la pérdida de calor a través de las paredes en un 30% - 40% así, mejoran significativamente la eficiencia del invernadero. La calefacción del invernadero puede realizarse conjuntamente con circulación forzada de aire mediante intercambiadores de calor, tuberías de circulación de agua caliente o mediante ductos ubicados dentro o sobre el suelo, radiadores colocados a lo largo de las paredes y bajo los bancos, o mediante una combinación de estos métodos (Figura 18).

La explotación del calor geotérmico en la calefacción de invernaderos puede reducir considerablemente sus costos de operación, los cuales en algunos casos alcanzan el 35% del costo de los productos (vegetales, flores, plantas de interior y almacigos de árboles).

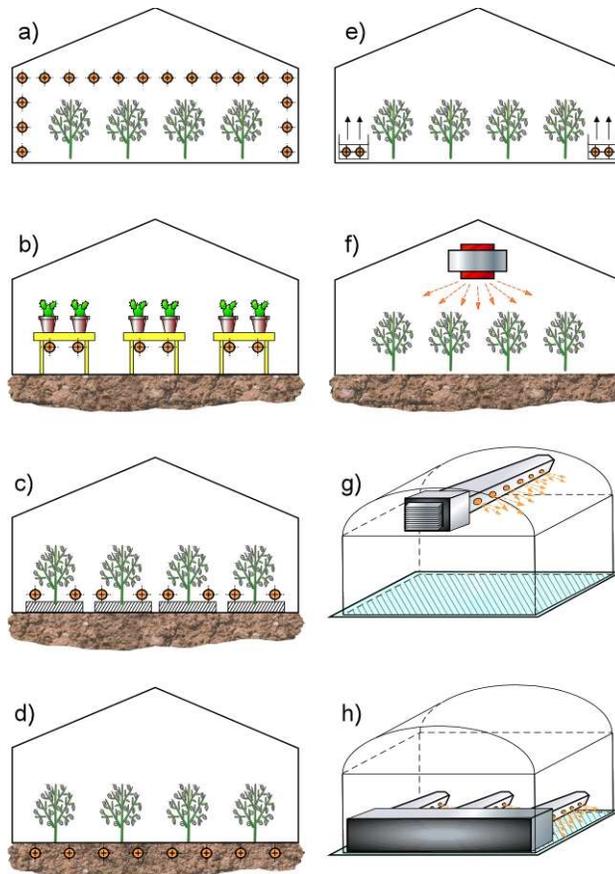


Figura 18

Sistemas de calefacción en invernaderos geotermales.

Instalaciones de calefacción con movimiento natural de aire (convección natural): a) ducto de calefacción aéreo; b) calefacción de bancos c) ductos de calefacción bajos para calefacción de aire; d) calefacción de suelo.

Instalaciones de movimiento de aire forzado (convección forzada): e) posición lateral; f) ventilador aéreo; g) ductos altos; h) ductos bajos (von Zabeltitz, 1986).

Las granjas de animales y de especies acuáticas como también aquellas de vegetales y plantas, se pueden beneficiar en calidad y en cantidad con un acondicionamiento óptimo de su temperatura ambiente (Figura 19). En muchos casos las aguas geotermales podrían ser utilizadas provechosamente combinando la crianza de animales con invernaderos geotermales. La energía requerida para calefaccionar las instalaciones de crianza es

alrededor de un 50% de la requerida para un invernadero de la misma superficie areal, así se podría adoptar un sistema de utilización en línea. La crianza en un ambiente de temperatura controlada mejora la salud del animal, los fluidos calientes también se pueden utilizar para limpiar, desinfectar y secar los corrales de los animales y los productos de deshechos (Barbier y Fanelli, 1977).

