

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
SECRETARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

ANALISIS METODOLOGICO DE LAS TECNICAS GEOQUIMICAS
EMPLEADAS EN
PROSPECCION GEOTERMICA

" S I N T E S I S "



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Julio 1985

SINTESIS DE LA UTILIZACION DE LOS METODOS GEOQUIMICOS APLICADOS A LA INVESTIGACION GEOTERMICA

INTRODUCCION

La finalidad de este resumen es concretar y reseñar los aspectos más significativos de las metodologías geoquímicas aplicadas a la prospección de recursos geotérmicos, los cuales han sido extensamente desarrollados en los diferentes capítulos que integran el Proyecto "Análisis Metodológico de Técnicas Geoquímicas Empleadas en Prospección Geotérmica".

Dado su carácter de guía metodológica, solamente se tratarán de forma concisa las diferentes técnicas geoquímicas, y su aplicación a la exploración y evaluación de los recursos geotérmicos, con referencia a los diferentes capítulos y apartados, donde han sido objeto de una exposición tanto temática como bibliográfica más amplia.

RECURSOS GEOTERMICOS

La selección de una zona para la exploración de posibles recursos geotérmicos, está fundamentalmente ligada a la existencia de manifestaciones termales en forma diversa, como surgencias termales, fumarolas, anomalías térmicas elevadas y/o gradientes geotérmicos elevados; sin embargo, está también condicionada por una serie de factores tanto de tipo social como económico.

Para el planteamiento de la aplicación de las diferentes metodologías geoquímicas, las primeras informaciones las obtendremos del análisis de las manifestaciones geotermales en superficie, teniendo como objetivo primordial el establecer si dichas manifestaciones responden a un sistema ligado a una circulación profunda en áreas con gradientes geotérmicos próximos a los normales, o bien están relacionados con yacimientos geotérmicos caracterizados por temperaturas más elevadas y cuyos fluidos sufren un proceso de enfriamiento durante su ascenso hacia la superficie.

Para su estudio es necesario establecer un modelo conceptual, en base a la información geológica e hidrogeológica del área seleccionada, con especial atención al planteamiento del sistema hidrotermal en lo referente a las posibles áreas de recarga y a la existencia de acuíferos potenciales que sirvan de almacén a los fluidos geotérmicos, en relación con las características tectónicas y estructurales, modelo que permita la ubicación del área dentro de las tipologías establecidas (III.2) para los diferentes recursos geotérmicos.

La aplicación de las diferentes metodologías de termometría química, sobre las manifestaciones termales y el establecimiento del sistema hidrotermal en relación con la estructura condicionante del mismo, debe permitir, en una primera fase de exploración, el establecimiento de las posibilidades del potencial geotérmico: baja, media o alta entalpía, del área investigada.

CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS TERMALES

El estudio geoquímico general, encaminado a la exploración de un área determinada, se inicia con la realización de un inventario de todas las manifestaciones termales de la zona, haciéndose extensiva a la toma de muestras de aguas frías.

El inventario debe realizarse de acuerdo con un esquema previamente establecido como la Hoja de Datos del IGME para Puntos de Geotermia. La toma de muestras debe ejecutarse de acuerdo con las recomendaciones del Capítulo IX (IX.2 y IX.3); y con particular detenimiento en lo referente a la localización, medida de la temperatura de surgencia, caudal, medida de pH, conductividad eléctrica, detección de gases disueltos y la posible presencia de precipitados y costras en los puntos de surgencia. Los análisis de las diferentes aguas subterráneas (manantiales y pozos) incluye la determinación de los constituyentes inorgánicos referidos en los apartados IV.1.1 y IV.1.2, mientras que el muestreo y análisis de gases (VI.1) puede ser relegado a una segunda fase del inventario, salvo en las zonas donde estas manifestaciones termales sean predominantes, una vez establecidos los posibles sistemas que condicionan la naturaleza

del gas emitido, para establecer correlaciones entre la composición del gas y la temperatura.

La toma de muestras para análisis isotópicos (IX.4), de aplicación en la evaluación del sistema geotérmico, debe realizarse de forma selectiva y preferentemente por personal cualificado.

