



Master Oficial
Agua. Análisis Interdisciplinario y Gestión Sostenible
Universitat de Barcelona
Trabajo de Investigación
Curso 2010/2011

Estudio de la Energía Geotérmica de Catalunya.

Caso de Caldes de Malavella

Alumno: Helena Testar Sevilla

Trabajo dirigido por: José M^a Carmona

Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica.

Universidad de Barcelona

Barcelona, 20 de junio de 2011

RESUMEN

Para la realización de este trabajo se ha llevado a cabo una búsqueda de información bibliográfica para su desarrollo descriptivo y posterior análisis. De este modo, después de contextualizar el ámbito específico de las Cadena Costera Catalana y los Pirineos las diferentes manifestaciones geotermales de Catalunya, se pretende profundizar en el conocimiento de las aguas termales de Caldes de Malavella.

El termalismo catalán está asociado a movimientos tectónicos. Tanto en los Pirineos como en la Cordillera Costera Catalana el origen de los manantiales termales parece estar en la infiltración profunda de aguas meteóricas, las cuales calentadas por efecto de un gradiente geotérmico en general positivamente anómalo, ascienden a la superficie aprovechando las zonas de máxima conductividad hidráulica tales como las fracturas tectónicas. En los Pirineos la distribución es irregular y aparecen asociados a fracturas periféricas de macizos intrusivos. Se trata de aguas bicarbonatadas sódicas con circulación asociada a granitos y de escasa mineralización. En los Catalánides, los manantiales geotermales aparecen situados sobre las fallas de dirección NE-SW, que condicionan la existencia de las fosas prelitorales catalanas, concretamente, en el Vallès y en la Selva. Se distinguen 2 facies hidroquímicas: bicarbonatada sódica y clorurada sódica. La primera corresponde a circulación por granitos y la segunda a circulación profunda a través de materiales sedimentarios.

Los manantiales termales se caracterizan por tener temperatura y caudales constantes. El régimen de descarga constante implica que la recarga o el almacenamiento de los recursos es mucho mayor que la descarga. Las aguas geotermales también presentan estabilidad de la composición química.

En Catalunya solo existen yacimientos de baja y media entalpia con posibilidades de aprovechamiento en diferentes usos, entre los que cabe destacar los balnearios y las aguas envasadas.

En cuanto al caso de Caldes de Malavella, son consideradas aguas de alta mineralización, bicarbonatadas sódicas, fluoradas y hipertermales (60°C). Existe un total predominio del Na^+ sobre los demás cationes, escasa proporción de SO_4^- y disminución de SiO_2 respecto los manantiales pirenaicos. Debido a su alto contenido en CO_2 son aguas aciduladas carbónicas.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. <i>Contextualización general en la estructura de flujo de calor del NE de la Península Ibérica</i>	5
1.2. <i>Contextualització general en la estructura de los sistemas geotermales del NE de la Península Ibérica</i>	11
2. OBJETIVOS GENERALES	17
2.1. <i>Recursos-reservas</i>	17
2.1.1. <u>Manantiales carbónicos:</u>	20
2.1.2. <u>Manantiales sulfhídricos</u>	22
2.1.3. <u>Localización de los manantiales geotermales</u>	25
2.2 <i>Aprovechamientos</i>	29
2.3. <i>Temperatura-energía acumulada</i>	31
2.3.1. <u>Geotermómetros químicos</u>	31
2.3.2. <u>Geotermómetros isotópicos</u>	34
2.4. <i>Calidad del agua y usos</i>	35
2.5. <i>Posibilidades de explotación</i>	37
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. CASO DE CALDES DE MALAVELLA	39
3.1. <i>Recursos-reservas</i>	44
3.1.3.1. <u>Pirineo</u>	26
3.1.3.2. <u>Catalánides</u>	27
3.2. <i>Calidad del agua y usos</i>	47
3.2.1. <u>Hidroquímica</u>	47
3.2.2. <u>Usos del agua termal:</u>	48
3.3. <i>Temperatura-energía acumulada</i>	49
3.4. <i>Posibilidades de explotación</i>	50
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
5. CONCLUSIONES	53

1. INTRODUCCIÓN

Debido al agotamiento de las fuentes de energía fósil, las energías renovables van tomando cada vez más importancia como única alternativa. Aunque existe gran variedad de energías renovables, éstas se reducen esencialmente a: el Sol y la Tierra.

Actualmente, la energía geotérmica en Catalunya sigue sin ser una fuente cuantitativamente importante para el suministro de energía, aun así, cada vez está tomando mayor importancia. A diferencia de la solar o la eólica, la energía geotérmica, que aprovecha el calor almacenado bajo la superficie de la Tierra, se genera continuamente. Por esta razón, es una fuente que se debe potenciar.

Por tanto, este trabajo surge de la necesidad de profundizar en ésta energía renovable, y sus posibilidades de explotación en Catalunya.

Para la realización de este trabajo se ha llevado a cabo una búsqueda de información bibliográfica para su desarrollo descriptivo y posterior análisis. De este modo, después de contextualizar el ámbito específico de las Cadena Costera Catalana y los Pirineos las diferentes manifestaciones geotermales de Catalunya, se pretende profundizar en el conocimiento de las aguas termales de Caldes de Malavella.

1.1. Contextualización general en la estructura de flujo de calor del NE de la Península Ibérica

El termino geotermia se refiere a la energía térmica producida en el interior de la Tierra. Geotermia proviene del griego geo, “Tierra”, y thermos, “calor”: literalmente “calor de la Tierra”.

La energía geotérmica es aquella que se obtiene mediante la extracción y aprovechamiento del calor interno de la Tierra que, a nivel global, puede considerarse continuo e inagotable a escala humana. Este calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, principalmente al gradiente geotérmico y al calor radiogénico.

El recurso geotérmico depende de las condiciones geológicas. Así, se puede afirmar que el recurso geotérmico es aquella parte de la energía geotérmica contenida en las rocas del subsuelo que puede ser aprovechada por el hombre. Cuando en una zona geográfica se presentan las condiciones geológicas y económicas necesarias para poder explotar la energía geotérmica del subsuelo, se dice que allí existe un yacimiento geotérmico. Los yacimientos geotérmicos, si se gestionan de manera correcta, pueden mantener su producción de energía indefinidamente, ajustando la extracción de calor a la cantidad que se genera.

La energía geotérmica es una energía renovable. Éste tipo de energías son recursos de abastecimiento energético respetuosos con el medio ambiente, pero esto no significa que no tengan efectos negativos en el entorno, aunque éstos son mucho menores en comparación con los impactos ambientales de las energías convencionales (combustibles fósiles: petróleo, gas y carbón; energía nuclear, etc.).

Ventajas:

- Producciones de energía útil neta en caso de yacimientos grandes y de fácil acceso.
- Los recursos geotérmicos son mayores que los recursos de carbón, petróleo, gas natural y uranio combinados.
- El costo de producir electricidad en plantas geotérmicas es menor que el de las plantas de carbón y mucho menor que el de las plantas nucleares nuevas.

- Los residuos que produce son mínimos y ocasionan menor impacto ambiental que los originados por el petróleo y el carbón.
- La emisión de CO₂, con aumento de efecto invernadero, es inferior al que se emitiría para obtener la misma energía mediante combustibles fósiles.
- El área de terreno requerido por las plantas geotérmicas por megavatio es menor que otro tipo de plantas. No requiere construcción de represas, tala de bosques, ni construcción de tanques de almacenamiento de combustibles.
- Ausencia de ruidos exteriores.
- Es una fuente que evitaría a muchos países la dependencia energética del exterior.
- No está sujeta a precios internacionales, sino que siempre puede mantenerse a precios nacionales o locales.
- Sistema de gran ahorro, tanto económico como energético.

Desventajas:

- La principal desventaja es la escasez de yacimientos de fácil acceso y si no son bien administrados pueden agotarse en pocas décadas.
- En algunas áreas el desarrollo geotérmico puede destruir o degradar bosques u otros ecosistemas
- Contaminación del agua, entre alta y moderada, por sólidos disueltos y dispersión de compuestos tóxicos de metales pesados como mercurio y arsénico.
- No se puede transportar si no es transformada en energía eléctrica.

Teniendo en cuenta la necesidad de profundizar en la energía geotérmica para conocer sus posibilidades de explotación en Catalunya, se publicó en 2010 el Atlas de Recursos Geotérmicos de Catalunya, donde se recoge el estado actual del conocimiento geotérmico en Catalunya con el objetivo de evaluar el potencial geotérmico. En éste Atlas se presentan los mapas de temperatura superficial reducida, temperatura a 100 m de profundidad, salto térmico a 100 m de profundidad, gradiente geotérmico y flujo de calor superficial. Para la realización de este trabajo se tuvieron en cuenta los mapas de gradiente geotérmico (Fig. 1) y de flujo de calor (Fig. 2), ya que son éstos los que ayudan a la comprensión de los procesos geotérmicos que tienen lugar en Catalunya, su ubicación y sus posibilidades de explotación.

El mapa de gradientes geotérmicos de Catalunya (Fig. 1) se ha elaborado a partir de los gradientes naturales de cada sondeo. El gradiente natural es el gradiente dominante que puede deducirse de una termometría y que es consecuencia de la superposición de dos señales: la señal térmica de fondo de origen interno y perturbaciones térmicas de carácter transitorio y convectivo debidas a factores ambientales externos. Para evitar el efecto de las perturbaciones de temperaturas diurnas y anuales no se han considerado las temperaturas de los primeros 30 m.

La convección se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Éstos fluidos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. La convección es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendentes y descendentes del fluido.

Por lo que se refiere al mapa de gradiente geotérmico (Fig. 1) se puede observar, a nivel regional, un aumento del gradiente geotérmico desde el Pirineo hacia la costa. Se destacan dos anomalías regionales, una negativa en la desembocadura del Ebro y otra positiva del Vallès Oriental. Se descarta un origen mantélico de estas anomalías y se interpretan como producto de circulación de agua: la primera efecto de una amplia zona de recarga, y la segunda como artificio de interpolación que engloba anomalías convectivas muy locales.

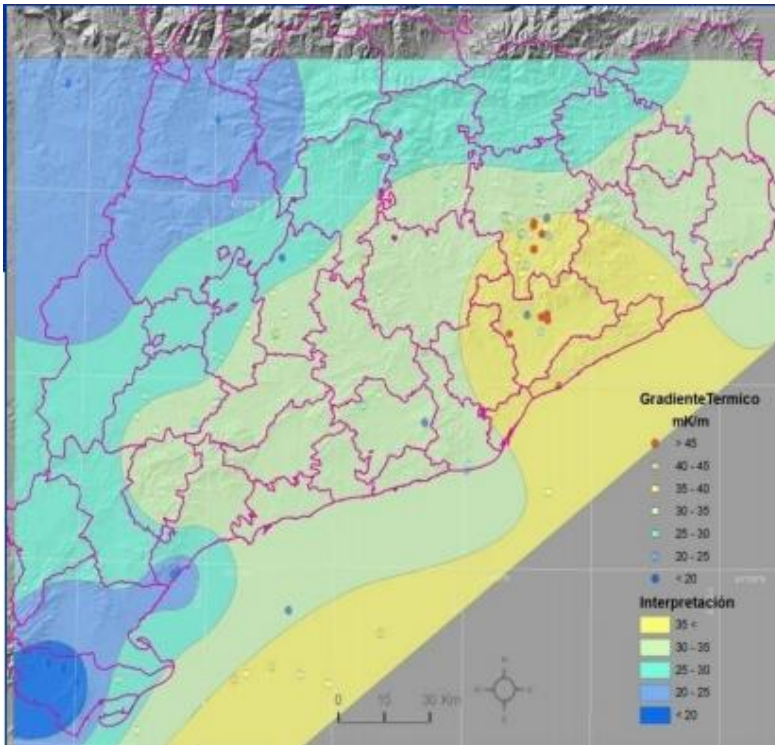


Figura 1. Mapa de Catalunya de gradiente geotérmico. (Fuente: Atlas de Recursos Geotérmicos de Catalunya: Régimen térmico superficial; Puig et al., 2010)

La anomalía regional negativa de la desembocadura del Ebro está muy bien delimitada por una serie de termometrías coherentes entre ellas. Afecta a las Cordilleras Costeras y a la Cuenca del Baix Ebre, y se explica como efecto de un proceso de infiltración rápido a través de sedimentos aluviales y calizas mesozoicas, fuertemente fisuradas y karstificadas en esta zona (Fernández, Torné y Zeyen, 1990). Esta anomalía es la manifestación de una amplia zona de recarga, cuya descarga se sitúa en la plataforma del Ebro, frente a la costa de Castellón, y no tiene continuidad en profundidad. La anomalía negativa de la desembocadura del Ebro se extiende hacia el norte, siguiendo estribaciones de la Cadena Costera, incluidas también en la zona de recarga de este gran sistema convectivo. De forma puntual se observan una serie de gradientes elevados en el centro de Catalunya, entre las comarcas de la Anoia, la Segarra y el Solsonès, que aun no han sido descritos.

La anomalía positiva del Vallés Oriental parece intensificarse englobando otras anomalías puntuales más al norte, en la Depresión de Osona. Estas anomalías han sido descritas por procesos de infiltración lenta en los límites de la depresión y descarga rápida a través de una serie de fallas orientadas NW-SE (Cabal y Fernández, 1995).

Por ejemplo, en Samalús, en el sur del macizo del Montseny, al sur de la anomalía positiva del Vallès Oriental, se ha estudiado una de estas anomalías locales en detalle (Fernández y Banda, 1988). Samalús se encuentra ubicado en el borde de una cuenca distensiva neógena. Este borde está determinado por una falla que pone en contacto la Depresión del Vallès-Penedès con el Sistema Litoral. En el estudio de Fernández y Banda (1990) se concluye que las anomalías positivas locales de Samalús están asociadas a fallas de dirección NW-SE que permiten la descarga rápida de agua infiltrada lentamente en zonas adyacentes. Por tanto, la extensión en profundidad de estas anomalías está limitada a la profundidad de estas estructuras geológicas (< 3 km) y en superficie a un entorno de 5 km^2 de extensión. Las temperaturas anómalas de otros sondeos de la zona podrían ser resultado de procesos similares aún no descritos.