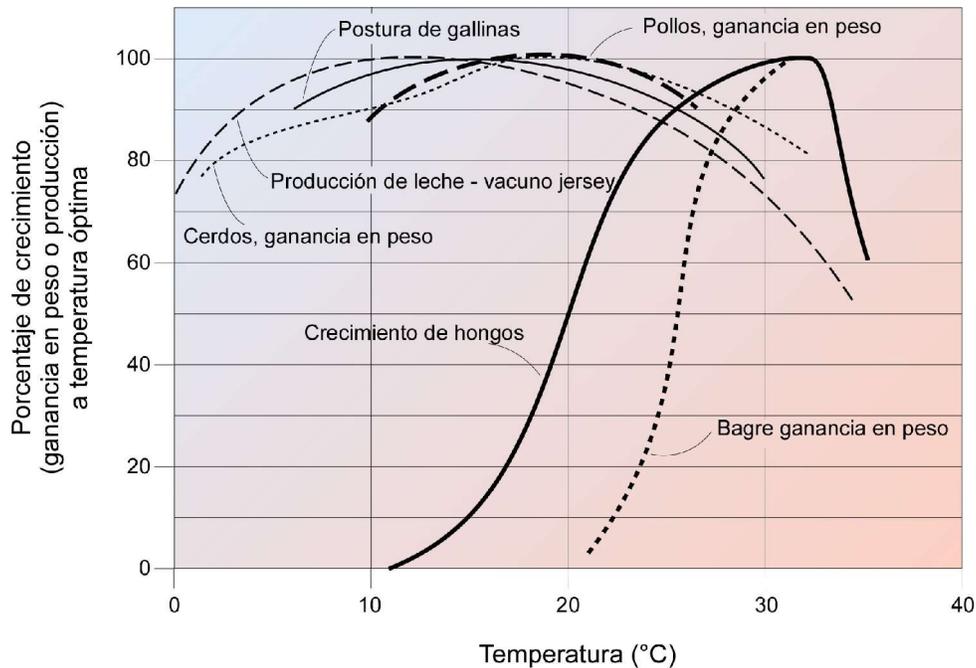


Figura 19

Efectos de la temperatura en el crecimiento o producción de animales comestibles (Beall y Samuels, 1971)

Acuicultura, es la crianza controlada de organismos acuáticos, actividades que actualmente esta adquiriendo importancia a nivel mundial, debido al aumento de la demanda. El control de las temperaturas de cultivo de especies acuáticas es de mucho mayor importancia que respecto de las especies terrestres, como puede verse en la Figura 19, la cual muestra que la curva de crecimiento de las especies acuáticas es muy diferente a la curva de las especies terrestre. Manteniendo artificialmente una temperatura optima es

posible cultivar mas especies exóticas, mejorar la producción e incluso, en algunos casos, duplicar el ciclo reproductivo (Barbier y Fanelli, 1977). Las especies que habitualmente son cultivadas incluyen: carpas, barbos, róbalo, salmonetes, angulas, salmones, esturiones, camarones, langostas, cangrejos de río, cangrejos, ostras, almejas, ostiones, mejillones y abalones.

La acuicultura también incluye la crianza de caimanes y cocodrilos, como atracciones turísticas y por su piel, lo cual puede ser una actividad lucrativa. Experiencias realizadas en Estados Unidos muestran, que criando a una temperatura de alrededor de 30° C, un caimán puede crecer hasta a unos 2 metros en 3 años, mientras que un caimán criado en condiciones naturales alcanzará un largo de solo 1,2 m en ese mismo período. Durante algunos años estos reptiles han sido criados en granjas de Colorado e Idaho, los Islandeses están planeando algo similar.

Las temperaturas que se requieren para especies acuáticas son generalmente del orden de 20-30°C. El tamaño de la instalación dependerá de la temperatura del recurso geotermal, de la temperatura requerida en las piletas de peces y de la pérdida de calor de éstas.

El cultivo de *Spirulina* también puede ser considerado como una forma de acuicultura. Esta microalga unicelular, de forma espiral, es frecuentemente denominada “súper alimento” por su contenido de nutrientes; también ha sido propuesta para solucionar el problema del hambre de los países mas pobres del mundo, aún cuando actualmente es vendida como un suplemento alimenticio.