La caracterización de las diferentes manifestaciones debe iniciarse en función de su termalismo de surgencia. Los criterios normalmente utilizados son: aguas frías 10 - 20°C, hipotermales 20 - 30°C, mesotermales 30 - 50°C y termales con valores superiores a los 50°C. Su clasificación se efectúa mediante la aplicación del Diagrama de Piper (IV.2.1), el cual permite de forma simple individualizar las diferentes familias de aguas presentes en la zona. En esta fase del estudio de datos, y antes de aplicar indiscriminadamente geotermómetros químicos, se deben establecer correlaciones entre el quimismo de las aguas y su temperatura de surgencia, bien de forma global o individual y en relación a la salinidad total; diagramas de este tipo se presentan en la Figura 4.7. El objeto que se persigue es establecer qué componentes químicos son aportados por el agua termal (por ejemplo: contenidos elevados de Na, Li, etc) y cuales son aportados por las aguas frías perturbadoras del sistema (por ejemplo: Ca, Mg, etc), lo cual es fundamental para establecer la existencia de procesos de mezcla (Figura 4.9) u otros procesos que alteran las características primarias del agua termal.

Sin embargo, este tipo de valoraciones no siempre son simples, sobre todo si los términos extremos de las diferentes familias no son bien conocidos y/o no existen surgencias cuya temperatura y características no puedan identificarse como químicamente representativas del tipo termal y por consiguiente, susceptibles de ser valoradas mediante geotermometría química.

Para paliar en parte esta dificultad interpretativa y dada la complejidad de situaciones posibles, se han desarrollado (D'Amore, Scandiffio y Panichi, 1983) parámetros químicos que, con la ayuda de diagramas rectangulares, permiten analizar y definir las características hidrogeológicas de las diferentes muestras de agua que

integran el sistema hidrotermal. Ejemplos del cálculo de los parámetros químicos y de su aplicación a la definición e identificación de facies hidroquímicas, se presentan en los Apartados IV.2.2 y IV.2.3, en los que se ponen en evidencia las posibilidades resolutivas en confrontación con el Diagrama de Piper. La utilización conjunta de ambos diagramas, es evidentemente útil en el planteamiento y valoración de modelos hidrológicos complejos.

Con la identificación de la coexistencia de diversas tipologías de fluidos, se plantea la problemática de intentar establecer los procesos que, en consonancia con el modelo conceptual planteado, han condicionado las composiciones que actualmente observamos, en base a mecanismos de dilución, precipitación e intercambio iónico, durante su flujo a través de los materiales constituyentes de los diferentes acuíferos.

Las variaciones composicionales puestas en evidencia, responden a procesos diversos, tanto de carácter químico como físico. Los primeros, en consonancia con los parámetros de temperatura y presión, son los condicionantes de las diferentes concentraciones de elementos solutos y contenidos en sales disueltas, respondiendo a un esquema evolutivo general, como el presentado en el Apartado IV.3. Sin embargo, estas composiciones primarias pueden estar afectadas por una serie de procesos físicos durante el ascenso de estos fluidos a la superficie, entre ellos se incluyen como más importantes los de dilución y mezcla con aguas frías y los procesos de ebullición, mecanismos que son tratados en detalle en los apartados IV.4.1 y IV.4.2, y que deben ser tenidos en cuenta, ya que pueden modificar el carácter de alta temperatura de los fluidos geotérmicos y cuyos efectos se sintetizan en las páginas IV.33 - IV.36.

Otro efecto que interviene en la composición de los fluidos termales son las pérdidas de calor por conducción, efecto por lo general despreciable, pero que si es suficientemente prologando puede originar reajustes composicionales, en particular de la sílice y componentes alcalinos.

Si se admite que las composiciones químicas observadas en superficie son solamente el resultado de las reacciones químicas que han tenido lugar entre el fluido (agua) y las rocas con las que permanece en contacto prolongado, sin que hayan interferido otros procesos físicos perturbadores, es posible verificar si las reacciones han alcanzado el equilibrio con diferentes tipos de rocas (fases minerales) y a determinada temperatura. Sin embargo, el cálculo de los estados de saturación de las aguas naturales, en relación con los minerales del sistema entre fluido-roca, es complejo por el número de variables geológicas que intervienen y la falta de exactitud de los datos termodinámicos (como temperatura, pH del fluido, paragénesis minerales, etc), por lo que sólo pueden plantearse sistemas de soluciones acuosas multicomponentes, cuya resolución requiere un tratamiento numérico complejo, mediante programas numéricos como el WATEQF, o bien utilizar cálculos simplificados para la valoración de los coeficientes de actividad como el de Debye-Huckel (IV.5.3) para el planteamiento de Diagramas de Actividad Iónica, semejantes a los presentados en el Apartado IV.5.5, los cuales proporcionan información cuantitativa de los componentes que intervienen en el sistema.