Por lo que se refiere al flujo de calor superficial (Fig. 2), que es la cantidad de calor que emite la Tierra por unidad de superficie y tiempo, resulta del producto del gradiente geotérmico y la conductividad térmica del medio.

Medir directamente la conductividad térmica del medio es un proceso muy costoso y por tanto suele deducirse de la correlación de litologías con medidas de laboratorio tabuladas. Como método de correlación se ha utilizado el desarrollado por Fernández et al. (1998) que asocia a valores típicos de conductividad térmica en matriz rocosa un decaimiento según la edad de la formación. Albert (1979) asume una conductividad térmica constante de $2,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para Catalunya.

El flujo de calor medio superficial en la península Ibérica ($65 \pm 10 \text{ mW m}^{-2}$) y no cambia sustancialmente de un lugar a otro. Las mayores variaciones se asocian con el Atlántico y los márgenes del Mediterráneo, donde el flujo de calor alcanza valores de alrededor de $40\text{-}50 \text{ mW m}^{-2}$ y 80 a 100 mW m^{-2} , respectivamente.

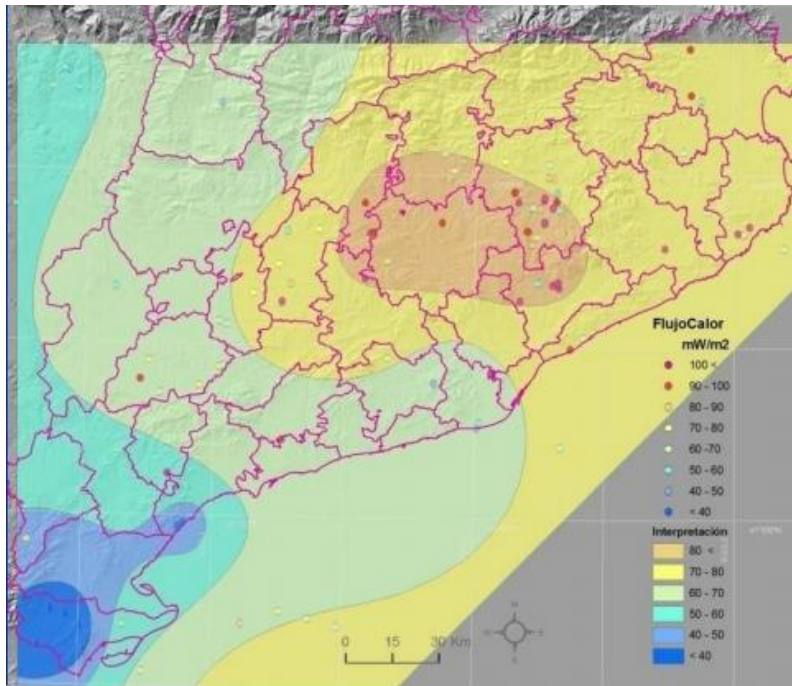


Figura 2. Mapa de Catalunya de flujo de calor superficial. (Fuente: *Atlas de Recursos Geotérmicos de Catalunya: Régimen térmico superficial*; Puig et al., 2010)

El mapa de flujo de calor superficial muestra ciertas similitudes con el de gradiente. Se confirma la anomalía regional de la desembocadura del Ebro, y la anomalía del Vallés Oriental se extiende hacia comarcas del interior descritas anteriormente. Las diferencias entre ambos mapas son debidas a la conductividad térmica, cuyos valores estimados acentúan y amplifican las anomalías.

1.2. Contextualització general en la estructura de los sistemas geotermales del NE de la Península Ibérica

La transmisión de calor hacia la superficie de la tierra se produce a través de dos fenómenos combinados: conducción y convección (Fig 3). La baja conductividad térmica de los materiales de la corteza terrestre ($3-15 \text{ mcal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) hace que la primera sea de poca importancia y que no sea suficiente para explicar las anomalías geotérmicas. La parte más importante de transmisión de calor en los fenómenos geotérmicos se produce por convección de líquidos y gases (ver convección, apartado 2.2.1 pág. 5).

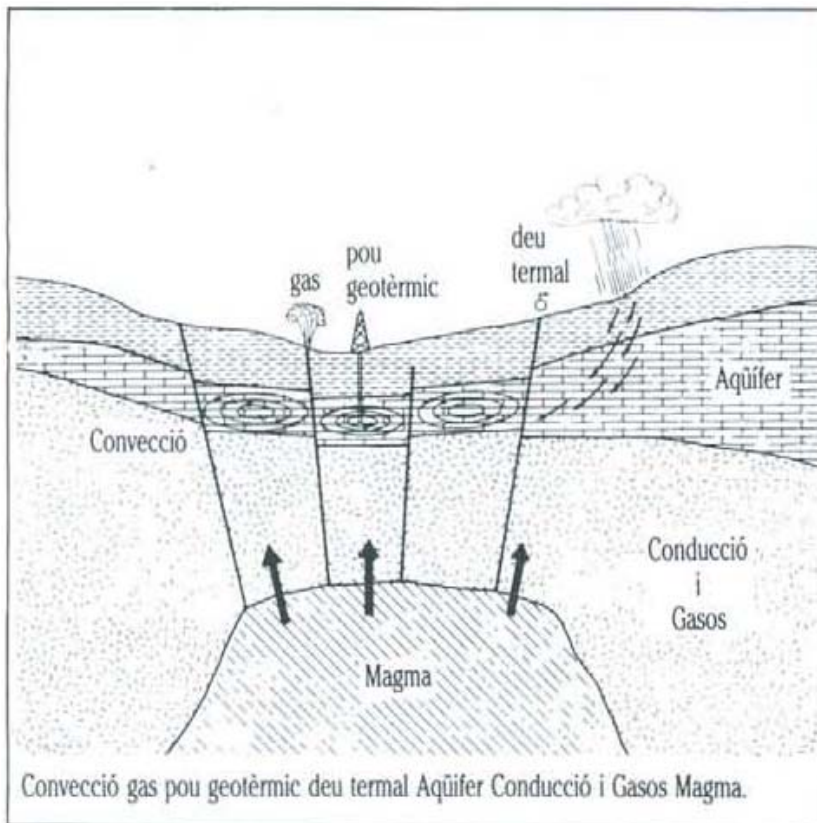


Figura 3. Esquema sistema de transporte de calor por convección y por conducción. (Fuente: *El calor de la Terra; Albert, 1988*)

El calor que la Tierra pierde hacia el exterior es reconducido a través de las estructuras de la capa rígida más externa, la litosfera. Por lo tanto, para poder comprender las observaciones geotérmicas, han de conocerse bien los procesos de deformación de la estructura tectónica y los procesos de circulación de agua que suceden en la litosfera,

especialmente en la corteza superior. En este apartado se presentan mapas estructurales, gravimétricos y de masas de agua subterránea con la finalidad de poder explicar la existencia de las diversas manifestaciones geotermales de Catalunya, relacionando la ubicación de éstas manifestaciones con procesos estructurales y gravimétricos.

En cuanto al mapa gravimétrico, la principal observación (Fig. 4) es el acusado gradiente regional producido por el aumento de grosor de la corteza terrestre desde la costa hacia el NW y la de raíz de los Pirineos.

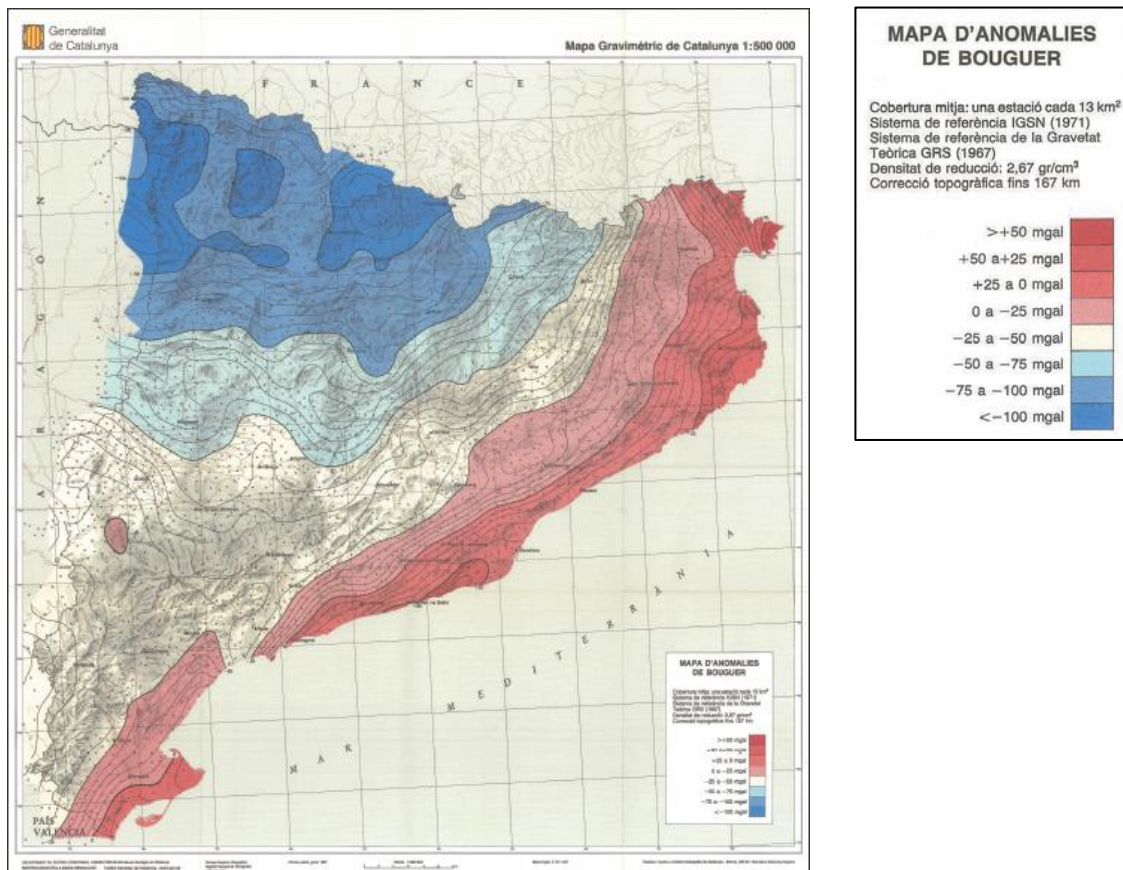


Figura 4. Mapa gravimétrico de Catalunya (Fuente: Institut Geològic de Catalunya 2010, www.igc.cat)

La principal característica del mapa de anomalías de Bouguer de Catalunya (Fig. 4) es el acusado gradiente regional desde un máximo de +50 miligales en el extremo NE a un mínimo de -115 miligales en el NW. Esta tendencia está producida fundamentalmente por las variaciones de espesor de la corteza terrestre, ya que el mapa no incluye la corrección isostática en el cálculo de la anomalía de Bouguer. Este hecho ya fue puesto en evidencia por anteriormente en la interpretación de los perfiles sísmicos profundos de los Pirineos, donde encontraron un adelgazamiento de la corteza terrestre, que pasa

desde 45 km en el Pirineo Central a 20 km en la costa. Por analogía puede deducirse que la corteza se adelgaza más rápidamente en la costa, sobre todo en el sector central de los Catalánides, como indica el aumento del gradiente mostrado por las curvas isoanómalas.

Del mismo modo, el mapa sugiere un adelgazamiento de la corteza en la zona de la Depresión del Ebro.

Algunas de las anomalías residuales (Fig. 5) calculadas en el estudio de Torné, Casas y Banda (1987) por sustracción de una superficie de tercer grado pueden fácilmente relacionarse con estructuras geológicas conocidas. Tal es el caso de los mínimos gravimétricos que pueden explicarse por cuencas sedimentarias, diapiros salinos o intrusiones graníticas, mientras que, el origen de los máximos gravimétricos no es evidente ya que pueden ser debidos a la presencia de rocas más densas en el basamento o bien a la morfología del mismo.

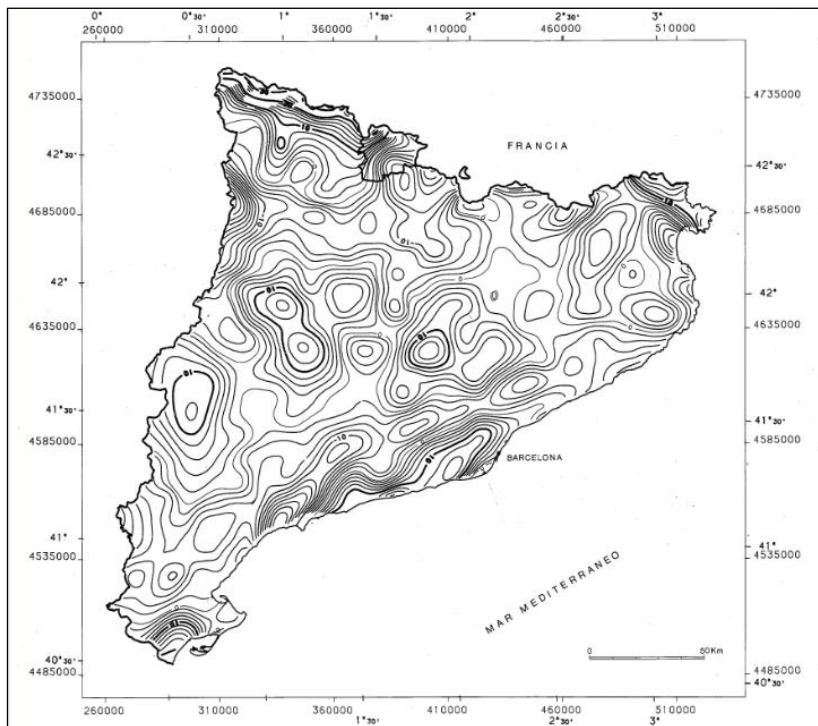


Figura. 5. Mapa de anomalías residuales de Catalunya (Fuente: *Cartografía física en Catalunya. II: El mapa gravimétrico. M. Torné, Casas y Banda, 1987*)

El mapa de anomalías residuales (Fig. 5) muestra una muy buena correlación con la geología, destacando las siguientes características:

- La existencia de mínimos gravimétricos acusados en las depresiones distensivas neógenas de Reus-Valls, Vallès-Penedès y Empordà.
- Los mínimos gravimétricos asociados a los anticlinales de material evaporítico, con núcleos diapirizados de Cardona, Calaf y Balaguer.
- La relación entre mínimos gravimétricos y los macizos graníticos de Andorra-MontLouis, del Montseny y de Alforja-Reus.
- La aparición de máximos gravimétricos de gran extensión en la Depresión Central, no relacionados con ningún fenómeno aparente en superficie, y considerando que la base del Terciario varía regularmente según evidencian los datos sísmicos y los sondeos existentes, puede afirmarse que su origen no se debe a variaciones de espesor de la cobertera sedimentaria terciaria. En consecuencia se puede establecer para la interpretación dos hipótesis: la primera de ellas supone la existencia de rocas de mayor densidad en el basamento, y la segunda requiere una estructura en bloques del mismo.