La *Spirulina* está siendo cultivada, en lagos o estanques artificiales, en varios países tropicales y sub-tropicales, donde las condiciones son ideales debido a su rápido y amplio crecimiento (un ambiente rico en CO₂ alcalino, cálido). En países templados, la energía

geotérmica ya ha proporcionado en forma exitosa el calor necesario para el crecimiento de la Spirulina durante todo el año.

El rango total de temperatura de fluidos geotérmicos, ya sea vapor o agua, puede ser empleado en *aplicaciones industriales*, como se muestra en el diagrama Lindal (Figura 10). Las diferentes formas posibles de utilización incluye procesos de calefacción, evaporación, secado, destilación, esterilización, lavado, descongelamiento y extracción de sales. En 19 países el calor tiene aplicaciones en procesos industriales (Lund y Freeston, 2001), donde las instalaciones requeridas son grandes y con un alto consumo de energía. Los ejemplos incluyen el fraguado de concreto, el envasado de agua y de bebidas carbonatadas, la producción de papel y partes de vehículos, la recuperación de petróleo, la pasteurización de leche, la industria del cuero, la extracción de productos químicos, la extracción de CO₂, el uso en lavandería, el secado de diatomitas, el procesamiento de celulosa y papel y la producción de borato y ácido bórico. También hay planes para utilizar fluidos geotermiales de baja temperatura para deshielar carreteras y dispersar la neblina en algunos aeropuertos. En Japón, se ha desarrollado una industria rural que utiliza las propiedades de blanqueador del H₂S de aguas termales, para producir innovativas telas para vestuario de damas. También en Japón han experimentado técnicas para fabricar una “madera geotermal” liviana que es particularmente apropiada para ciertos tipos de construcciones, durante el tratamiento con agua termal se hidrolizan los polisacáridos de la madera original, tornando el material más poroso y así más liviano.

Consideraciones económicas

Los elementos que tienen que ser considerados en cualquier estimación de costos, ya sea de planta o de costos de operación y del precio de los “productos” de la energía geotérmica,

son todos más numerosos y más complicados que en otras formas de energía. Todos estos elementos, deben por lo tanto, ser cuidadosamente evaluados antes de emprender un proyecto geotérmico. Solo es posible ofrecer algunas pocas indicaciones de carácter general las cuales, junto con la información acerca de las condiciones locales y del costo de los fluidos geotermales disponibles, podría ayudar al potencial inversionista a tomar una decisión.

- Un sistema recurso-planta (instalación de energía geotérmica) esta constituido por los pozos geotermales, los ductos que transportan los fluidos geotermales la planta de utilización y frecuentemente el sistema de pozos de reinyección. La interacción de todos estos elementos influye fuertemente en los costos de inversión y por lo tanto deben estar sujetos a un cuidadoso análisis. Para dar un ejemplo, en la generación de electricidad una planta de descarga a la atmósfera es la solución más simple y consecuentemente mas barata que una planta de condensación de la misma capacidad. Estas sin embargo, requiere para operar más del doble del vapor que una planta de condensación y consecuentemente, al menos el doble de los pozos para abastecerla. Como los pozos son muy costosos, la planta eléctrica de condensación es efectivamente una opción más barata que una planta de descarga atmosférica. En efecto, esta última es elegida usualmente por razones diferentes a la económica.
- Los fluidos geotermales pueden transportarse en tuberías termalmente aisladas a distancias razonablemente grandes. En condiciones ideales pueden ser de hasta de 60 km de largo. Sin embargo, las tuberías, los equipos auxiliares necesarios (bombas, válvulas, etc) y su mantención, son todos bastante costosos y podrían pesar fuertemente en el costo de capital y en el costos de operación de la planta geotermal.

Por lo tanto, la distancia entre el recurso y el lugar de utilización debe mantenerse lo mas corta posible.