Los gases y elementos volátiles son componentes que también participan en los procesos de reacción entre los fluidos y las rocas del yacimiento, y su análisis aporta una información importante sobre las características termodinámicas del sistema hidrotermal; en el Apartado VI.2 se exponen las principales reacciones químicas que relacionan composiciones y temperaturas, pero estas composiciones gaseosas son raramente utilizables en sistemas de agua caliente, ya que los gases geotérmicos derivan de reacciones que tienen lugar a altas temperaturas y por consiguiente relacionables con sistemas de alta entalpía. Ya que la información obtenida a partir de los datos de los gases es generalmente cualitativa y solamente de importancia primordial en la prospección de áreas en relación con manifestaciones de elevada temperatura (como zonas con actividad volcánica) y durante el desarrollo de pozos de los campos geotérmicos, su estudio se plantea una vez establecidas las características hidrotermales del sistema.

En la exploración geoquímica de gases, en manifestaciones termales, se efectúan determinaciones analíticas de CO_2 , SH_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , H_2 y otros gases como el He, Ar, etc. Dichos análisis permiten una clasificación rápida mediante la aplicación de diagramas (Figura 6.1) y el establecimiento de posibles procesos de mezclas con el aire, en base a las relaciones $\text{N}_2 - \text{O}_2$ y $\text{CO}_2 - \text{N}_2$.

Aún cuando la interpretación de la presencia de los diferentes gases en las manifestaciones termales es controvertida y debe efectuarse a partir de un estricto conocimiento del sistema hidrotermal, generalmente se considera que el CO_2 se genera en profundidad por procesos de metamorfismo en relación con materiales calcáreos; la presencia de nitrógeno (no atmosférico) y metano, se relaciona con la presencia de formaciones sedimentarias ricas en materia orgánica, generándose dichos gases a bajas temperaturas, Por el contrario, las relaciones del hidrógeno en relación con el metano, se incrementan en relación con el aumento de la temperatura, debido a que el hidrógeno geotérmico se origina por disociación del agua, y en estadios posteriores se originan procesos de reequilibrio a otras fases como CH_4 y SH_2 , estables a menores temperaturas.

Los gases activos como SH_2 y CO_2 , proporcionan información sobre la recarga, dirección de flujo y otros parámetros, como se indica en el Apartado VI.2.5.

Los gases inertes como el He, no son demasiado afectados por los procesos de equilibrio, por lo que son utilizados como guías para establecer pautas de comportamiento, en relación con otros gases o elementos contenidos en los fluidos de descarga. En el Figura 6.7 se presentan algunos ejemplos de correlaciones en campos de alta entalpía.

El conocimiento global de un sistema hidrotermal requiere, para su total caracterización, la toma de muestras y análisis de las diferentes manifestaciones termales con determinaciones de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno, estudio que debe extenderse a algunas de las aguas superficiales frías. La geoquímica isotópica aplicada a campos geotérmicos, se expone en el Capítulo VII y, en base a ella, es

posible establecer el origen de los fluidos termales y sus posibles relaciones con procesos de intercambio con las rocas del almacén (Figura 7.1) y de este tipo de agua con el régimen de agua subterránea local y meteórica.

GEOTERMOMETRIA QUIMICA

Una vez establecidas las características químicas de los fluidos hidrotermales, mediante análisis químicos e isotópicos de aguas termales, vapor y gas provenientes de pozos y surgencias, es posible la aplicación de las técnicas geotermométricas que comprenden geotermómetros cuantitativos, geotermometría gaseosa, geotermómetros cualitativos, de mezcla e isotópicos. Para la aplicación de las geotermometrías es requisito fundamental que las reacciones dependientes de la temperatura, establecidas entre las rocas del yacimiento y el fluido, tiendan al equilibrio, y que no existan reequilibrios en su ascenso desde el yacimiento al punto de surgencia.

Geotermómetros Cuantitativos

Son generalmente utilizados los relacionados con el contenido de sílice y los alcalinos, y sus ecuaciones se presentan en las Tablas 5.1 y 5.2; sus fundamentos teórico-empíricos, así como las referencias bibliográficas, están contenidas en el Apartado V.2.2.:

- Geotermómetros de la sílice. Han sido extensamente aplicados, bien mediante la utilización de gráficos (Figura 5.2) o mediante las ecuaciones (a - f) de la Tabla 5.1. La utilización de gráficos para una primera evaluación presenta la ventaja de la visualización de los puntos proyectivos y el establecimiento de relaciones entre las diferentes muestras; mientras que la aplicación de ecuaciones permite obtener rápidamente resultados numéricos de la evaluación de la temperatura profunda.