En el mapa de áreas hidrogeológicas de Catalunya (Fig. 6) se define la orientación de éstas respecto las estructuras generales de Catalunya de dirección NE-SW y coinciden con la dirección del gradiente gravimétrico (Fig. 4) producido por el aumento de grosor de la corteza terrestre desde la costa hacia el NW, lo que indica la relación existente entre la morfoestructura y las características geológicas y geométricas de las grandes unidades hidrogeológicas.

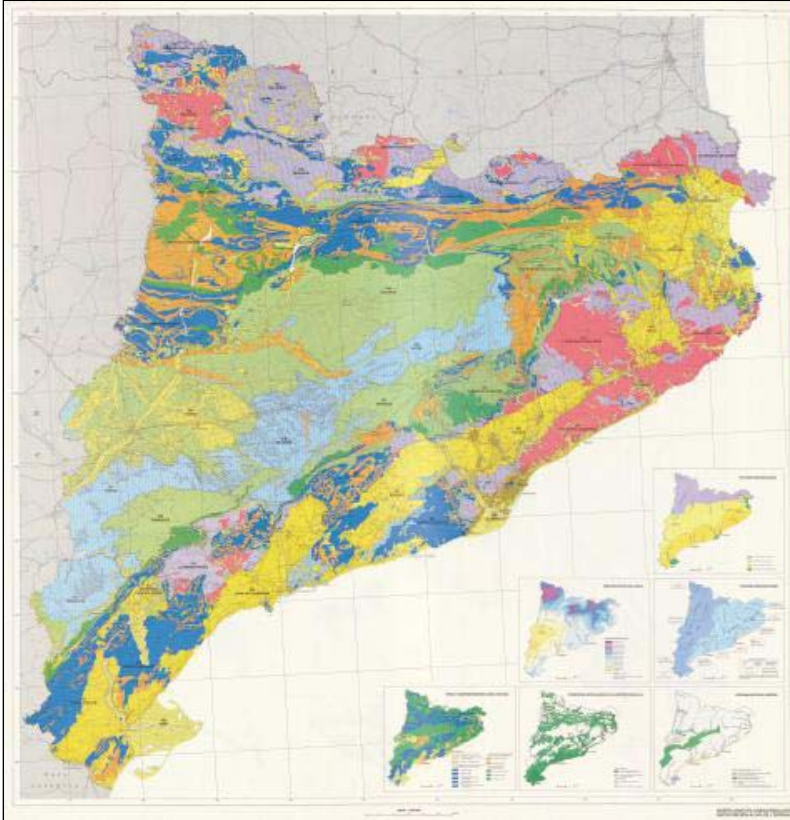


Figura 6. Mapa de áreas hidrogeológicas de Catalunya (Fuente: Institut Geològic de Catalunya 2010, www.igc.cat)

Por lo que se refiere a las diferentes manifestaciones hidrotermales de Catalunya, aparecen en dos unidades morfoestructurales bien definidas: Pirineos y Catalánides.

Estas manifestaciones son principalmente manantiales geotermales, que presentan una distribución irregular en el Pirineo, encontrándose la mayoría de ellos en la vertiente francesa. En la vertiente española se localizan mayoritariamente en la parte oriental, principalmente en el Pirineo leridano y gerundense. La mayor parte de éstos están asociados a bordes de macizos intrusivos, concretamente a fracturas periféricas a los mismos que actúan como vías preferenciales de circulación ascendente de estas aguas.

Por lo que se refiere a los Catalánides, éstos se configuran por dos alineaciones montañosas paralelas, la Cordillera Prelitoral y la Cordillera Litoral. Estas dos cadenas están separadas por una fosa tectónica conocida como la Depresión Prelitoral, formada por fosas tectónicas distensivas separadas de sus respectivos horsts por fallas. La Cordillera Prelitoral es la alineación interior y está en contacto con la Depresión del Ebro. En los Catalánides, la mayoría de los manantiales

aparecen en las líneas de falla que constituyen los bordes de las depresiones distensivas, en el Vallès y en la Selva.

Tanto en los Pirineos como en la Cordillera Costera Catalana el origen de los manantiales termales parece estar en la infiltración profunda de aguas meteóricas, las cuales calentadas por efecto de un gradiente geotérmico en general positivamente anómalo, ascienden a la superficie por efecto de termosifón, aprovechando las zonas de máxima conductividad hidráulica tales como las fracturas tectónicas. Éstos manantiales se sitúan en los puntos en que las fracturas cortan el fondo de los valles (nivel piezométrico mínimo), y son frecuentes las surgencias múltiples originadas por un mismo tronco termal ramificado por efecto de la fracturación superficial. Sus caudales son muy variables y oscilan entre 4 L /min en Espot, en el Pirineo, y 600 L /min en la Puda de Montserrat, en la Cordillera Prelitoral. Su régimen de descarga es muy constante ya que las reservas de estos sistemas geotermales son muy grandes (Pág. 15).

2. OBJETIVOS GENERALES

En éste apartado se pretende contextualizar en el ámbito específico de las Cadena Costera Catalana y los Pirineos las diferentes manifestaciones geotermales de Catalunya, identificando los diferentes sistemas geotermales que existen en Catalunya y evaluar diferentes aspectos.

2.1. Recursos-reservas

En este apartado se analizarán las manifestaciones geotermales, el aprovechamiento que se hace ellas, las instalaciones existentes y el potencial para la explotación de energía geotérmica en Catalunya.

Todos los casos conocidos de manifestaciones geotérmicas en forma de fluidos termales, están constituidos por aguas meteóricas que, una vez infiltradas y después de haber experimentado un periodo más o menos largo de residencia en profundidad, donde se han calentado, surgen a la superficie a través de zonas de máxima conductividad hidráulica.

En base a la aplicación de técnicas de estudio hidráulico, estudio isotópico y estudio geoquímico de los fluidos hidrotermales realizadas por Albert, Coromimas y París (1979) referentes a manifestaciones geotermales de Catalunya cuyas temperaturas oscilan entre 20° y 70 ° C, se puede concluir que:

- Los manantiales se caracterizan por la estabilidad térmica y de descarga, independientemente de las variaciones estacionales de infiltración. Este régimen contante implica una recarga y/o almacenamiento muy superior a la descarga (con transmisividad también reducida) (pág. 14).
- Los análisis de tritio ponen de manifiesto que estas aguas son de aporte meteórico anterior a los últimos veinte-veinticinco años, consecuentemente, un tiempo de residencia mayor.
- Los isotopos estables, según los datos de deuterio y de oxígeno 18, ponen de manifiesto un grado de fraccionamiento isotópico por vaporización acorde con los resultados de los geotermómetros químicos, dado que las aguas geotermales

de Catalunya no alcanzan los 100°C no existe vaporización.

- Los cálculos realizados con geotermómetros permiten distinguir entre manantiales debidos a mecanismos de descarga de sistemas con implicación geotérmica (80°-120°C), de los debidos a un simple calentamiento del agua durante su tránsito subterráneo.
- El termalismo catalán se encuentra en relación con materiales graníticos.

Desde el punto de vista químico, en Catalunya existen dos tipos de manantiales diferenciados descritos en los estudios citados anteriormente: manantiales de aguas carbónicas y manantiales sulfhídricos. En la Figura 7 se muestra la localización de los distintos manantiales descritos en los trabajos de Albert, Corominas y París (1979), Corominas (1978) y París y Albert (1976).

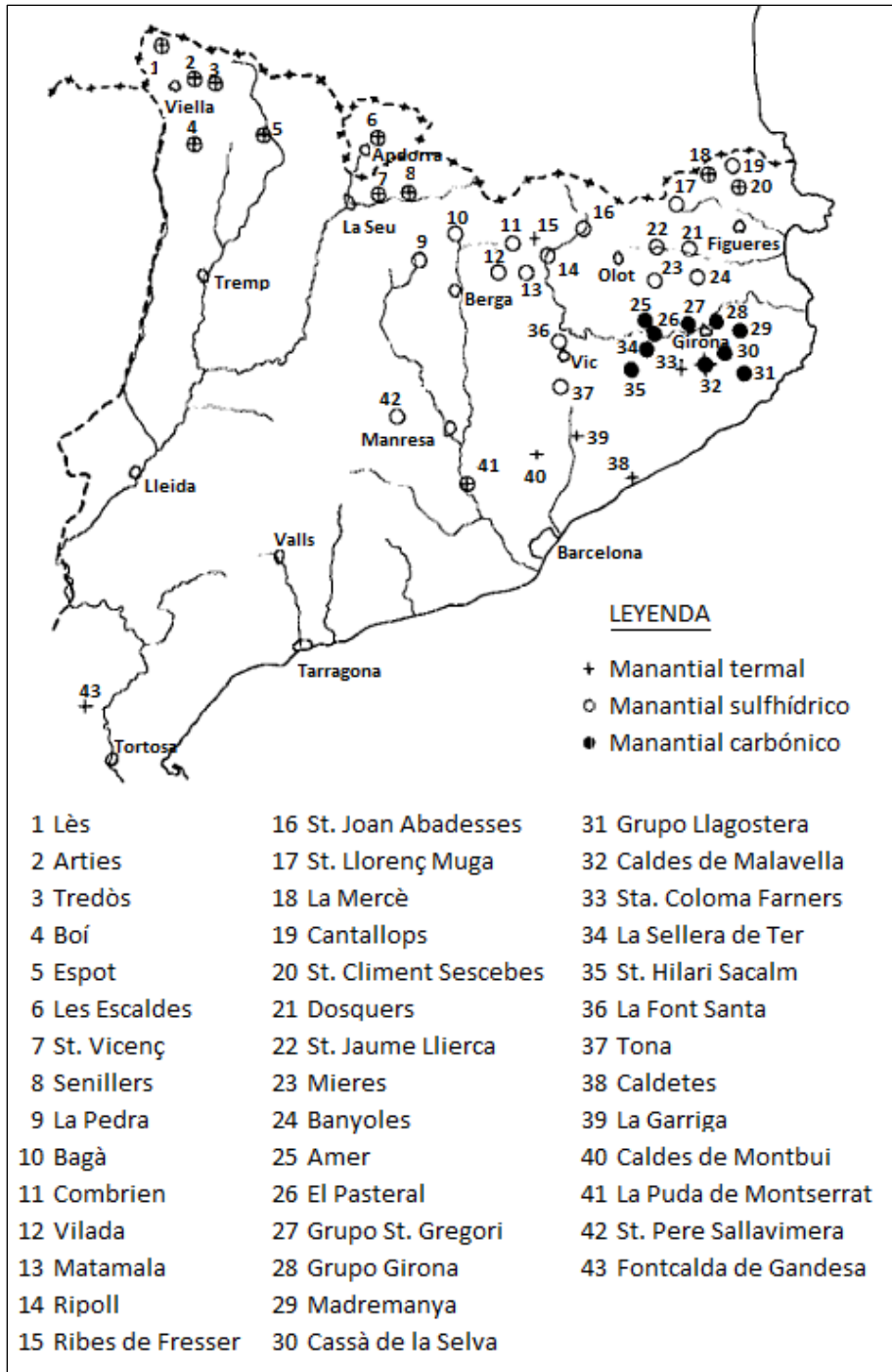


Figura 7. Manifestaciones termales de Catalunya. (Albert, Corominas y París; 1979)

2.1.1. Manantiales carbónicos:

Los manantiales carbónicos de Catalunya, concentrados en la provincia de Girona aparecen en los bordes de las grandes fallas que determinan la tectónica regional. Las fracturas N-S y NW-SE que dan lugar a las dos grandes fosas del Empordà y La Selva, junto con los respectivos horsts, Guillerries y Gavarres, constituyen las vías preferentes de circulación ascendente de las mencionadas aguas gaseosas. En la figura 8 se detalla la localización de los diferentes manantiales carbónicos existentes en la provincia de Girona y la relación de éstos con las estructuras geológicas.