- El costo de capital de una planta geotérmica es habitualmente mayor y a veces mucho mayor, que una planta similar alimentada por combustibles convencionales. Contrariamente, la energía que acciona una planta geotérmica cuesta mucho menos que el combustible convencional, y su costo corresponde al costo de mantención de los elementos geotermiales de la planta (vaporductos, válvulas, bombas, intercambiadores de calor, etc.). El mayor costo de capital debería recuperarse por el ahorro en costos de energía. Por lo tanto el sistema recurso-planta debería programarse para una duración suficiente como para amortizar el costo inicial y en lo posible para una duración mayor.
- Se puede obtener ahorros apreciables adoptando sistemas integrados que permitan un factor de utilización mayor (por ejemplo, combinando calefacción ambiental y refrigeración) o sistemas en línea, donde las plantas están conectadas en serie, cada una utilizando el fluido de la planta precedente (por ejemplo, generación de electricidad + calefacción de invernaderos + crianza de animales) (Figura 20).

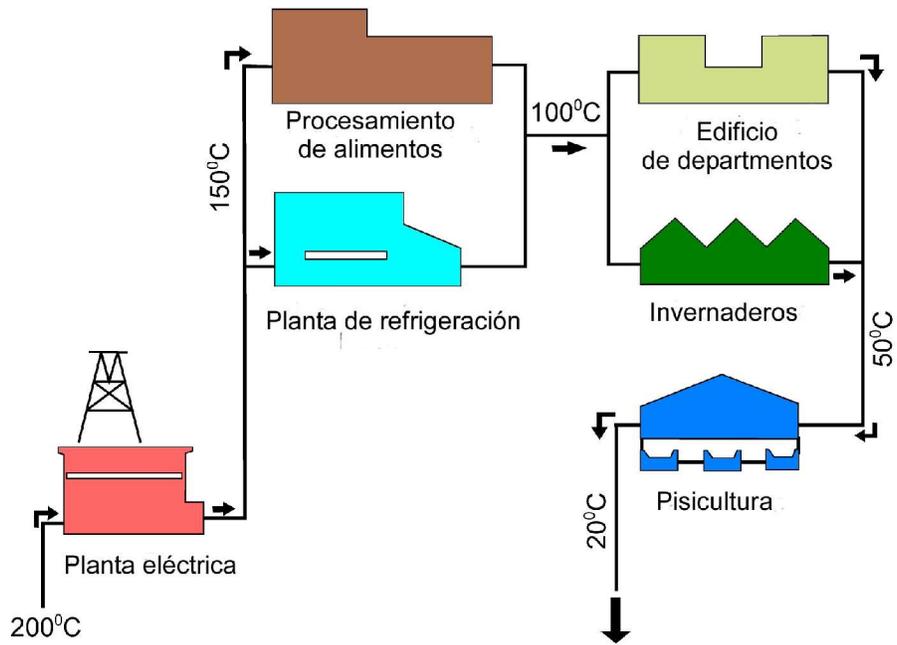


Figura 20

Usos en línea de la energía geotérmica (cortesía de Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, USA).

- Con el objeto de reducir los costos de mantención y las paralizaciones, la complejidad técnica de la planta debería ser de un nivel accesible al personal técnico local o a los expertos que se tenga disponibles. Técnicos altamente especializados serían idealmente necesitados solo para operaciones de mantención de gran magnitud o para averías mayores.
- Finalmente, si la planta geotérmica es para producir productos de consumo, debe llevarse a cabo, con anterioridad, un cuidadoso estudio de mercado para garantizar las salidas de estos productos. La infraestructura necesaria para el transporte económico de los productos, desde el sitio de producción hasta los consumidores, si no existiese debería ser incluida en el proyecto inicial.

Tabla 4. Energía y costos de inversión para producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables (Fridleifsson, 2001).