En ambos casos, para su correcta utilización, se debe establecer el tipo de polimorfo de la sílice, cuarzo, calcedonia, cristobalita o sílice amorfa (figuras 5.7 y 5.3) que controla la concentración de sílice en las aguas termales.

A temperaturas comprendidas entre los 100 - 250°C, el contenido en sílice está controlado por el cuarzo y la evaluación de la temperatura se efectuará considerando las pérdidas de calor por procesos conductivos o por pérdidas de vapor. El límite superior de aplicación se encuentra entre los 225 - 250°C.

A temperaturas inferiores a los 150°C empiezan a predominar otras fases como la calcedonia y la cristobalita, debido a que su solubilidad es mucho más elevada que la del cuarzo, aún cuando en el intervalo comprendido entre los 110 - 180°C no se distinguen diferencias sustanciales entre el cuarzo y la calcedonia, y por debajo de los 90°C es controlado por la calcedonia, pudiendo presentarse en equilibrio a temperaturas bajas, aún cuando pueden ocurrir reacciones de no-equilibrio, dando lugar a concentraciones superiores o precipitaciones de sílice.

En general, los procesos de solubilidad de la sílice, tratados en el Apartado V.2.1 son complejos, y debido a que la cinética de reacción de equilibrio en sistemas naturales es rápidamente alcanzada, pueden sufrir variaciones en períodos breves, con reajustes de concentración de la sílice respecto a los diferentes polimorfos en relación a temperaturas más bajas.

- Geotermómetros alcalinos. Están relacionados con los contenidos de Na, K, Ca, Li y Mg, y su aplicación ha sido modificada en base a parámetros correctores para el ajuste de la temperatura calculada. Las ecuaciones de estos geotermómetros se presentan en las tablas 5.1 y 5.2.

Desde un punto de vista exploratorio, el geotermómetro normalmente utilizado es el Na-K-Ca para rangos de temperatura calculadas mayores o menores de 100°C y aplicando la corrección del Mg, cuando sus concentraciones son muy elevadas y las temperaturas calculadas por el geotermómetro Na-K-Ca son superiores a los 70°C.

La utilización de este geotermómetro, proporciona temperaturas estimadas superiores a las de la sílice, debido a que las

reacciones de intercambio que regulan las relaciones molares de Na/K son más lentas que las que regulan la sílice, pero la valoración de las temperaturas que proporciona debe efectuarse con suma precaución, ya que es afectado por los procesos de ebullición, mezcla con aguas frías, contenidos elevados de magnesio, y presión parcial de CO_2 . Los procesos de ebullición y de precipitación de calcita proporcionan temperaturas demasiado elevadas, mientras que los efectos de los procesos de dilución dependerán de la salinidad de los fluidos de mezcla y del volumen de los mismos; por tanto, estos geotermómetros deben ser utilizados con extrema precaución.

Otro de los geotermómetros alcalinos recientemente propuestos es el Na/Li, aplicable tanto a fluidos de origen meteórico (Tabla 5.1.1) para valores de Cl^- menores de 11.000 mg/kg, como para fluidos de origen marino o aguas salobres, con contenidos de Cl^- superiores a 11.000 mg/kg. Su aplicación a muestras de fluidos correspondientes a manifestaciones termales y pozos de sondeos geotérmicos, pone en evidencia su posibilidad de aplicación, constituyendo un parámetro de evaluación complementario, en conjunción con otros geotermómetros.

- En relación con la evaluación de temperaturas de aguas salobres en cuencas sedimentarias y de aguas marinas modificadas térmicamente, se han desarrollado varios geotermómetros específicos (Tabla 5.2). El geotermómetro K/Mg se aplica a muestras de aguas donde no se ha establecido el equilibrio con el Na y el Ca, generalmente en relación con aguas salobres y acuíferos de baja temperatura. Asimismo, el geotermómetro Mg/Li se desarrolló en base a muestras de aguas de formación, asociadas a campos de gas y petróleo.