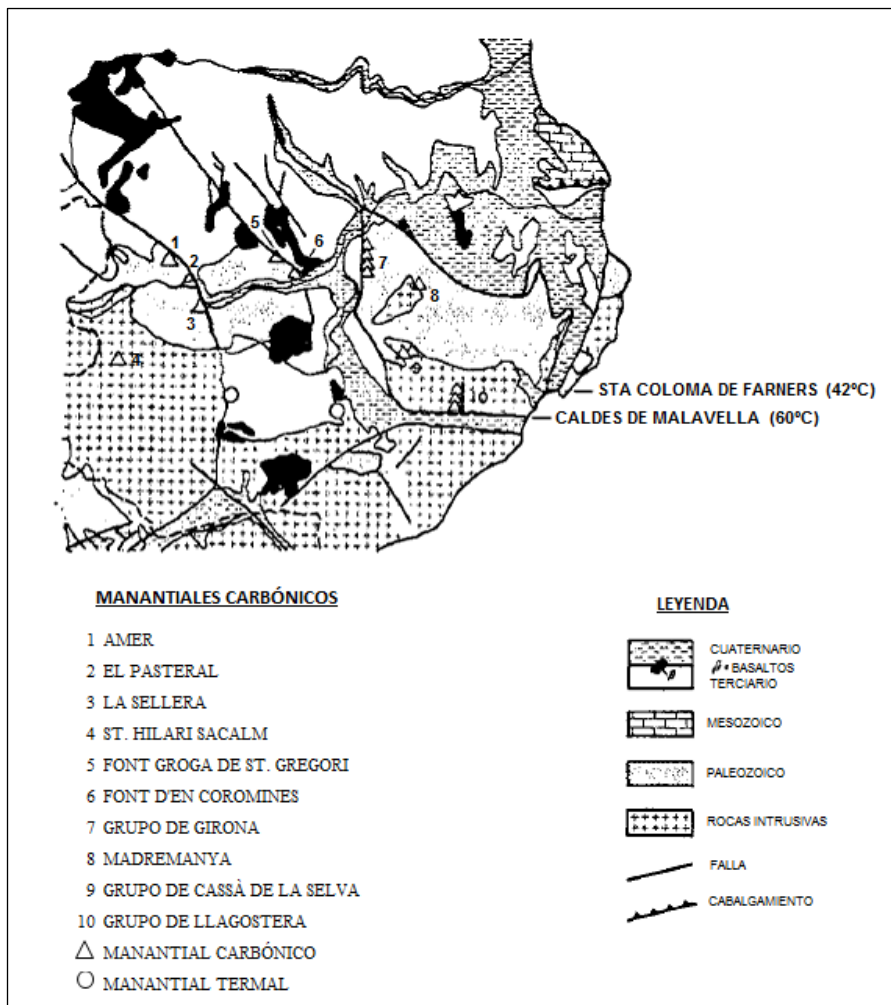


Figura 8. Localización de los manantiales carbónicos de la provincia de Girona. (Fuente: París y Albert, 1976)

Todos los manantiales carbónicos están relacionados con una importante tectónica de zócalo la cual motiva que la circulación del agua transcurra, al menos en una parte importante de su recorrido, por materiales graníticos. Las aguas carbónicas frías de la

provincia de Girona están ligadas en profundidad a un proceso termal de baja entalpía. Esto se pone de manifiesto al comparar el quimismo de estas aguas con los típicamente termales de Catalunya y aplicar geotermómetros químicos. Mediante éstos geotermómetros se puede conocer la temperatura del último equilibrio químico en profundidad, y permite determinar un origen termal de estas aguas carbónicas aunque la temperatura de surgencia sea fría.

Como complemento a estas manifestaciones carbónicas de ésta zona existen también dos manantiales termales en la fosa de la Selva: Caldes de Malavella (60° C) y Sta. Coloma de Farners (42° C). Éstos, como los todos los manantiales termales de Catalunya se caracterizan por poseer un elevado contenido en sodio (85-98 % del total de miliequivalentes de Na⁺) y una cantidad de sílice relativamente importante respecto a su contenido total en sales, que en ocasiones puede llegar a sobrepasar los 100 ppm (Albert, 1975). Estas características químicas son consecuencia de un proceso termal en profundidad y permiten conocer la temperatura a la que se ha establecido el equilibrio agua-roca en ausencia de mezcla con aguas meteóricas recientes.

Desde un punto de vista químico, las aguas carbónicas analizadas presentan dos facies hidroquímicas perfectamente diferenciadas: una bicarbonatada sódica y otra bicarbonatada cálcica.

- Los de naturaleza bicarbonatada sódica que, aunque fríos en el momento de surgir a la superficie, han experimentado un proceso termal en profundidad siempre inferior a los 100°C, que les imprime un carácter geoquímico e isotópico completamente diferente de las cálcicas. Se trata de aguas originalmente termales (60°C-80°C) que han experimentado un proceso de enfriamiento en el circuito de salida con adición de CO₂ endógeno. Su quimismo es cualitativamente idéntico al de las aguas termales del resto de Catalunya (Albert, 1975), aunque más mineralizadas por la presencia de CO₂. También son iguales bajo el punto de vista cuantitativo a las termales y a la vez carbónicas (Caldes de Malavella). Los tiempos de residencia son sensiblemente mayores y las derivas de oxígeno-18 más acusadas debido a la influencia geotermal puesto que las moléculas de agua se enriquecen en oxígeno 18 procedente de la roca por la que circulan.

- Los de naturaleza bicarbonatada cálcica, con origen termal incierto por lo que se refiere a la temperatura de equilibrio (30°C-60°C). Seguramente se trata de simples aguas meteóricas a las que en su tránsito subterráneo se les incorpora una cantidad variable de CO₂, que les facilita el ataque químico a la roca y su salida al exterior en función de los valores de presión parcial del gas, ya que como consecuencia de la temperatura más elevada la solubilidad del CO₂ disminuye y aumenta su volumen propiciando su volatilización y la formación de burbujas. Poseen elevadas concentraciones de SiO₂ totalmente impropias de aguas de circulación subterránea normal. Por otra parte, la solubilidad de la sílice es prácticamente independiente del pH entre valores de 3 a 8,5, por lo que la acción del CO₂ (las variaciones de pH que implican la presencia de CO₂) resulta en este caso muy mitigada. La sola presencia de estas cantidades de sílice hace pensar en un proceso termal en profundidad, ya que ésta resulta más soluble a elevada temperatura.

La presencia de CO₂ en las aguas carbónicas podría deberse a emanaciones volcánicas del volcanismo presente en la zona de Girona, de edad neógena y cuaternaria. Esto podría determinarse con un estudio isotópico del carbono y del oxígeno de estas aguas.

2.1.2. Manantiales sulfhídricos:

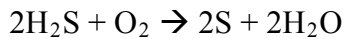
Se debe considerar dos tipos de manantiales sulfhídricos con características genéticas e hidráulicas diferenciadas: los manantiales fríos relacionados con acuíferos superficiales y los manantiales termales, asociados a acuíferos profundos e implicados en la reducción de sulfatos a sulfhídrico en ambientes acuosos mediante la intervención de microorganismos

Diez de los manantiales sulfhídricos termales estudiados por Corominas (1978) se sitúan en el Pirineo, y uno, la Puda de Montserrat, en la Cordillera Prelitoral Catalana. En general, se presentan siempre relacionados con líneas de fractura importantes. Así, los manantiales pirenaicos están asociados a las fracturas periféricas de los macizos graníticos de la cordillera, estrechamente relacionados con el zócalo granodiorítico de la misma, y el de la Puda de Montserrat asociado a la falla

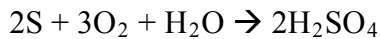
inversa que hace cabalgar los materiales triásicos sobre el Terciario de la Depresión Central.

El origen de los manantiales termales sulfhídricos parece estar en la infiltración de aguas meteóricas, calentadas por un gradiente geotérmico generalmente positivo, ascienden a la superficie aprovechando las zonas de máxima conductividad hidráulica como fallas estructurales. Sus caudales son muy variables y oscilan entre 4 L /min en Espot, en el Pirineo, y 600 L /min en la Puda de Montserrat, en la Cordillera Prelitoral. Su régimen de descarga es muy constante.

La mayor parte de manantiales termales sulfhídricos desprende H₂S y presenta abundante flora bacteriana. Se trata de comunidades de bacterias sulfooxidantes:



Si estas bacterias agotan el H₂S del medio, oxidan el azufre de su citoplasma, enriqueciendo el agua en sulfatos:



Estas bacterias suelen ser simbióticas con otras bacterias sulfatorreductores que cierran el ciclo reduciendo en medio anaerobio el sulfato del agua a H₂S y oxidan la materia orgánica para la síntesis de su masa celular y para la obtención de energía, dando al agua carácter sulfuroso. Esta oxidación implica una liberación de CO₂ al medio, el agua se enriquece en HCO₃⁻ y precipita CaCO₃ lo que conlleva una disminución de Ca⁺⁺ en el agua. Las aguas de una misma localidad son idénticas, excepto en los contenidos de Ca⁺⁺ y SO₄⁼, que varían debido a la actividad bacteriana descrita.

Los análisis químicos del agua de estos manantiales y de las respectivas muestras de aguas superficiales, se han obtenido de los trabajos de Albert (1973,1976). Sus características principales son:

- Las temperaturas de surgencia varían entre 20°C en Ntra. Sra. de la Mercè y 62°C en Les Escaldes (Fig. 7).
- Los manantiales pirenaicos presentan aguas de facies bicarbonatadas sódicas muy poco mineralizadas y se corresponden con la naturaleza granodiorítica del acuífero. El carácter sódico es debido al equilibrio agua-granito en condiciones

térmicas superiores a las ambientales (unos 100°C según Albert, 1976). Los pH están comprendidos entre 7,5 y 9,5, por este motivo presentan elevados contenidos de SiO₂.

- La facies clorurada sódica de la Puda de Montserrat es difícil de explicar dado el desconocimiento del acuífero en profundidad, aunque la similitud entre el quimismo del agua termal y el agua del río Llobregat hace pensar en un efecto de recarga por parte del río.

Por lo que se refiere al trabajo previo realizado por Albert, Corominas y París (1979) sobre los manantiales de Catalunya, después de realizar estudios hidráulicos, hidrogeoquímicos y hidrobioquímicos se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Distribución geológica peculiar. Los manantiales fríos se sitúan sobre formaciones margosas terciarias, especialmente sobre margas del Eoceno marino, mientras que los manantiales termales están asociados a materiales cristalinos siguiendo las fallas estructurales.
- El quimismo de las aguas es muy variable en los manantiales fríos y muy constante en los termales, condicionado por las características litológicas de los acuíferos.
- Se ha demostrado la presencia de bacterias reductoras de sulfatos en tres manantiales fríos y en dos termales, de quince estudiados.
- Se han observado crecimientos de bacterias en las proximidades de las surgencias.
- El azufre está sometido a un proceso redox cíclico (reducción de sulfatos a sulfhídrico y oxidación de sulfhídrico a sulfato), en el que las bacterias juegan un papel muy importante.

2.1.3. Localización de los manantiales geotermales:

Por lo que se refiere al emplazamiento de las diversas manifestaciones geotermales existentes en Catalunya se hace una descripción de ellas en la tabla 1, diferenciando los manantiales situados en el Pirineo y los manantiales de las Cordilleras Costeras Catalanas.

Unitat	Subunitat	Indici	T (°C)	Cabal (l/s)	Composició química	Aqüífer
PIRINEU	Massís de la Maladeta	Lès	29°	0,2	HCO ₃ -SO ₄ /Na	esquits
		Arties	40°	1	HCO ₃ -Cl/Na	calcàries/granit
		Tredòs	35°	3	HCO ₃ /Na	granit
		Caldes de Boí	50°	> 5	Cl-SO ₄ /Na	granit
		Espot	28°	0,3	HCO ₃ -Cl/Na	esquits
	Massís del Baridà	St. Vicenç	38°	4,5	HCO ₃ /Na	granit
		F. del Rec	33°	> 9	HCO ₃ /Na	granit
		Senillers	30°	0,8	HCO ₃ /Na	granit
		Músser	22°	0,1	HCO ₃ /Na	granit
	Massís de La Jonquera	La Mercè	24°	0,1	HCO ₃ /Na	granit
St. Climent Sescebes		28°	0,3	HCO ₃ /Na	granit	
Prefirineu	Ribes de Freser	25°	75	HCO ₃ /Ca	calcàries	
DEPRESSIONS NEOCÈNES	Empordà	Girona-2	46°	3	SO ₄ /Na-Ca	guixos/calcàries
	La Selva	Pous Girona ciutat	25°-31°	? (*)	SO ₄ /Ca	calcàries
		Sondeig Franciac	30°	4	HCO ₃ /Na	granit
		Caldes de Malavella	60°	7	HCO ₃ /Na	granit
		Sta. Coloma Farners	39°	0,8	HCO ₃ /Na	granit
	Serralada Prelitoral	Sondeigs Samalús	90°	? (*)	HCO ₃ /Na	granit
		La Garriga	60°	6,5	HCO ₃ /Na	granit
		Caldes de Montbui	70°	9	Cl/Na	granit
		La Puda Montserrat	28°	10	Cl/HCO ₃ /Na-Ca	calcàries
		Pous Montbrí	81°	? (*)	Cl/Na	granit/terciari
		Fontcalda Gandesa	28°	6	HCO ₃ /Ca	calcàries
Serralada Prelitoral	Caldetes	38°	4	Cl/Na	granit	
	Pous St. Cugat	58°	105	Cl/Na	granit	
	Pous Subirats/Sant Sadurní	32°	65	CO ₃ H/Ca	calcàries	

(*) Cabals en bombament.

Tabla 1. Principales características de los indicios geotérmicos de Catalunya. (Fuente: *La calor de la Terra*, 1988)

3.1.3.1. Pirineo:

Las manifestaciones termales del Pirineo están asociadas a contactos de los macizos con sus cubierta paleozoicas. Se subdivide en 3 grupos:

- **Núcleo de la Maladeta**: comprende Caldas de Boí (50°C), al sur y Lés (29°C), Arties (40°C) y Tredós (35°C) en el norte. También se incluye Espot (28°C) por su proximidad geográfica, aunque no directamente relacionado con este macizo. Son aguas de infiltración hasta grandes profundidades (1000-3000 m) que después de más de 40 años de circulación a 100°C, han adquirido una composición bicarbonatada sódica.
- **Macizo Andorra-Montlluís**, en el Pirineo Central, donde hay indicios tectónicos tanto en Francia, como Andorra (Les Escaldes), como en Catalunya. Comprende la Font del Reg (33°C), els Banys de San Vicente (38°C), Caldes de Musser (22°C) y els Banys de Senillers (30°C). Se localizan siguiendo el río Segre y a la vez, en la zona de contacto geológico entre el borde del macizo granítico y los materiales paleozoicos. Todas las aguas circulan y provienen de materiales graníticos, así pues, son de tipo bicarbonatado sódico con una temperatura aproximada de 100°C.
- **Macizo granítico de la Jonquera**, en la parte más oriental del Pirineo, con dos manifestaciones termales asociadas a las grandes fallas N-S del macizo: La Mercè (24°C) y Sant Climent Sescebes (28°C). Estas presentan las mismas características que los anteriores grupos.
- Ribes de Freser presenta la única manifestación termal no asociada a materiales y estructuras de la zona axial. El agua emana a 25°C a favor de las calizas prepirenaicas del Garumniense, con estructura tectónica complicada. Estas aguas son además bicarbonatadas cálcicas y se trata de una circulación poco profunda ya que no alcanza los 30°C en profundidad.