	Costo actual de la energía US¢/kWh	Posible costo futuro de la energía US¢/kWh	Costo de la planta a la entrega US\$/kW
Biomasa	5 - 15	4 - 10	900 - 3000
Geotérmica	2 - 10	1 - 8	800 - 3000
Eólica	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Solar (fotovoltaica)	25 - 125	5 - 25	5000 - 10 000
Solar (electricidad térmica)	12 - 18	4 - 10	3000 - 4000
Mareomotriz	8 - 15	8 - 15	1700 - 2500

Las observaciones anteriores deben aplicarse a cualquier forma de utilización de la energía geotérmica y cualquiera sean las condiciones locales. Para una idea cuantitativa acerca de las inversiones y de los costos se recomienda el World Energy Assessment Report elaborado por UNDP, UN-DESA y el World Energy Council, publicado en 2000. Los datos del WEA aparecen en las tablas 4 y 5, que también comparan la energía geotérmica con otras formas de energía renovable (Fridleifsson, 2001).

Tabla 5. Energía y costos de inversión para usos directos de fuentes renovables (Fridleifsson, 2001).

	Costo actual de la energía US¢/kWh	Posible costo futuro de la energía US¢/kWh	Costo de la planta a la entrega US\$/kW
Biomasa (incluye etanol)	1 - 5	1 - 5	250 - 750
Geotérmica	0.5 - 5	0.5 - 5	200 - 2000
Eólica	5 - 13	3 - 10	1100 - 1700
Calor solar de baja temperatura	3 - 20	2 - 10	500 - 1700

IMPACTO AMBIENTAL

Durante la década de los años 1960, cuando el medio ambiente era más sano que en la actualidad y se estaba menos preocupado de alguna amenaza a la tierra, la energía geotérmica era aún considerada una “energía limpia”. Actualmente no hay forma de producir o de transformar la energía a una forma que sea utilizable por el hombre sin ocasionar algún impacto directo o indirecto sobre el ambiente. Incluso la forma más antigua y simple de producir energía térmica esto es, quemando madera tiene un efecto nocivo y la deforestación, unos de los mayores problemas de los años recientes, empezó cuando nuestros ancestros cortaron árboles para coser su alimento y calefaccionar sus casas. 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 (Lunis y Breckenridge, 1991). La Tabla N°6 resume la probabilidad y la gravedad relativa de los efectos de un proyecto geotérmico para usos directos sobre el ambiente. La generación de electricidad en plantas de ciclo binario afectarán el ambiente en la misma forma que los usos directos del calor. Los efectos son potencialmente mayores en el caso de plantas eléctricas convencionales de retropresión o condensación, especialmente respecto de la calidad del aire, pero pueden mantenerse dentro de límites aceptables.

Cualquier modificación al ambiente debe evaluarse cuidadosamente, de acuerdo con las disposiciones legales, (las cuales en algunos países son muy severas), pero también debido al hecho que una aparentemente insignificativa modificación podría gatillar una cadena de

eventos cuyo impacto es difícil de evaluar completamente en forma previa. Por ejemplo, un mero incremento de 2-3°C en la temperatura de un cuerpo de agua debido a la descarga del agua de deshecho de una planta podría dañar su eco sistema. Las plantas y organismos animales que son más sensibles a las variaciones de temperaturas podrían desaparecer, dejando a las especies vegetales sin su fuente de alimentación. Un incremento en la temperatura del agua podría impedir el desarrollo de las ovas de otras especies de peces. Si estos peces son comestibles y proporcionan el necesario sustento a una comunidad de pescadores, su desaparición podría ser crítica para la comunidad.

Tabla 6. Probabilidad y gravedad del impacto potencial sobre el ambiente de los proyectos de uso directo.