Geotermometría Gaseosa

Ha sido desarrollada en base al planteamiento de Ecuaciones de Equilibrio (V.5.1), en las que a partir de los datos termodinámicos de solubilidad de gases y estabilidad de los minerales, se establecen las ecuaciones geotermométricas que relacionan la temperatura y la

fracción molar de cada gas. Entre estas relaciones, actualmente la más utilizada, es la ecuación semi-empírica de D'Amore y Panichi, que permite predecir la temperatura de gases de fumarolas, fuentes termales y pozos, en rangos de temperatura comprendidos entre los 60 - 300°C, en base a las concentraciones de SH₂, H₂ y CO₂, expresadas en porcentajes molales.

Geotermometría Isotópica

Es prácticamente aplicada a la valoración de campos geotérmicos productores de vapor, y se fundamenta en los procesos de fraccionamiento de diferentes componentes como el carbono en el sistema de equilibrio CO₂ y CH₄, siendo normalmente utilizada para la evaluación de temperaturas comprendidas entre los 100 y 400°C. Por lo general, proporciona temperaturas calculadas superiores a las medidas en superficie.

Otros geotermómetros isotópicos que afectan a la fraccionación del hidrógeno y el oxígeno en diferentes sistemas, se presentan en el Apartado VII.2, siendo de interés el relacionado con la fraccionación del oxígeno y el sulfato disuelto en aguas geotérmicas, en especial cuando los fluidos acuosos están en relación con rocas constituidas por minerales entre los que el sulfato tiene importancia primaria; este geotermómetro es, asimismo, afectado por procesos de saturación de SO₄Ca por evaporación, con la formación de yeso y procesos de oxidación de sulfito a sulfato que originan dificultades al evaluar sistemas naturales complejos.

Geotermómetros Cualitativos e Indicadores de Actividad Geotérmica

En la exploración de una extensa zona para la evaluación de sus posibles recursos geotérmicos, es de gran utilidad la localización de las zonas de ascenso de fluidos, características de las rocas del yacimiento.

Como geotermómetros cualitativos se utilizan frecuentemente relaciones atómicas de Cl/B, Cl/F, Cl/SO₄, Na/Ca, Na/Mg y Cl/CO₃H + CO₃, relaciones que generalmente se incrementan con la temperatura

y su estudio de isodistribuciones puede ser de gran ayuda orientativa durante las fases iniciales de investigación geoquímica.

Como indicadores de actividad geotérmica, se utilizan el análisis y distribución de elementos traza como As, B, Sb, Hg, Mn, Fe, etc, cuya zonación proporciona información de la temperatura, tamaño y forma del sistema geotérmico, y localización de la temperatura, tamaño y forma del sistema geotérmico, y localización de zonas permeables, en relación con zonas de alteración geoquímica de suelos (Capítulo VIII).

El estudio de minerales de alteración constituye, en muchos casos, geotermómetros significativos en función de la asociación de minerales secundarios. Estas asociaciones reconocidas en zonas superficiales o próximas a la misma son:

- Concentraciones de As, Sb, Be, Hg, asociados a materiales silíceos en puntos de descarga de fluidos, zonas de mezcla o interfases de ebullición.
- Depósitos de óxidos de Mn y Fe, con concentraciones de Ba, W, Be, Co, Cu, As, Sb, Hg, originados por oxidación de salmueras.
- Concentraciones elevadas de Hg dentro de materiales superficiales, y más específicamente en las proximidades de fumarolas.

La geoquímica de suelos está encaminada a delimitar la distribución de zonas de fallas permeables. Esta prospección se hace extensiva a las determinaciones de Hg absorbido por el suelo, distribución de elementos no volátiles depositados por fluidos (As, Sb, Cs, etc) y contenido de gases (Rn, He, S, CO₂) en suelos.

En el Apartado VIII.3 se incluye extensa información y trabajos ilustrativos de su aplicación. En general, este tipo de estudios indican que la investigación de contenidos de mercurio en suelos puede ayudar, sin lugar a dudas, a definir amplias zonas en relación con la existencia de recursos geotérmicos, pero que resultan altamente dependientes de las condiciones geológicas locales.

Mezclas Geotérmicas

Como ya se indicó en la caracterización de los fluidos termales se presentan una serie de procesos físicos, fundamentalmente de mezcla y ebullición, que afectan a los cálculos geotermométricos anteriormente indicados y que en algunos casos pueden invalidarlos.

Los geotermómetros más afectados por los procesos de dilución son el Na-K-Ca-Mg, Mg/K, Mg/Li y la sílice; solamente mantienen validez el Na/K y el Na/Li.