3.1.3.2. Catalánides:

Las manifestaciones termales se localizan sobre las grandes fracturas NE-SW, que constituyen los márgenes de las depresiones neógenas centrales, y también se sitúan en las intersecciones de éstas con importantes fracturas transversales. Estas depresiones se caracterizan por su actividad sísmica y en las depresiones de Girona por vulcanismo reciente (la Garrotxa, la Selva y el Empordà). Este vulcanismo aun se manifiesta a través de la salida de gas carbónico, dando lugar cuando se mezcla con el agua de los acuíferos locales, a las conocidas “fonts picants” y pozos de agua carbónica en Girona y el Empordà. Las aguas de estos manantiales son aguas de lluvia infiltradas hasta profundidades de 2000-3000 m, con una temperatura de 90-130° C, disolviendo los minerales de las rocas e incorporándolos en su composición química, y ascendiendo por convección.

Se pueden dividir en tres grupos:

- **Depresión de la Selva:** Existen dos grupos de manifestaciones termales en la Selva, Santa Coloma de Farners (39°C), en el margen sur-occidental y Caldes de Malavella (60°C), en el margen sur-oriental. Están asociados a granitos y cuyas facies es bicarbonatada sódica.
- **Cordillera Prelitoral:** Comprende Caldes de Montbui (70°C), La Garriga (60°C) y la Puda de Montserrat (28°C). estas manifestaciones termales superficiales están emplazadas hacia el extremo norte de la Depresión del Vallés- Penedés y se sitúan sobre la línea de falla de dirección NE-SW. Esto sucede también en Montbrió de Camp (41- 81°C) situado en la Depresión Prelitoral y presenta una composición química clorurada sódica.
- **Cordillera litoral:** Se encuentra Caldetes (38°C), entre otras manifestaciones termales, como las “fonts picants” de Burriac y el balneario Titus en Arenys de Mar. Están situados principalmente a lo largo de las fallas que delimitan las fosas distensivas neógenas, la mayoría de los manantiales se encuentran en el Vallès-Penedès. Se trata de una de circulación profunda debido a la infiltración de aguas meteóricas en una gran zona de recarga situada en el Macizo del

Montseny (Carmona et al, 2000). La circulación de las aguas sucede a través de las unidades terciarias del Vallès-Penedès que conectan con las fallas, por donde ascienden y descargan como aguas termales. Estos manantiales presentan una composición química clorurada sódica.

2.2 Aprovechamientos

Según la temperatura obtenida en un yacimiento, se puede hablar según la terminología geotérmica, de diferentes tipos de aprovechamiento de la energía geotérmica (Tabla 2):

Energía geotérmica de alta entalpia: cuando el fluido es capaz de producir electricidad mediante generadores y turbinas a precios competitivos con las técnicas convencionales. Con la tecnología actual, por encima de 150° ya se consiguen resultados competitivos. Existe en las zonas activas de la corteza terrestre (zonas volcánicas, límites de placas litosféricas, dorsales oceánicas). Este tipo de yacimientos están localizados en pocas áreas geográficas, al igual que los pozos de petróleo o el carbón. Las posibilidades viables de aprovechamiento viable de energía geotérmica de alta entalpia en Catalunya son inexistentes.

Se requieren varias condiciones para que exista un campo geotérmico: un techo compuesto de un cobertura de rocas impermeables; un deposito, o acuífero, de permeabilidad elevada, ente 300 y 2000m de profundidad; rocas fracturadas que permitan una circulación convectiva de fluidos, y por lo tanto la trasferencia de calor de la fuente a la superficie, y una fuente de calor magmático (entre 3 y 10 km de profundidad a 500-600°C). La explotación de un campo de estas características se hace por medio de perforaciones según técnicas casi idénticas a las de la extracción del petróleo.

Energía geotérmica de media entalpia: es aquella en que los fluidos de los acuíferos están a temperaturas menos elevadas (100-150 °C). Por consiguiente, la conversión vapor-electricidad se realiza a un menor rendimiento, y debe utilizarse como intermediario un fluido volátil. Pequeñas centrales eléctricas pueden explotar estos recursos.

Energía geotérmica de baja entalpia: para acuíferos con temperaturas inferiores a 100°C se habla de baja entalpia, en los cuales la producción es cien por cien agua caliente, sin componente vapor. En este caso las aplicaciones son de tipo industrial, agrícola, calefacción, viviendas, agua sanitaria, etc.

Energía geotérmica de muy baja temperatura: se considera cuando los fluidos se

calientan a temperaturas comprendidas entre 20 y 60 °C. Esta energía se utiliza para necesidades domésticas, urbanas o agrícolas.

De los cuatro tipos de energía en Catalunya solo existen yacimientos de baja entalpía y de muy baja entalpía. Los aprovechamientos en Catalunya se centran en las aguas termales, que se concentran en el Pirineo y en las depresiones neógenas costeras catalanas.

	C°		
ALTA ENTALPÍA	200	Producción de electricidad	
	190		
	180		Evaporación de soluciones concentradas Refrigeración para absorción de amoníaco Pulpa de papel
	170		Fabricación de agua pesada con HS Secado de tierra de diatomeas
	160		Secado de madera Secado de algas
	150		Fabricación de alúmina (Proceso Bayer)
MEDIA ENTALPÍA	140	Secado rápido de productos de granja	
	130	Evaporación al refinado de azúcar Extracción de sales por evaporación y cristalización	
	120	Fabricación de agua dulce por destilación	
	110	Secado de forraje y hortalizas	
	100	Lavado y secado de lana	
BAJA ENTALPÍA	90	Secado de pescado	
	80	Calefacción de viviendas	
	70	Refrigeración (límite inferior de temperatura)	
	60	Calefacción de invernaderos y establos	
	50	Cultivo de setas	
	40	Calefacción del suelo	
	30	Biodegradación, fermentaciones, piscinas	
	20	Piscicultura, acuicultura	

Taula 2: Ejemplos de aplicaciones directas de la energía geotérmica (Fuente: *el calor de la Terra*; Albert, 1988)

2.3. Temperatura-energía acumulada

Para tiempos de residencia largos, durante los cuales el agua llega a equilibrarse con la roca almacén, existen relaciones iónicas que actúan como geotermómetros químicos que permiten calcular la temperatura en profundidad a la que tuvo lugar el último equilibrio agua-roca.

Un geotermómetro es un modelo matemático que relaciona la temperatura del yacimiento con la composición química de los fluidos que afloran de manera natural o por medio de pozos a la superficie. Existen diversos tipos de geotermómetros dependiendo de la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales hidrotermales, entre ellos: geotermómetros químicos y geotermómetros isotópicos.

2.3.1. Geotermómetros químicos:

El argumento fundamental para la proposición de un geotermómetro químico, es el que algunas de las reacciones que ocurren entre la roca y el fluido térmico alcanzan un estado de equilibrio el cual define unas condiciones de presión, temperatura y concentración. Bajo estas circunstancias, la combinación lineal de los componentes de la reacción reflejará la dependencia de la temperatura con respecto a la constante de equilibrio de dicho estado particular. Entre los geotermómetros más utilizados se encuentran el SiO_2 , Na/K, Na-K-Ca, Na/Li, K-Mg y el Geotermómetro de Composición Catiónica. (GCC) o el equilibrio albita-anortita.

- Geotermómetro SiO_2 : Gráficas A y B de Fournier y Truesdell (1970). Curva A para aguas que se enfrían por conducción y curva B para aguas que lo hacen por expansión adiabática a entalpía constante. Ambas gráficas coinciden para valores de temperatura inferiores a 115°C , equivalentes a un contenido en sílice de 68 ppm.

Ecuación de Siever (1962): Esta relación experimental de la solubilidad de la sílice en función de la temperatura ha dado excelentes resultados en Catalunya por debajo de los 100°C . Para valores superiores es muy semejante a la propuesta por Fournier y Truesdel (1970).

El geotermómetro de sílice tiene su base en la variación de la solubilidad del cuarzo con respecto a la temperatura. El algoritmo propuesto para un intervalo de aplicación entre 0 y 250°C es:

$$T(\text{SiO}_2) = [1309 / (5.19 - \log(\text{SiO}_2))] - 273.15$$

Donde SiO_2 está expresado en mg/kg. Esta ecuación proporciona la temperatura de equilibrio del agua termal asumiendo que no existe precipitación de sílice, no hay pérdida de vapor y no se presentan mezclas de aguas.

- Geotermómetro Na/K: La inversión del método Na/K dando lugar a temperaturas aberrantes excesivamente elevadas como las que se obtienen en el grupo de Girona, es una consecuencia típica y ampliamente experimentada de que no se ha alcanzado el equilibrio agua-roca para estos cationes.

El algoritmo fue propuesto es:

$$T(\text{Na-K}) = [855.6 / (\log(\text{Na/K}) + 0.8573)] - 273.15$$

Donde las concentraciones de Na y K vienen expresadas en mg/Kg.

Los geotermómetros de Na/K han mostrado estudios determinar temperaturas fiables y consistentes en estudios de exploración y explotación. De hecho, este comportamiento estable del geotermómetro ha motivado que sus ecuaciones sean, hoy en día, las más usadas en la industria geotérmica mundial.

Geotermómetro Na-K-Ca: Método empírico es válido desde 4 a 340°C y consistente en aplicar una corrección debida al calcio en el método del Na-K.

Este geotermómetro es en la actualidad uno de los más utilizados. Como en los geotermómetros anteriores, en el de Na-K-Ca no se consideran equilibrios particulares mineral-fluido, sino intercambios iónicos netos. La ventaja de este algoritmo es que considera también la participación del calcio. El geotermómetro tiene la siguiente expresión:

$$T(\text{Na-K-Ca}) = (1647 / (\text{Log}(\text{Na/Ca}) + \beta \text{Log}(\sqrt{\text{Ca/Na}}) + 2.24)) - 273.15$$

La termometría Na-K-Ca presenta resultados aberrantes derivados sobre todo de la interacción del CO_2 con el calcio del geotermómetro. Las temperaturas que se han considerado erróneas (Albert, 1975).

- Geotermómetro K-Mg: Este geotermómetro se utiliza en situaciones en las que

el calcio y el sodio no pueden equilibrarse rápidamente. La ecuación propuesta es:

$$T (K-Mg) = [4410/(13.95 - \log(K \cdot K/Mg))] - 273.15$$

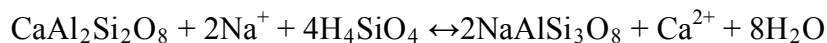
Donde K y Mg están expresados en mg/Kg.

Es un geotermómetro "conservador" ya que si se le compara con otros, sus temperaturas son en general bajas. En este sentido, la utilidad de los geotermómetros está en definir las tendencias regionales de las temperaturas de los yacimientos. No deben tomarse como datos definitivos. En el análisis de estos resultados deberá recordarse el origen empírico de los algoritmos y que en su planteamiento no se consideran reacciones específicas sino simples equilibrios e intercambios iónicos.

- Geotermómetros de Composición Catiónica: Permite estimar la temperatura del yacimiento según la composición química del agua de fuentes termales relativamente diluidas. Se basan en relaciones iónicas y no en concentraciones de una sola especie.

Es un geotermómetro químico basado en la concentración de los cuatro cationes principales del agua subterránea: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . El algoritmo contiene un procedimiento en el que se analizan varias posibilidades para las reacciones de intercambio catiónico entre soluciones y roca. Se recomienda una partición de los datos en subgrupos basados en la composición de los parámetros químicos $[Ca^{2+}]/[Na^+]$ y $[Mg^{2+}]/[Na^+]$. El geotermómetro resultante es capaz de predecir la temperatura de yacimientos basado en la composición de aguas de geotermales relativamente disueltos.

- Albita-Anortita: En el trabajo sobre la aplicación del equilibrio albita-anortita (Albert, 1975) se propone éste geotermómetro aplicado a aguas relacionadas con materiales graníticos. Se compararon los resultados obtenidos con los anteriores geotermómetros mencionados cuya validez y limitaciones son conocidos por haber sido aplicados en numerosos estudios geotérmicos. La reacción de equilibrio albita-anortita es:



2.3.2. Geotermómetros isotópicos:

El componente gaseoso de los fluidos geotérmicos puede contener dióxido de carbono, metano, hidrógeno y, por supuesto, vapor de agua. Como la distribución relativa de los isótopos entre los componentes del sistema geoquímico es sólo función de la temperatura, cualquier par de estos componentes podrá, en principio, actuar como un geotermómetro isotópico. El conocimiento de la historia termal del sistema geotérmico por medio de cualquier geotermómetro isotópico depende de si se ha alcanzado o no el equilibrio isotópico entre las especies consideradas.

Los principales geotermómetros isotópicos son los basados en el equilibrio isotópico en los sistemas $\text{CH}_4\text{-H}_2$, $\text{H}_2\text{O-H}_2$, $\text{CO}_2\text{-CH}_4$, $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$, $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{S}$.

La utilización de cualquier método de termometría hidroquímica implica una serie de supuestos previos que es necesario precisar (Albert, 1975):

1. Las reacciones entre el agua y la roca han de ser función de la temperatura.
2. Todos los elementos reaccionantes han de ser lo suficientemente abundantes, de manera que no exista limitación cuantitativa.
3. Se ha de alcanzar un equilibrio entre el agua y la roca considerada a la temperatura interna en cuestión que es la, que se pretende averiguar.
4. Los cambios de composición química durante el ascenso han de ser mínimos.
5. No ha de existir mezcla del agua termal ascendente con aguas frías de infiltración.