Impacto	Probabilidad de ocurrencia	Gravedad de consecuencias
Contaminación del aire	L	M
Contaminación de agua superficial	M	M
Contaminación del sub-suelo	L	M
Subsidencia de terreno	L	L to M
Altos niveles de ruido	H	L to M
Reventones de pozos	L	L to M
Conflictos con aspectos culturales y arqueológicos	L to M	M to H
Problemas Socio-económicos	L	L
Contaminación química o térmica	L	M to H
Emisión de residuos sólidos	M	M to H

L = *Bajo*; M = *Moderato*; H= *Alto*
 Ref: *Lunis and Breckenridge (1991)*

El primer efecto perceptible sobre el ambiente es el de la *perforación*, ya sean pozos someros para medir el gradiente geotérmico en la fase de estudio, o bien, pozos exploratorios o de producción. La instalación de la maquinaria de sondaje de todo el equipo

accesorio vinculado a la construcción de caminos de acceso y a la plataforma de perforación. Esta última requiere un área que va de los 300 a 500 m² para una pequeña sonda montana en camión (profundidad máxima de 300 – 700 m) a 1200 – 1500 m² para una sonda pequeña a mediana (profundidad máxima de 2000 m). Estas operaciones modificarán la morfología superficial del área y podrían dañar las plantas y la vida silvestre local. Los reventones pueden contaminar el agua superficial; cuando se perforan pozos geotérmicos deberían instalarse (blow-outs preventers), presumiendo altas temperaturas y presiones (Lunis y Breckenridge, 1991). Durante la perforación o las pruebas de flujo pueden descargarse a la atmósfera gases no deseados. Normalmente los impactos sobre el medio ambiente causados por sondajes terminan una vez que estos son completados.

La etapa siguiente, de instalación de tuberías que transportarán los fluidos geotermales y la construcción de la *planta de utilización*, también afectan a plantas y animales y a la morfología de la superficie. La vista panorámica se modificará a pesar que en algunas áreas tales como Larderello, Italia, las redes de tubería que cruzan el paisaje y las torres de enfriamiento de las plantas eléctricas se han convertido en una parte integral del panorama e incluso constituyen una famosa atracción turística.

También surgen problemas ambientales durante la operación de la planta. Los fluidos geotermales (vapor o agua caliente) normalmente contienen *gases* tales como dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃), metano (CH₄) y trazas de otros gases, como también *químicos disueltos* cuyas concentraciones usualmente aumentan con la temperatura, por ejemplo, cloruro de sodio (NaCl), boro (B), Arsénico (As) y Mercurio (Hg). son una fuente de contaminación si se descargan al ambiente. Algunos fluidos geotermales, tales como aquellos utilizados en calefacción distrital 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 tornarse un problema cuando se genera electricidad mediante plantas eléctricas convencionales. El sulfuro de hidrógeno es uno de los principales contaminantes. El umbral de olor para el sulfuro de hidrógeno en el aire es alrededor de 5 partes por billón en volumen y ciertos efectos fisiológicos leves pueden ocasionarse a concentraciones levemente mayores (Weres, 1984). Sin embargo, se pueden adoptar varios procesos para reducir las emisiones de este gas. El dióxido de carbono también está presente en los fluidos utilizados en las plantas geotermoeléctricas, a pesar que, de estas plantas se descarga mucho menos CO₂ que, de las plantas alimentadas por combustibles fósiles: 13-380 g. por cada kWh de electricidad producida en plantas geotérmicas comparado con los 1042 g/kWh de las plantas a gas natural (Fridleifsson, 2001), las plantas de ciclo binario para generación eléctrica y las plantas de calefacción distrital también pueden ocasionar mínimos problemas, que pueden tornarse simples mediante la adopción de sistemas de circuito cerrado que evitan las emisiones gaseosas.

La *descarga de aguas de deshecho* también es una potencial fuente de contaminación química. El empleo de fluidos geotermales con altas concentraciones de constituyentes químicos tales como Boro, Flúor o Arsénico requiere que estos fluidos sean tratados y/o reinyectados en el reservorio. Los fluidos geotermales de baja a moderada temperatura utilizados en la mayoría de las aplicaciones de uso directo generalmente tienen bajos niveles de químicos disueltos y la descarga de los fluidos empleados es rara vez un problema mayor. Algunos de estos fluidos a menudo pueden descargarse a las aguas superficiales después de ser enfriados (Lunis y Breckenridge, 1991). Las aguas deben ser

enfriadas en piletas o estanque especiales de almacenamiento para evitar modificaciones de los ecosistemas de cuerpos naturales de aguas (ríos, lagos e incluso el mar).