Siempre que sea posible establecer la composición de los términos finales, es posible el planteamiento de métodos matemáticos para evaluar los porcentajes del elemento de mezcla. Sin embargo, en este planteamiento se requiere que la composición del término final sea relativamente constante y preferiblemente de composición ClNa, en lugar de las SO_4 y/o CO_3HNa .

Los modelos de mezcla pueden ser simples (Figura 5.15) sin que existan pérdidas o ganancias de componentes, o bien, modelos de mezclas complejas en las que intervienen procesos de intercambio iónico, disolución y precipitación.

VALORACION DE LOS PROCESOS DE ENFRIAMIENTO CONDUCTIVO, EBULLICION Y MEZCLA EN LOS FLUIDOS GEOTERMICOS

Se han desarrollado dos metodologías para la evaluación de la influencia de estos procesos físicos sobre los fluidos termales, que se centran en la utilización de Diagramas de Entalpía-Cloruros (Apartado V.2.5) y los de Mezcla Sílice-Entalpía (V.2.6 y V.2.7).

La primera metodología es indicada cuando se considera que el contenido en cloro es prácticamente el mismo que el del yacimiento en profundidad y se presentan diferentes manifestaciones con temperaturas diferentes, pero con contenidos similares de cloro; en este caso, se pueden asignar valores de entalpía a cada muestra y proyectarlas en relación a sus correspondientes valores de Cl (ej. Figura 5.17, donde se proyecta como punto de referencia el agua no

termal). Un ejemplo de utilización detallada de esta metodología se presenta en el Apartado V.2.5.

La utilización de Ecuaciones de Mezcla Sílice-Entalpía, está encaminada a la valoración del modelo termal en base a los contenidos en sílice, sobre todo en surgencias con caudales elevados en los que pueda suponerse que la sílice de alta temperatura persiste todavía en el agua. De esta forma puede, en algunos casos, obtenerse una mayor información adicional sobre la temperatura original del sistema. Los modelos que se presentan (Figura 5.22) plantean diversas situaciones de circulación para ilustrar metodologías de evaluación de las temperaturas del subsuelo, en base al carácter químico y físico de las fuentes termales y sus relaciones con otras manifestaciones termales y fumarolas, una vez establecidos el modelo del sistema hidrotermal.

El primer modelo permitiría obtener la temperatura máxima del componente de agua caliente, mientras que el segundo nos permitiría evaluar la temperatura mínima probable del subsuelo. Ejemplos de aplicación y de cálculo de los diferentes modelos se indican en los apartados V.2.6 y V.2.7, en los que se incluye un método simple de evaluación.

APLICACION DE METODOLOGIAS GEOQUIMICAS A LA EXPLORACION DE AREAS GEOTERMICAS

Como se indica en el capítulo "Estrategias de Exploración", los recursos geotérmicos son tan variables en cuanto a sus características específicas, incluso entre recursos del mismo tipo general, que no es posible especificar una determinada secuencia de técnicas de exploración, la cual sea más efectiva en cuanto a coste y poder resolutivo.

La estrategia de exploración que se debe seguir en una zona específica debe estar especialmente diseñada para su aplicación a la zona concreta y ser readaptada a la vista de los datos que se estén obteniendo con la aplicación de las diferentes metodologías.

Como no existe un modelo geológico único, aplicable a todos los recursos geotérmicos, es necesario su encuadre en una clasificación general que permita el planteamiento de una estrategia metodológica, en base a su posible potencial de baja, media y/o alta entalpía, así como a su encuadre geológico en: Cuencas Sedimentarias, Rocas Igneas/Fallas y Areas Volcánicas.

Metodología Geoquímica en Cuencas Sedimentarias

Atendiendo a las tipologías establecidas en el Apartado III.2, las estrategias de exploración se dirigirán a la evaluación de los recursos asociados a grandes cuencas sedimentarias y aquellos otros en relación con cuencas intermontañas.

- Cuencas Sedimentarias. Sus recursos potenciales se encuadran en la baja entalpía, con fluidos termales en relación con el flujo térmico regional. Las características estructurales, y de los sistemas hidrotermales asociados, así como su estrategia de exploración, han sido tratados en los apartados III.2.1 y XI.5.