2.4. Calidad del agua y usos

Los fluidos termales al encontrarse con rocas a una determinada temperatura, reaccionan y adquieren una composición química consecuencia y función del tipo de reacción y de la temperatura. Así pues, esta composición química refleja las condiciones termodinámicas interiores, y si no se han producido mezclas, su análisis químico permite conocer la temperatura interior del sistema independientemente de la temperatura de salida a la superficie, que puede ser alterada por factores externos.

En el trabajo de Albert (1976) se facilitan los análisis químicos de diferentes manantiales. Presentan una gran similitud y de éstos se puede concluir que todos los manantiales de una misma localidad tienen la misma composición química indicando así un origen común, con dispersión en superficie a favor de fracturas. Pero, debido a un tiempo de residencia elevado presentan grandes diferencias respecto las aguas superficiales o de circulación poco profunda.

Según la composición química de cada manantial geotermal y según su calidad se puede hacer un determinado uso. En la tabla 3 se relaciona los diferentes indicios geotermiales de Catalunya con los distintos usos que estos tienen.

Comarca	Indicios	T (C°)	Composición química	Utilización
MARESME	Caldetes	38°	Cl/Na	Baños/Hotel
VAL·LÈS	Sondeo Samalús	90°	HCO ₃ /Na	Invernaderos/Industria
	La Garriga	60°	HCO ₃ /Na	Balnearios
	Caldes Montbui	70°	Cl/Na	Balnearios
	Pozos St. Cugat	58°	Cl/Na	invernaderos
	La Puda Montserrat	28°	Cl/HCO ₃ /Na-Ca	Balneario en ruinas
PENEDÈS	Pozos Subirats-Sant Sadurní	32°	CO ₃ H/Ca	No
BAIX CAMP	Pozos Montbrió	81°	Cl/Na	invernaderos
TERRA ALTA	Fontcalda de Gandesa	28°	HCO ₃ /Ca	Balneario
VALL D'ARAN	Lès	29°	HCO ₃ -SO ₄ /Na	Balneario cerrado
	Arties	40°	HCO ₃ -Cl/Na	Balneario cerrado
	Tredòs	35°	HCO ₃ /Na	Balneario en ruinas
PALLARS	Caldes de Boí	50°	Cl-SO ₄ /Na	Balneario
	Espot	28°	HCO ₃ -Cl/Na	No
ALT URGELL	F. del Rec	33°	HCO ₃ /Na	No
	Sant Vicenç	38°	HCO ₃ /Na	Balneario
CERDANYA	Senillers	30°	HCO ₃ /Na	Balneario
	Caldes de Músser	22°	HCO ₃ /Na	Balneario en ruinas
RIPOLLÈS	Ribes de Freser	25°	HCO ₃ /Ca	Balneario en ruinas
EMPORDÀ	Hotel Mercè Park	24°	HCO ₃ /Na	Hotel
	St. Climent Sescebes	28°	HCO ₃ /Na	lavaderos públicos
	Sondeo Girona-2	46°	SO ₄ /Na-Ca	Piscicultura
GIRONÈS	Pozos Girona Ciutat	25°-31°	SO ₄ /Ca	Industrias
LA SELVA	Caldes de Malavella	60°	HCO ₃ /Na	Balnearios/Agua mesa
	Sta. Coloma de Farners	39°	HCO ₃ /Na	Balneario
	Sondeo Franciac	30°	HCO ₃ /Na	No

Tabla 3: Composiciones químicas y usos de los indicios geotermales de Catalunya por comarcas. (Fuente: *La calor de la Terra*; Albert, 1988)

2.5. Posibilidades de explotación

El cálculo del potencial geotérmico de una zona se hace en función de los conceptos de reserva y recurso (Fig 9):

Recurso geotérmico base: comprende el calor almacenado en los 10 primeros km de la corteza terrestre, al conjunto de roca+agua, por encima de 15°C. Cualquier tipo de almacén geotérmico explotable o en explotación queda comprendido en esta definición.

Recurso geotérmico: energía calorífica que puede ser extraída económica y legalmente en un futuro, en mejorar las técnicas de prospección, perforación y aprovechamiento.

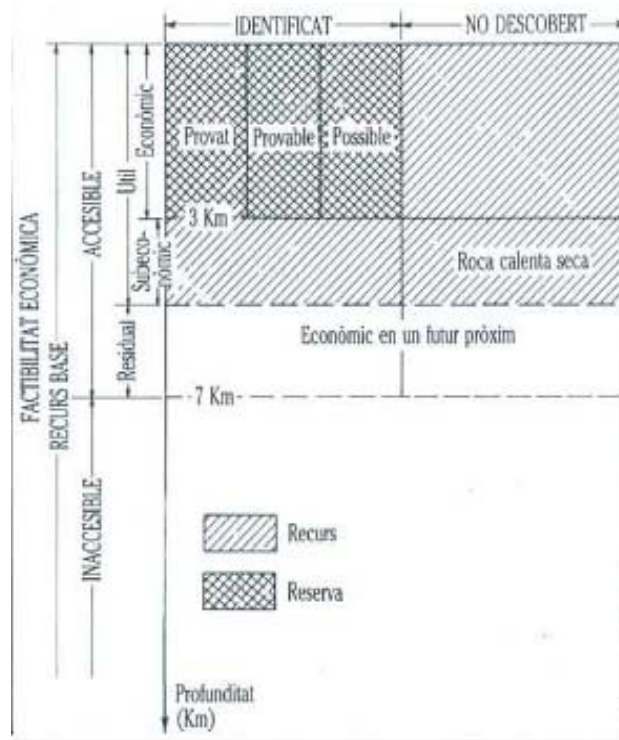


Figura 9. Concepto de recurso y reserva en geotermia (Fuente: La calor de la Terra; Albert, 1988)

Reserva geotérmica: parte del recurso que puede ser extraída económicamente hoy en día.

Reserva probada: energía geotérmica cuantificada en extensión, profundidad y productividad mediante sondeos productivos.

Reserva probable: energía geotérmica cuantificada por métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos. Pendiente de confirmar su existencia y rentabilidad mediante sondeos y pruebas de producción.

Reserva posible: energía deducida por criterios geológicos o indicios superficiales, pero

no investigada mediante técnicas adecuadas.

De los anteriores conceptos en Catalunya podemos encontrar recursos geotérmicos base y recursos geotérmicos.

Para conocer las posibilidades de explotación de un recurso geotérmico debemos tener en cuenta una serie de factores geológicos y también económicos. Los principales aspectos a considerar son:

- Flujo de calor superficial: Para que la explotación sea menos costosa es conveniente que el flujo de calor sea elevado, puesto que esto significa que el recurso está más cerca de la superficie y por tanto, más fácil de extraer.
- El volumen de roca y de agua termal debe ser grande, para asegurar unos caudales de explotación. Se debe tener en cuenta que la extracción no supere la recarga de estas zonas productivas para que el acuífero no entre en sobreexplotación.
- Temperaturas elevadas.
- Permeabilidades adecuadas que aseguren un régimen de explotación.
- Cercanías a núcleos urbanos o industriales o agrícolas para su utilización rentable. Existe limitación en cuanto al transporte de esta energía.

Las temperaturas del último equilibrio agua-roca son del mismo orden en toda Catalunya (90°-100° C) por lo que la temperatura no sería un factor decisivo para futuras zonas de explotación.

Las aguas del Pirineo, por su baja mineralización serian una aguas excelentes para su utilización como fluidos geotérmicos puesto que ofrecerían pocos problemas de incrustación. En cambio, las aguas de los Catalánides presentan composiciones químicas más variadas, por lo que variarían las aplicaciones a que podrían destinarse.

Como ejemplo, se plantea un acuífero cuya zona de recarga sea una fractura de 2 cm de amplitud, 20 km de longitud y 3 km de profundidad. En este caso se podría disponer de un volumen de reserva de 1,2 hm³.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. CASO DE CALDES DE MALAVELLA

Situado en la terminación septentrional de los Catalánides, a 16 km de Girona y a 200 m sobre el nivel del mar, asociadas al granito que constituye el zócalo de la depresión de la Selva (Fig. 10).

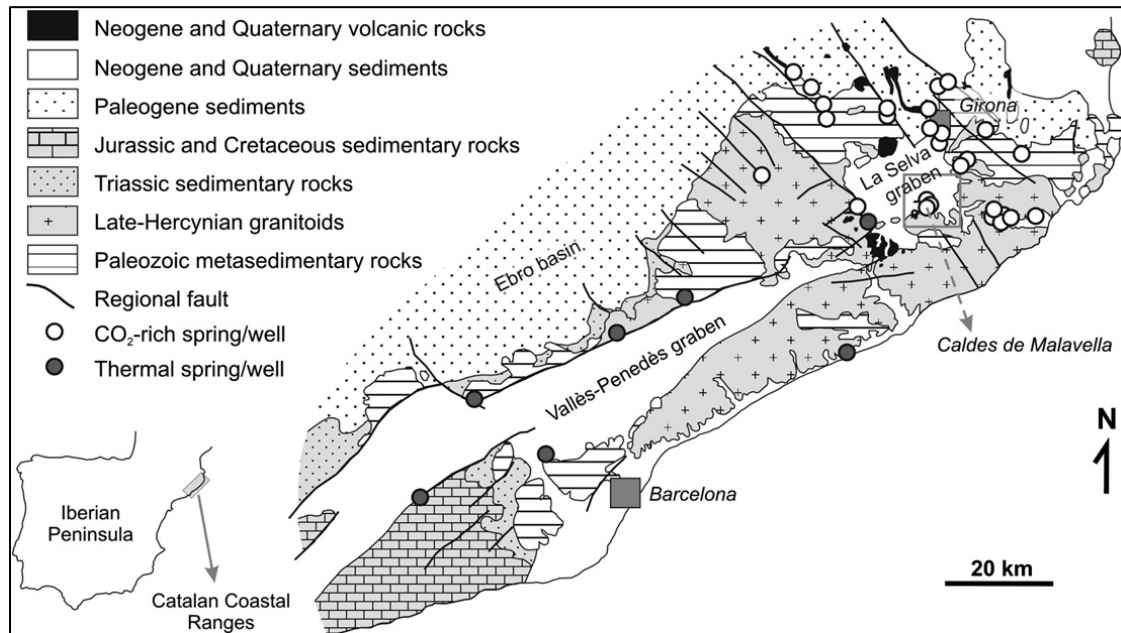


Figura 10. Esquema estructural de la zona norte de la Cordillera Costera Catalana, con la situación de Caldes de Malavella y situación de los indicios termales. (Fuente: *Processes releasing arsenic to groundwater in the Caldes de Malavella geothermal area, NE Spain*; Piqué, Grandia y Canals, 2010)

La depresión de la Selva se rellenó durante el Neógeno mediante abanicos aluviales procedentes de los macizos de las Gavarres y las Guillerries, dando lugar a espesores variables (100- 300 m) en función de la evolución tectónica del zócalo. La composición litológica del sector próximo a las Gavarres refleja la naturaleza arcósica del área fuente. En el sector más septentrional de la depresión de la Selva, los materiales neógenos están en contacto con calizas y areniscas del paleógeno de la Sierra Transversal. Los depósitos aluviales cuaternarios, mayoritariamente holocénicos, responden al sistema de drenaje actual. Estos materiales plio-cuaternarios plegados en un laxo sinclinal, presentan ciertos apuntamientos basálticos de esta misma edad.

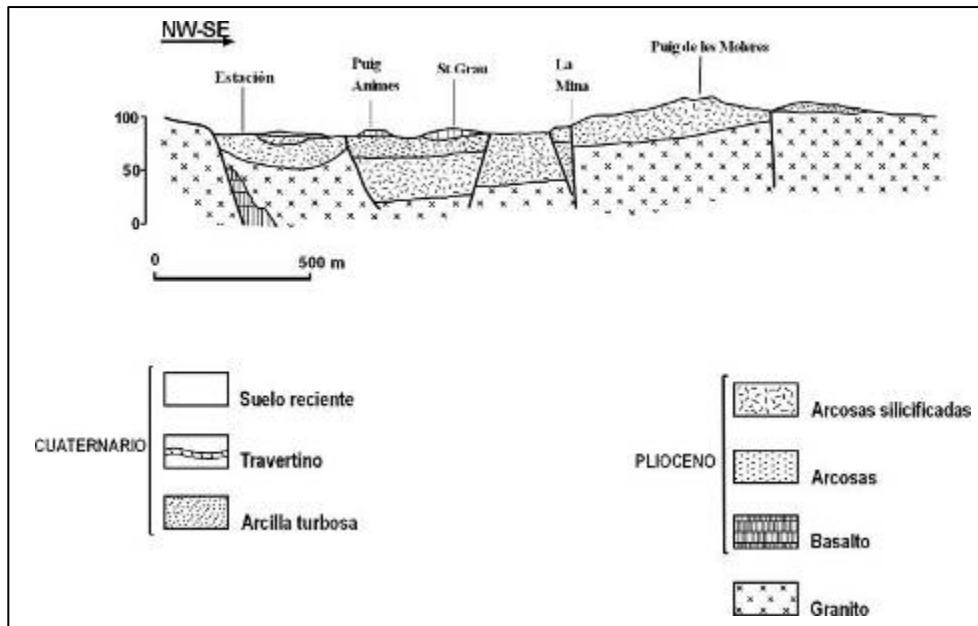


Figura 11. Corte geológico de Caldes de Malavella (Fuente: *Estudio geotérmico preliminar de Catalunya*; Albert, 1973)

Albert (1973) hace una descripción de la sucesión estratigráfica de dicha cubeta:

1. Capa basal de arenas arcósicas y conglomerados con lechos interestratificados de limonita. Los materiales son mas groseros hacia el E (Puig de les Moleres), y se vuelven más finos hacia el W, pasando a arenas. Éstos se encuentran silicificados debido a las emisiones hidrotermales. La potencia máxima va desde los 12 m en el W hasta los 27m en el E. Puede atribuirse al Plioceno superior, relacionado con sedimentos pliocénicos de Girona.
2. Arcilla turbosa: según ponen de manifiesto los restos de vertebrados, estos son depósitos cuaternarios. Su potencia máxima es de unos 10 m en el W y de 22 en el E.
3. Capa superior de travertino alternando en su base con arcillas. Potencia máxima de 5m en el w disminuyendo hasta alcanzar 1 m en el E.