La extracción de grandes cantidades de fluidos de un reservorio geotermal puede ocasionar fenómenos de *subsistencia*, esto es, un gradual hundimiento del terreno. Este fenómeno es irreversible, pero no catastrófico ya que es un proceso lento que se distribuye sobre grandes áreas. En varios años de descenso de la superficie de la tierra podrían alcanzarse niveles detestables, en algunos casos de unas pocas decenas de centímetros e incluso metros, y por lo tanto debería ser monitoreado en forma sistemática, ya que podría afectar la estabilidad de las construcciones geotermales y algunos hogares del vecindario. En muchos casos la subsistencia puede ser evitada o reducida mediante la reinyección de las aguas geotermales previamente utilizadas.

La eliminación y/o reinyección de los fluidos geotermales puede gatillar o aumentar la frecuencia *sísmica* en ciertas áreas. Sin embargo estos son micro sismos que solo pueden detectarse mediante instrumentos, la explotación de recursos geotermales difícilmente podría gatillar sismos mayores, y nunca se ha sabido que los haya provocado.

El *ruido* asociado al funcionamiento de plantas geotermales podría ser un problema cuando se trata de plantas geotermoelectricas. Durante la fase de producción ocurre el mayor grado de ruido del vapor transportado a través de las tuberías y la ocasional descarga de vapor. Normalmente estos son aceptables. En las plantas eléctricas la principal contaminación acústica proviene de los ventiladores de las torres de enfriamiento, de los inyectores de vapor y el zumbido de las turbinas (Brown, 2000). En las aplicaciones directas del calor el ruido generado es normalmente despreciable.

PRESENTE Y FUTURO

La energía termal presente en el subsuelo es enorme. Un grupo de expertos ha estimado (Tabla 7) el potencial geotérmico de cada continente en términos de recursos de alta y baja temperatura (International Geothermal Association, 2001).

Tabla 7. Potencial geotérmico mundial (International Geothermal Association, 2001)

	Recursos de alta temperatura adecuados para generación eléctrica		Recursos de baja temperatura adecuados para uso directo en millones de TJ/año de calor (limite inferior)
	Tecnología convencional en TWh/año de electricidad	Tecnología convencional y binaria en TWh/año de electricidad.	
Europe	1830	3700	> 370
Asia	2970	5900	> 320
Africa	1220	2400	> 240
North America	1330	2700	> 120
Latin America	2800	5600	> 240
Oceania	1050	2100	> 110
Potential mundial	11 200	22 400	> 1400

Si se explota correctamente, la energía geotérmica podría verdaderamente asumir un rol importante en el balance de energía de algunos países. En ciertas circunstancias, incluso recursos geotérmicos de pequeña escala, son aptos para solucionar numerosos problemas locales y mejorar la calidad de vida de pequeñas comunidades aisladas.

Los datos reportados por Fridleifson (2003) dan alguna idea acerca del rol de la energía geotérmica respecto de otras fuentes de energía renovables: del total de la electricidad producida mediante energías renovables, en 1998, esto es 2.826 TWh, el 92% corresponde

a hidroelectricidad, el 5,5% a biomasa, el 1,6% a geotérmica, el 0,6% aeólica, el 0,05% a solar y el 0,02% a mareomotriz. La biomasa constituye el 93% de la producción total de calor a partir de renovables, la geotérmica representa el 5% y la calefacción solar el 2%.

REFERENCIAS

ARMSTEAD, H.C.H., 1983. *Geothermal Energy*. E. & F. N. Spon, London, 404 pp.

AXELSSON, G. and GUNNLAUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: *Long-term monitoring of high- and low enthalpy fields under exploitation*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 3-10.

BARBIER, E. and FANELLI, M., 1977. Non-electrical uses of geothermal energy. *Prog. Energy Combustion Sci.*, **3**, 73-103.

BEALL, S. E, and SAMUELS, G., 1971. The use of warm water for heating and cooling plant and animal enclosures. *Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-TM-3381, 56 pp.