Su exploración se efectúa en base a:

- . Información geológica e hidrogeológica general existente en la zona.
- . Inventario general sobre fuentes termales fundamentalmente en relación con las zonas de descarga y accidentes tectónicos.
- . Estudio y revisión de la información disponible sobre geofísica y de pozos de petróleo/agua, en particular sobre la temperatura de los sondeos, litologías, relaciones estratigráficas, identificación de acuíferos y calidad de las aguas.
- . Estimación de los gradientes térmicos regionales.
- . Aplicación de geotermometrías específicas, teniendo en cuenta el tipo de fluidos, generalmente de alta salinidad. Los

geotermómetros aplicables suelen ser K/Mg, Na/Li y Mg/Li, referidos en la Tabla 5.2.

- Cuencas Intermontañasas. Presentan características hidrotermales diversas, siendo su potencial geotérmico, asimismo, variable, incluyéndose dentro de la baja-media entalpía, con posible predominio de esta última. El establecer una única metodología de exploración que pueda aplicarse indiscriminadamente es muy difícil, ya que el esquema general que se expone, deberá ser adaptado en función de las características particulares de cada sistema termal. Su exploración se efectúa en base a:

- . Efectuar un reconocimiento geológico e hidrogeológico de detalle con el planteamiento de un modelo inicial, donde pueda incluirse toda la información que se obtenga del desarrollo de las sucesivas fases de exploración.
- . Clasificación de los sistemas hidrotermales, con la utilización de Diagramas de Stiff (Figura 10.3) para su distribución geográfica y los de Piper, para individualizar los diferentes acuíferos y establecer sus interacciones; estos deben ser complementados con el cálculo de los parámetros químicos y la utilización de diagramas rectangulares para la definición de facies hidroquímicas.
- . Geotermometría semiprofunda para la determinación de gradientes conductivos y elaboración de mapas de distribución de flujos térmicos en relación con formaciones impermeables de cobertera.
- . Estudio de las características químicas de las muestras más significativas, que caracterizan el sistema termal.

Termometría cuantitativa (SiO_2 y Na-K-Ca-Mg).

Termometría cualitativa (diagramas binarios Cl/B, Cl/ $\text{CO}_3\text{H}+\text{CO}_3$, Na/Ca, etc).

Planteamiento de procesos que afectan al quimismo, según los casos habrá que aplicar:

- * Modelos de mezcla y aplicación de mezclas geotermométricas.
- * Diagramas de Entalpía-Cloruros.
- * Ecuaciones de mezclas Sílice-Entalpía.

Relaciones entre fluido-rocas almacén:

- * Cálculo de actividad iónica.
- * Diagramas de actividad en función de la temperatura del sistema, para campos de estabilidad con silicatos, carbonatos y sulfatos.
- . Análisis isotópicos de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y D/H, sobre las muestras termales y de las fuentes frías locales, encaminada a establecer el origen, altitud del área de recarga e intercambio $\delta^{18}\text{O}$ con las rocas del almacén.
- . Análisis puntuales de tritio, para establecer la interacción entre el agua profunda (de más de 25 años) con las aguas locales (en equilibrio con la atmósfera y conteniendo tritio).

Esta metodología de carácter general dirigida al estudio de fluidos termales de baja-media entalpía, proporciona una amplia información de los sistemas hidrotermales complejos que debe ser valorada e interpretada por el equipo de profesionales responsables del proyecto.

En determinadas situaciones la información sobre el área en exploración puede ser ampliada (sobre todo cuando no existen manifestaciones termales superficiales de importancia) con el planteamiento de campañas encaminadas al estudio de paragénesis minerales, en relación con productos de alteración y zonaciones de elementos trazas, para la detección de fracturas permeables y posibles zonas donde han existido descargas de fluidos a elevadas temperaturas.

Un ejemplo de aplicación de técnicas isotópicas y geoquímicas convencionales, para definir sistemas hidrotermales, se presenta en el Apartado VII.3.

Metodología Geoquímica en Rocas Igneas/Fallas

La estrategia aplicable a estas zonas es similar a la anteriormente indicada para las cuencas intermontañosas, aún cuando puedan señalarse algunas peculiaridades en cuanto a la aplicación de técnicas geoquímicas.

Los sistemas hidrotermales son generalmente más simples en cuanto a tipologías de fluidos, y sus surgencias, al estar asociadas con fallas y fracturas, proporcionan caudales significativos en relación con temperaturas de surgencia importantes.