El valle de Caldes de Malavella está emplazado entre 2 líneas de fractura fundamentales con orientación NW-SE: la de Puig Moleres-Can Teixidor y la que pasa por los cerros Can Rigau y San Mauricio. Ambas se evidencian por la existencia de emisiones basálticas. Este sistema de fracturas de dirección NW-SE ha convertido el valle de Caldes de Malavella en una foseta tectónica larga y estrecha alineada transversalmente a la Depresión de la Selva. Existe también un sistema de fallas de menor importancia que cortan las primeras de dirección NE-SW.

Las grandes fracturas de la formación de la depresión de la Selva y por donde tuvieron lugar las emisiones basálticas son de edad pontiense y pliocena inferior, pero los movimientos tectónicos continuaron durante el plio-cuaternario según ponen de manifiesto las fallas que cortan sus sedimentos.

En el área de estudio hay tres unidades hidrogeológicas principales: (1) los sedimentos neógenos de relleno sedimentario de la depresión de La Selva, que definen un acuífero multicapa, (2) el cuaternario aluvial, y (3) las rocas del Paleozoico, que se encuentran en las áreas de recarga principal y en el basamento de la depresión de La Selva.

Por lo que se refiere al flujo de la zona de la Depresión de la Selva, existe un sistema de flujo local en sentido divergente desde el macizo de las Gavarres hacia las depresiones del Baix Empordà y la Selva, el cual actúa como área de recarga local, evidenciándose particularidades relacionadas con la influencia de las fracturas. De este modo, las formaciones metamórficas e ígneas del macizo de las Gavarres se comportan como zonas de recarga. Se trata de un medio fracturado de baja permeabilidad donde se establecen flujos preferenciales. Adicionalmente, nivel superior de granito meteorizado (de hasta 30 m) actúa como acuífero superior y regulador de la recarga. Así, en el área de la Selva, se observa una relación entre el rendimiento de las captaciones ubicadas en materiales ígneos, ya sea en las vertientes como en el zócalo de la depresión, y su proximidad a las zonas de falla. Los materiales neógenos arcósicos y la zona de alteración del granito del zócalo de la depresión son los que muestran conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento más elevados. Las formaciones cuaternarias son poco importantes y no superan los 15 m de potencia. Estos sedimentos cuaternarios y los niveles superficiales de granito alterado presentan una única superficie hidráulica continua. Las relaciones hidráulicas entre los sedimentos neógenos y las formaciones geológicas colindantes indican una recarga local lateral desde el macizo de las Gavarres. Sin embargo, en las zonas más profundas de la depresión es necesario suponer un flujo vertical ascendente adicional, relacionado con las fracturas regionales que justifique los caudales de explotación registrados.

Las aguas de los pozos de los macizos graníticos del Paleozoico son de tipo Ca-Na-Cl-HCO₃. La actividad geotérmica en la depresión de La Selva se centra en los campos de

baja entalpía geotérmica de Caldes de Malavella y Santa Coloma de Farners, situados en el sur y el margen occidental de la depresión, respectivamente (Fig. 10). Las aguas termales en ambos casos son de tipo Na-HCO₃, y los pozos de Caldes de Malavella son ricos en CO₂ (París y Albert, 1976).

Las emisiones hidrotermales se localizan todas al N de la población de Caldes de Malavella, a favor de la fractura NW-SE del Puig de les Moleres-Can Teixidor. El agua termal asciende por el plano de falla entre la pared granítica del SW y la basáltica del NE, que actúa como plano impermeable. Se pueden subdividir en 3 grupos:

- Grupo Puig de les Moleres (Agua Malavella): Existen dos manantiales que descargan un caudal medio de 3,1 L/s. Fuentes:
 - Raig d'en Mel (60°C)
 - La Mina (manantial Malavella) (52,7°C)

- Grupo Turó de Sant Grau (Agua Imperial): Se encuentran cinco fuentes conocidas, y otros pozos no determinados. Descargan un caudal aproximado de 1,8 L/s. Fuentes:
 - Font els Bullidors (60°C)
 - Raig de Sant Grau (51,4°C)
 - Font d'en Pla (48,2°C)
 - Font de l'Hospital (56°C)
 - Font de Can Manegat (60°C)

- Grupo Puig de les Ànimes (Vichy Catalán): Se localizan varias manifestaciones termales que descargan con caudal medio aproximado de 3 L/s. Fuentes:
 - Manantial Vichy Catalán (57°C)
 - Font Xica (58,5°C)
 - Font de la Pedrera (31,5°C)
 - Font del Fetge (48°C)

Los manantiales pertenecientes al grupo Puig de les Ànimes son los más alejados de la falla principal Puig Moleres-Can Teixidor, a unos 160 m. Son más próximos a la falla

de la Riera de Caldas, así pues se puede creer que la emergencia de las aguas de éste grupo es a favor de otra falla transversal.

3.1. Recursos-reservas

La masa de agua de la Selva contiene gran variedad de acuíferos diferentes. Existen materiales metamórficos y graníticos de edad paleozoica, materiales detríticos neógenos y aluviales cuaternarios.

- Acuífero detrítico plio-cuaternario
- Acuífero aluvial del río Ter
- Acuífero de las pizarras y granitos de la Depresión de la Selva
- Acuífero aluvial del río Onyar
- Acuífero aluvial de la riera de Santa Coloma

La recarga de los acuíferos se produce de modo natural a través de la infiltración de agua pluvial. La zona de recarga comprende toda la superficie aflorante y las zonas elevadas. La descarga se produce a través de los Cursos fluviales del Ter, el Onyar y la riera de Santa Coloma

El acuífero paleozoico de granitos de la Depresión de la Selva (Fig. 12) se localiza en la mayor parte de la superficie de la masa formando parte del zócalo de la Selva aunque únicamente aflora en los municipios de Cassà de la Selva y Llagostera, se comporta como acuífero libre en superficie y confinado en profundidad. Presenta una porosidad primaria debido a la alteración de los materiales en superficie y una porosidad secundaria por fisuración en profundidad.

En los materiales paleozoicos, las isopiezas se adaptan en gran medida a las curvas de nivel con gradientes hidráulicos elevados, alrededor de 10-20%. El sentido del flujo general que se observa NE y SW siguiendo el flujo de los principales cursos fluviales que drenan la masa de agua.

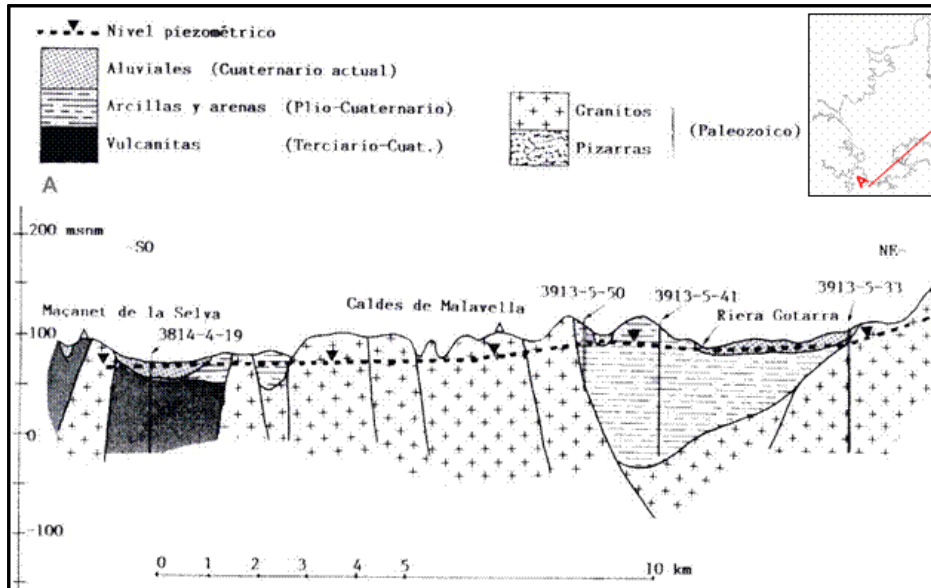


Figura 12. Corte geológico del acuífero de las pizarras y granitos de la Depresión de la Selva (IGME, 1993)
(Fuente: *Massa d'aigua de la Selva*, ACA)

Los elementos considerados más característicos en la depresión de la Selva son el Si, el Ca y el Cl. Las formaciones metamórficas e ígneas del macizo de las Gavarres se comportan como zonas de recarga. Las muestras en los granitos (Gavarres y zócalo de la Selva) y de las zonas alteradas y arcósicas (Depresión de la Selva) pueden diferenciarse de las de las rocas metamórficas por el menor contenido en sílice de las últimas. En los granitos, el quimismo básico se atribuye al proceso de disolución incongruente de los minerales silicatados primarios y la consecuente formación de minerales silicatados secundarios. La principal reacción es la hidrólisis de las plagioclasas, predominantemente las sódicas, las cuales liberan Na, Ca y SiO₂ resultando una relación molar Na/Ca elevada (de entre 0.8 y 1.8). Localmente, las dos muestras ubicadas en zonas de fracturas importantes presentan elevados contenidos en cloruro, cerca de 245 mg/l, esto podría indicar la presencia de procesos termales en profundidad (ACA). En general se observa que el aumento de este ión es paralelo al de otros que también reflejan procesos de interacción agua-roca (Li, Sr, Mg, K, Ca, Na, Br...). Po ejemplo, el litio indicaría un proceso de interacción con granitos a elevadas temperaturas y el bromo indicaría un proceso en profundidad. En general, estos procesos son propios de aguas con bajas velocidades de flujo y, por consiguiente, largos tiempos de residencia. Las diferentes composiciones químicas observadas en un reducido espacio se relacionan con una baja conectividad entre fracturas y diferentes tiempos de residencia y de interacción con las rocas encajantes. La similitud con la

hidroquímica de los materiales arcóscicos de la Depresión de la Selva indica una conectividad efectiva entre el macizo y éstas formaciones neógenas.

En la tabla 4 se muestran los valores de los parámetros hidráulicos de los acuíferos de la Selva:

Permeabilitat (m/d):	0,1 (granits); 0,1 - 0,15 (detrítics plioquaternaris); 5 - 40 (al·luvials)
Coef. emmagatzematge (%):	0,1 - 2 (granits); 2 (detrítics plioquaternaris); 15 (al·luvials)
Transmissivitat (m ² /d):	1 - 100 (detrítics plioquaternaris); 170 - 600 (al·luvials)

Tabla 4: Parámetros hidráulicos de los acuíferos de la Selva (Fuente: *Massa d'aigua de la Selva*, ACA)

3.2. Calidad del agua y usos

Las aguas de Caldes de Malavella son consideradas aguas de alta mineralización, bicarbonatadas sódicas, fluoradas y hipertermales (60°C).

3.2.1. Hidroquímica

En el estudio preliminar de Catalunya (Albert, 1973) se facilitan los datos de los análisis químicos de uno de los manantiales existentes de cada núcleo hidrotermal:

Puig de les Moleres: Raig den Mel

Puig de les Animes: els Surtidors

Turó de Sant Grau: manantial de San Narciso

Se trata de aguas con una circulación en profundidad, en contacto con granitos y totalmente idénticas por lo que se refiere a la facies hidroquímica (bicarbonatada sódica), de fórmula iónica:

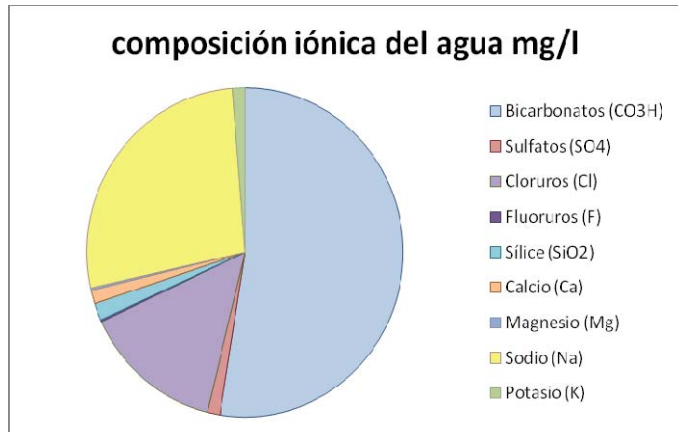
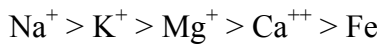
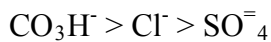


Gráfico 1. Composición iónica del agua de Caldes de Malavella (Fuente: *Balnearis. Els recursos minerals de Catalunya, les aigües minerals.* Departament d'Indústria, Comerç i Turisme, Generalitat de Catalunya, 1999).

Las aguas de Caldes de Malavella son las más mineralizadas de Catalunya, (3000 ppm de RS (residuo seco) a 110°C) aunque siguen presentando la misma característica que el resto de manantiales termales de Catalunya: total predominio del Na^+ sobre los demás cationes (97% del total de epm). Escasa proporción de $\text{SO}_4^{=}$ y disminución de SiO_2 respecto los manantiales pirenaicos (65-80 ppm SiO_2). Su pH de emergencia es de 6,9 condicionado por el abundante desprendimiento de CO_2

que acompaña las aguas en su salida, y debido a su alto contenido en CO₂ son aguas aciduladas carbónicas. También son fluoradas.

PARÁMETRO	VALOR	VALORACIÓN
Temperatura	53°C	hipertermales
pH	6,9	neutro
Conductividad	4310 µs/cm	
Residuo seco	3128 mg/l	mineralización fuerte
Alcalinidad	1800 mg/l	alcalina
Dureza total (CO ₃ Ca)	176 mg/l	dureza media
Sílice (SiO ₂)	70,9 mg/l	
Oxidabilidad (O ₂)	1,2 mg/l	

Tabla 5: Parámetros analíticos de las aguas minerales de Caldes de Malavella (Fuente: *Balnearis. Els recursos minerals de Catalunya, les aigües minerals*. Departament d'Indústria, Comerç i Turisme, Generalitat de Catalunya, 1999).