BENDERITTER, Y. and CORMY, G., 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 59—69.

BROWN, K. L., 2000. Impacts on the physical environment. In: Brown, K.L., ed., *Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, WGC 2000 Short Courses, Japan, 43—56.

BUFFON, G.L., 1778. *Histoire naturelle, générale et particulière*. Paris, Imprimerie Royale, 651 p.

BULLARD, E.C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In : Lee, W.H.K., ed. *Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **8**, pp.1-6.

- COMBS, J. and MUFFLER, L.P.J., 1973. Exploration for geothermal resources. In : Kruger, P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp.95—128.
- ENTINGH, D. J., EASWARAN, E. and McLARTY, L., 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. *U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C.*, 12 pp.
- FRIDLEIFSSON, I.B., 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**, 299-312.
- FRIDLEIFSSON, I. B., 2003. Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *IGA News*, No.52, 13-14.
- GARNISH, J.D., ed., 1987. Proceedings of the First EEC/US Workshop on Geothermal Hot-Dry Rock Technology, *Geothermics* **16**, 323—461.
- GUDMUNDSSON, J.S., 1988. The elements of direct uses. *Geothermics*, **17**,119—136.
- HOCHSTEIN, M.P., 1990. Classification and assessment of geothermal resources. In: Dickson, M.H. and Fanelli, M., eds., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, pp. 31—57.
- HUTTRER, G.W., 2001. The status of world geothermal power generation 1995-2000. *Geothermics*, **30**, 7-27.
- INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2001. Report of the IGA to the UN Commission on Sustainable Development, Session 9 (CSD-9), New York, April.
- LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, pp.135—148.
- LUBIMOVA, E.A., 1968. Thermal history of the Earth. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., **13**, pp.63—77.

- LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. and Muffler, L.J.P., eds., *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77—108.
- LUND, J. W., SANNER, B., RYBACH, L., CURTIS, R., HELLSTROM, G., 2003. Ground-source heat pumps. *Renewable Energy World*, Vol.6, no.4, 218-227.
- LUND, J. W., 2003. The USA country update. *IGA News*, No. 53, 6-9.
- LUND, J. W., and BOYD, T. L., 2001. Direct use of geothermal energy in the U.S. – 2001. *Geothermal Resources Council Transactions*, **25**, 57-60.
- LUND, J. W., and FREESTON, D., 2001. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics* **30**, 29- 68.
- LUNIS, B. and BRECKENRIDGE, R., 1991. Environmental considerations. In: Lienau, P.J. and Lunis, B.C., eds., *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, pp.437—445.
- MEIDAV, T., 1998. Progress in geothermal exploration technology. *Bulletin Geothermal Resources Council*, **27**, 6, 178-181.
- MUFFLER, P. and CATALDI, R., 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* , **7**, 53—89.
- NICHOLSON, K., 1993. *Geothermal Fluids*. Springer Verlag, Berlin, XVIII—264 pp.
- POLLACK, H.N., HURTER, S.J. and JOHNSON, J.R., 1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* **31**, 267—280.
- RAFFERTY, K., 1997. An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner. *Bull. Geo-Heat Center* , **18**, 2, 1—11.

- SANNER, B., KARYTSAS, C., MENDRINOS, D. and RYBACH, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage. *Geothermics*, Vol.32, 579-588.
- STACEY, F.D. and LOPER, D.E., 1988. Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology. *Phys. Earth. Planet. Inter.* **53**, 167 - 174.
- STEFANSSON, V., 2000. The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan*. On CD-ROM
- TENZER, H., 2001. Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo-Heat Center*, **32**, 4, 14-22.
- WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. *Lawrence Berkeley Laboratory, Calif.*, LBL 14403, 44 pp.
- WHITE, D. E., 1973. Characteristics of geothermal resources. In: Kruger, P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp. 69-94.
- WRIGHT, P.M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Bull. Geo-Heat Center*, **19**, 2, 9-12.