Para la evaluación de su potencial geotérmico, y superadas algunas de las etapas anteriormente enunciadas, se recomienda para su testificación:

- Información sobre la distribución de fallas y fracturas, mediante la utilización de técnicas de teledetección y fotointerpretación.
- Sondeos para la determinación de gradientes térmicos profundos.
- Investigaciones geofísicas detalladas, para la detección de anomalías.
- Termometría específica en base a Sistemas de Equilibrio con las Rocas Almacén (ej. geotermómetro Ab-An para zonas graníticas).
- Aplicación de métodos indirectos de determinación de temperaturas, mediante minerales de alteración en muestras de sondeos y zonaciones de Hg, As, Sb, etc, en relación con zonas permeables y/o costras de alteración.

Metodología Geoquímica en Areas Volcánicas

Al contrario de los recursos geotérmicos asociados con zonas Igneas/Fallas, los sistemas termales en terrenos volcánicos son químicamente muy complejos y requieren estudios geoquímicos muy detallados, para evaluar los diferentes regímenes hidrológicos presentes, que pueden condicionar la existencia de distintos tipos de yacimientos, algunos de los cuales, incluso con posibilidades dentro de la alta entalpía.

Las etapas de exploración recomendadas para la evaluación de recursos geotérmicos en zonas volcánicas activas son:

- Reconocimiento geológico de detalle, con la reconstrucción de los diversos episodios volcánicos y unidades volcano-sedimentarias, capaces de constituir almacenes explotables.
- Evaluación del gradiente geotérmico mediante sondeos profundos.
- Inventario de todos los datos hidrológicos, tanto de agua como de gas, en relación con puntos de surgencia, pozos, fumarolas, etc, pero con particular detenimiento y control de los relacionados con anomalías termales.
- Elaboración de los datos de manifestaciones termales, siguiendo las etapas señaladas anteriormente para muestras significativas de los fluidos geotérmicos.
- Muestreos de H₂O/Gas para análisis isotópicos (Oxígeno, D/H, ¹⁴C).
- Muestreo de H₂ (vapor) para determinaciones de T y $\delta^{18}\text{O}$ (vapor)
- Muestreo y análisis de gas, para su caracterización química como isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ en CO₂ y travertinos).
- Termometría química de gases (SH₂-H₂-CH₄-CO₂).

La realización de las diferentes etapas permitirá una caracterización de los fluidos geotérmicos de la zona y la evaluación de su temperatura profunda, indicativa de su posible potencial geotérmico.

RECOMENDACIONES A LA APLICACION DE METODOLOGIAS GEOQUIMICAS

A lo largo del desarrollo del trabajo, se ha puesto en evidencia que las diferentes investigaciones geoquímicas proporcionan una información muy valiosa en todas las fases de la evaluación de una prospección geotérmica a bajo costo. Evidentemente, de todas estas metodologías, las geotermométricas son las más sugestivas y al mismo tiempo conflictivas, ya que su utilización e interpretación está sujeta a una serie de condicionantes (los cuales se enumeran en el apartado siguiente), que deben tenerse en consideración al momento de su utilización.

En el Apartado V.5 se han sintetizado las consideraciones más importantes para la interpretación de temperaturas, a partir de geotermómetros para diferentes fluidos (Cl/Na, CO_3HNa , $\text{CO}_3\text{HMg-Ca}$, mezclas) y las limitaciones de los geotermómetros.

PREMISAS BASICAS PARA LA ESTIMACION DE LA TEMPERATURA PROFUNDA MEDIANTE INDICADORES GEOQUIMICOS

La aplicación de las temperaturas obtenidas mediante los geotermómetros químicos, está sujeta a que sean admitidas una serie de premisas condicionantes inherentes a la propia metodología. Algunas de estas premisas pueden invalidar total o parcialmente la validez de los resultados, éstas fueron resumidas y expuestas por Fournier et al. (1974):

1. La temperatura es dependiente de las reacciones que tienen lugar en profundidad.
2. Todos los elementos constituyentes, involucrados en las reacciones que dependen de la temperatura, deben ser suficientemente abundantes como para permitir la saturación de los constituyentes. (Esta premisa no supone un factor limitador).

3. Los equilibrios entre roca-agua, tienen lugar a la temperatura del almacén.
4. Durante el flujo del agua hasta la superficie, solamente son admisibles pequeños procesos de reequilibrio o cambios de composición a temperaturas inferiores.
5. No deben existir procesos importantes de dilución o mezcla, entre las aguas calientes profundas y otras superficiales y frías.

Las tres primeras premisas son generalmente válidas en la aplicación de la mayor parte de las reacciones que han tenido lugar en el sistema hidrotermal, mientras que las últimas, probablemente no son válidas para la mayor parte de las surgencias calientes, y la información que proporcionan se relega a la parte superficial de estos sistemas.