3.2.2. Usos del agua termal:

Como ya se ha dicho anteriormente, los usos de las aguas termales dependen de la composición química de cada manantial geotermal y de su calidad.

Los aprovechamientos que se hace de estas aguas son en primer lugar aguas de Balneario y en segundo lugar aguas envasadas. En Caldes de Malavella existen tres balnearios:

- Balneario Soler, que estuvo en funcionamiento hasta el 1975 y actualmente, su agua es aprovechada por la planta embotelladora de agua de Malavella.
- Balneario Prats, aprovecha el agua termal del manantial de La Mina, a 150 m, y que emana a una temperatura de 52,7°C.
- Balneario Vichy Catalán, aprovechamiento de las aguas del manantial Vichy Catalán (57°C). También aprovechada por la planta embotelladora de Vichy Catalán.

A principios de 1900, había 11 manantiales, con temperaturas hasta 60 ° C. En la actualidad, algunos de estos manantiales se canalizan en las plantas embotelladoras y sólo tres de ellos están disponibles para uso público.

3.3. Temperatura-energía acumulada

Con el fin de conocer cuál ha sido la temperatura que ha afectado a estas aguas en profundidad, se han aplicado los métodos de termometría química usuales (SiO_2 , Na/K, Na-K-Ca) y el geotermómetro basado en el equilibrio albita-anortita ampliado por Albert (1975) para ser aplicado a materiales graníticos.

De los supuestos mencionados en el apartado 2.3.2 (pag. 32), en este caso estos supuestos se verifican, ya que:

- 1) El método se basa en calcular un equilibrio químico, cuya constante es siempre función de la temperatura.
- 2) Las reacciones de equilibrio tienen lugar en materiales graníticos, por lo que puede suponerse que no existe limitación cuantitativa en cuanto a la presencia de plagioclasas reaccionantes se refiere.
- 3 y 5) Se han efectuado determinaciones del contenido en tritio del agua de cada manantial, obteniéndose en la mayor parte de ocasiones contenidos inferiores a 5 U.T., por lo que además de ser aguas de edad superior a 20 años (con un tiempo de tránsito tan elevado puede considerarse establecido el equilibrio agua-roca), queda patente su escasa o nula contaminación con aguas frías superficiales o de circulación poco profunda. Por otra parte, la constancia de los regímenes de descarga de los manantiales termales y de su composición química, puesta de manifiesto durante tres años consecutivos de observación (Albert, 1975), corroboran esta ausencia de mezcla.
- 4) El único supuesto previo difícilmente demostrable es la ausencia de cambios de composición química durante el ascenso del agua termal. El hecho de que prácticamente todo el circuito discurra por granito en profundidad, es decir, la homogeneidad de litofacies atravesada por el agua es, sin embargo, una garantía para que los fenómenos modificadores de cambios de bases se reduzcan al mínimo. La principal causa de alteración sería la disminución de temperatura durante el ascenso y variaciones de pH, fenómenos que afectarían sobre todo al contenido en calcio, pero la cuantía de este catión en la mayor parte de aguas termales de Catalunya es muy pequeña, ya que el 90-98 % del contenido catiónico corresponde a sodio (Albert, 1975).

La temperatura estimada a la que tuvo lugar el último equilibrio agua roca (Albert, 1976) oscila entre 89° y 119° C como máximo

3.4. Posibilidades de explotación

Zona a investigar:

1. Fracturas marginales que dan lugar a la depresión de la Selva y por las que se inyectan los basaltos. Se debe determinar la posición de los accidentes del zócalo de la depresión responsables de la alimentación termal del Plioceno de relleno. Se puede tener mayor éxito si se ubican los sondeos sobre las fracturas de borde dada la escasa permeabilidad del plioceno detrítico y de los granitos no alterados.
2. Calizas eocenas de Girona. Muchos pozos aquí construidos proporcionan agua carbónica y o termal a 20°-35°C a 150-300 m de profundidad
3. Zona de fracturas NW-SE con basaltos asociados y manantiales carbónicos e posible origen termal.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se pretende evaluar diferentes aspectos tratados durante el presente trabajo.

Por lo que se refiere al mapa de flujo de calor (Fig. 2), éste presenta dos anomalías regionales bien diferenciadas. La anomalía negativa de la desembocadura del Ebro puede ser debida a una amplia zona de recarga formada por arenas finas donde se infiltra el agua meteórica y enfría todo el sistema profundo. La anomalía positiva de la Depresión del Vallès resulta de la interpolación de varias anomalías positivas locales, donde el agua transporta el calor por convección hacia la parte externa de la corteza.

En cuanto al mapa gravimétrico de Catalunya (Fig.4), cabe destacar los mayores valores que toma en el margen Mediterráneo respecto el margen Atlántico. Esto se debe al adelgazamiento cortical hacia el E. Así, en el mediterráneo los valores de flujo más elevados se corresponden con la posición de los focos de calor más próximos a la superficie.

Por lo que se refiere al mapa de anomalías residuales de Catalunya (Fig. 5) aparecen unos máximos gravimétricos en la Depresión del Vallès no relacionado con variaciones del espesor de la cubierta terciaria. De este modo, se pueden considerar dos hipótesis. La primera tendría en cuenta la existencia de rocas de mayor densidad en el basamento. La segunda supone una estructura en bloques de este basamento. Según la estructura de las depresiones distensivas catalanas, que se disponen en bloques debido a los diferentes conjuntos de fallas de direcciones NE-SW, y las que cortan a estos de dirección NW-SE, se supone este segundo hecho como la causa de los máximos gravimétricos de la Depresión del Vallès.

Si se tiene en cuenta la disposición de las manifestaciones termales de Catalunya (Fig. 7) y se compara con los anteriores mapas comentados, se observa:

- Una relación entre estas manifestaciones con la anomalía positiva de la Depresión Central debida a la descarga rápida a través de las fallas NE-SW del agua infiltrada lentamente.

- Las fracturas a través de las cuales tienen lugar la descarga de las aguas termales de Catalunya están relacionadas con las zonas con un mínimo gravimétrico.
- El mapa de áreas hidrogeológicas de Catalunya muestra la tendencia general de éstas, y coinciden con la dirección de las importantes fallas de Catalunya que determinan la aparición de las manifestaciones termales en superficie.

Teniendo en cuenta éstas relaciones se podrían determinar posibles zonas de futuras explotaciones que deberían hallarse en zonas con elevado gradiente geotérmico y flujo de calor cercano a la superficie. Preferencialmente deberían situarse sobre fallas tectónicas para mayores valores de permeabilidad y, en consecuencia, regímenes mayores de extracción del agua. De este modo, se puede concluir que las zonas con mayor potencial de explotación se sitúan en el extremo NE de Catalunya.

5. CONCLUSIONES

Las manifestaciones termales aparecen bien diferenciadas en 2 unidades morfoestructurales: los Pirineos y los Catalánides. En los Pirineos la distribución es irregular, aparecen asociados a fracturas periféricas de macizos intrusivos que actúan como vía preferente de circulación ascendente de las aguas termales. En los Catalánides, los manantiales geotermales aparecen situados sobre las fallas de dirección NE-SW, que condicionan la existencia de las fosas prelitorales catalanas, concretamente, en el Vallès y en la Selva. En algunos casos estas grandes fallas están atravesadas por otras de menor importancia de dirección NW-SE.

El origen del termalismo catalán está asociado a movimientos tectónicos, especialmente, en zonas de adelgazamiento cortical. Las manifestaciones termales se sitúan en los puntos en que las fracturas cortan con los fondos de valle ya que es donde se encuentran los menores niveles piezométricos. Aunque en muchos casos, el agua ascendente da lugar a múltiples surgencias debido al desdoblamiento de estas aguas debido a fracturas superficiales.

Los manantiales termales se caracterizan por tener temperatura y caudales constantes. El régimen de descarga constante implica que la recarga o el almacenamiento de los recursos es mucho mayor que la descarga. Las aguas geotermales también presentan estabilidad de la composición química.

La mayor parte de manifestaciones termales de Catalunya están asociadas a materiales graníticos. Estas presentan facies bicarbonatada sódica con altos contenidos de SiO_2 y Na^+ como catión dominante.

Las aguas geotermales de los Pirineos presentan homegeneidad cuantitativa y cualitativa. Se trata de aguas bicarbonatadas sódicas con circulación asociada a granitos y de escasa mineralización. En los Catalánides se distinguen 2 facies hidroquímicas: bicarbonatada sódica y clorurada sódica. La primera corresponde a circulación por granitos y la segunda a circulación profunda a través de materiales sedimentarios.

Los gradientes geotérmicos son mínimos en la provincia de Lleida y van aumentando hacia los Pirineos y los Catalánides.

Según los diferentes geotermómetros usados para la determinación de la temperatura del último equilibrio agua-roca, ésta oscila entre 80° y 100° C en todas las manifestaciones termales.

En Catalunya solo existen yacimientos de baja y media entalpia con posibilidades de aprovechamiento en diferentes usos, entre los que cabe destacar los balnearios y las aguas envasadas.

En cuanto al caso de Caldes de Malavella, las manifestaciones geotermales se sitúan sobre las fallas de dirección NE-SW.

Las formaciones metamórficas e ígneas del macizo de las Gavarres se comportan como zonas de recarga.

Son consideradas aguas de alta mineralización, bicarbonatadas sódicas, fluoradas y hipertermales. (60°C). Existe un total predominio del Na⁺ sobre los demás cationes, escasa proporción de SO₄⁼ y disminución de SiO₂ respecto los manantiales pirenaicos (65-80 ppm SiO₂). Su pH de emergencia es de 6,9 condicionado por el abundante desprendimiento de CO₂ que acompaña las aguas en su salida, y debido a su alto contenido en CO₂ son aguas aciduladas carbónicas.

Los aprovechamientos que se hacen de estas aguas son en primer lugar aguas de balneario y en segundo lugar aguas envasadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, J. F. (1973): Estudio hidrogeológico de los manantiales termales de Catalunya. Tesis de Licenciatura. Fac. de Ciencias de Barcelona. Inédito.

ALBERT, J. F. (1975): El equilibrio albita-anortita como termómetro hidrogeotérmico en zonas graníticas. *Acta Geol. Hisp.*, tomo X, nº 5, pp. 170-174.

ALBERT, J. F. (1976): Estudio geotérmico preliminar de Catalunya. Tesis doctoral, Univ. Barcelona. 461 pp. Inédito

ALBERT, J. F. (1979): El mapa español de flujos caloríficos. Intento de correlación entre anomalías geotérmicas y espesor cortical. *Bol. Geol. Min.* XC-I, 36-48.

ALBERT, J. F., COROMINAS, J y PARÍS, C (1979): El estudio hidrogeológico de los manantiales y su aplicación geológica: caso de las aguas termales, carbónicas y sulfhídricas de Catalunya. *Acta Geol. Hisp.*, tomo XIV, pp. 391-394

ALBERT, J.F. (1988): La Calor de la Terra: energía geotérmica a Catalunya. Generalitat de Catalunya. Departament d'Indústria i Energia. Direcció General d'energia.

CABAL, J. y FERNÁNDEZ, M. (May 1995): Heat flow and regional uplift at the north-eastern border of the Ebro basin, NE Spain. *Geophysical Journal International*, Vol. 121, Issue 2, pp. 393-403

CARMONA, J, M., BITZER, K., LÓPEZ, E. y BOUAZZA, M. (June 2000): Isotopic composition and origin of geothermal waters at Caldetes (Maresme - Barcelona). *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 69-70, pp. 441-447

COROMINAS, J. (1978): Condiciones hidrogeológicas de los manantiales sulfhídricos de Catalunya. *Acta Geol. Hisp.*, tomo XII, nº 1, pp. 26-30

FERNÁNDEZ, M y BANDA, E. (1988): Aproximación a la anomalía geotérmica de La Garriga - Samalús (Vallès - Penedès). *Acta Geol. Hisp.*, Vol. 23, nº 1, pp. 1-20

FERNÁNDEZ, M y BANDA, E. (1989): An approach to the thermal field in northeastern

Spain. *Tectonophysics*, 164, pp. 259-266

FERNÁNDEZ, M y BANDA, E. (1990): Geothermal anomalies in the Vallès-Penedès graben master fault: convection through the horst as a possible mechanism. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, nº B4, pp. 4887-4894

FERNÁNDEZ, M., MARZÁN, I., CORREIA, A. y RAMALHO, E. (1998): Heat flow, heat production, and lithospheric thermal regime in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 291, pp. 29-53

FERNÁNDEZ, M., TORNÉ, M. y ZEYEN, H. (1990): Lithospheric thermal structure of NE Spain and the North-Balearic Basin. *Journal of Geodynamics*, 12, pp. 253-267

PARIS, C y ALBERT, J. F (1976): Sobre la génesis de las aguas carbónicas de la provincia de Gerona. *Acta Geol. Hisp.*, tomo XI, nº 5, pp. 124-128

PIQUÉ, A., GRANDIA, F. y CANALS, A. (2010): Processes releasing arsenic to groundwater in the Caldes de Malavella geothermal area, NE Spain. *Water Research*. Article in Press, pp.1-13

PUIG, C., BERASTEGUI, X., FERNÁNDEZ, M. y MARZÁN, I. (2010): Atlas de Recursos Geotérmicos de Catalunya: Régimen térmico superficial. II CONGRESO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA EDIFICACIÓN Y LA INDUSTRIA

TORNÉ, M., CASAS, A. Y BANDA, E. (1987): Cartografía física en Catalunya. II: El mapa gravimétrico. *Rev. Soc. Geol. España*, 1, (1-2), pp. 81-87

Masses d'aigua subterrània de Catalunya. La Selva. Fitxa de caracterització, anàlisi de pressions, impactes i anàlisi del risc d'incompliment. Agència Catalana de l'Aigua. *Generalitat de Catalunya. Departament de medi Ambient i Habitatge*

Balnearis. Els recursos minerals de Catalunya, les aigües minerals. *Generalitat de Catalunya. Departament d'Indústria, Comerç i Turisme, Generalitat de Catalunya.* (1999)