

METODOLOGIA DE EXPLORACION GEOTERMICA

FASES DE RECONOCIMIENTO
Y PREFACTIBILIDAD



I N D I C E

| | PAG. |
|--|------|
| 1. INTRODUCCION | 5 |
| 2. METODOLOGIA PROPUESTA DE EXPLORACION | 8 |
| 2.1 Desarrollo de un Proyecto Geotérmico Tipo | 8 |
| FIGURA 1: Etapas de un Proyecto Geotérmico Completo | 10 |
| 2.2 Estudio de Reconocimiento | 11 |
| 2.2.1 Objetivos | 11 |
| 2.2.2 Metodología | 12 |
| 2.2.3 Resultados | 16 |
| 2.2.4 Requerimientos de personal, tiempo y costos | 17 |
| 2.3 Estudio de Prefactibilidad | 18 |
| 2.3.1 Objetivos | 18 |
| 2.3.2 Metodología | 18 |
| 2.3.3 Requerimientos de personal, tiempo y costos | 26 |
| 3. DESCRIPCION DE LOS PRINCIPALES METODOS DE EXPLORACION | 31 |
| 3.1 Exploración Geológica en Areas Volcánicas | 31 |
| 3.1.1 Fuentes de calor | 31 |
| 3.1.2 El reservorio | 34 |
| 3.1.3 La cobertura | 35 |
| 3.1.4 Manifestaciones superficiales | 35 |
| 3.1.5 Cráteres de explosión freática (hidrotermal) | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2 | Geoquímica | 36 |
| 3.2.1 | Esquema del programa y metodología | 38 |
| 3.2.2 | Técnicas | 40 |
| 3.2.3 | Costos, equipo y personal | 45 |
| | FIGURA 2: Diagrama del Programa Geoquímico | 47 |
| 3.3 | Geofísica | 48 |
| 3.3.1 | Métodos de exploración geofísica | 48 |
| 3.3.2 | Consideraciones finales | 51 |
| | NOMINA DE PARTICIPANTES ASISTENTES AL SEMINARIO SOBRE EXPLORACION GEOTERMICA | 53 |

1. INTRODUCCION

Consecuente con las observaciones y recomendaciones que manifestó la VIII Reunión de Ministros de la OLADE, efectuada en Quito, Ecuador, del 5 al 8 de septiembre pasado, la Secretaría Permanente pone especial énfasis en una nueva fuente alternativa de energía que presenta una alta probabilidad de satisfacción energética en nuestra Región a un mediano plazo: la Geotermia.

El Convenio Constitutivo de la OLADE, firmado en Lima, Perú, el 2 de noviembre de 1973, contempla como objetivos fundamentales de la Organización Latinoamericana de Energía, la promoción, coordinación y orientación, a los Estados Miembros, respecto a nuevas fuentes de energía de acuerdo a los términos contenidos en su Capítulo II; acorde con este Convenio, la Secretaría Permanente considera que la energía geotérmica tiene en América Latina amplias perspectivas en el cuadro del desarrollo de fuentes energéticas no tradicionales.

De acuerdo a lo anterior, la Secretaría Permanente de OLADE elaboró un programa de acción que establece como objetivo el desarrollo planificado de la geotermia en los países latinoamericanos. Para lograrlo, y como un primer paso en su programa, se definieron los lineamientos generales de una metodología para la exploración geotérmica, adaptable a las condiciones y características de cada país, permitiendo a OLADE coordinar esfuerzos para optimizar los recursos técnicos, humanos y financieros con que se cuente en la Región a fin de establecer un continuo intercambio de experiencias y apoyos multilaterales entre los países iniciados en la búsqueda o exploración de este recurso.

Así, la Secretaría Permanente conformó un grupo de expertos que se abocó a la labor de elaborar un documento preliminar sobre una metodología de exploración geotérmica. Participaron en esa labor el Doctor Thomas Casadevall, Geoquímico, quien fuera profesor asistente en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador y actualmente Geoquímico Residente del U.S. Geological Survey en el observatorio vulcanológico de Hawaii; el Ingeniero Salvador García Durán, Geofísico de la Comisión Federal de Electricidad de México, actual Jefe del Proyecto Geotérmico de Los Humeros en el Estado de Puebla y antiguo Jefe Geofísico del campo de Cerro Prieto; y el Doctor Andrea Merla, Geólogo, quien actualmente es Director de Exploración Geotérmica de AQUATER, empresa filial del Grupo ENI

italiano. El Programa Geotermia de OLADE y los trabajos del grupo de expertos, fueron coordinados por el Ingeniero Gustavo Rodríguez Elizarrás del Departamento Técnico de OLADE.

El documento preliminar se denominó: "Esquema de una Metodología de Exploración Geotérmica", mismo que fue circulado entre los países latinoamericanos y entre algunas instituciones oficiales de otros países y organismos internacionales relacionados con la Geotermia.

Dado el interés demostrado por la iniciativa de OLADE, se organizó un "Seminario sobre Exploración Geotérmica" que permitiera revisar y concluir la validez del documento. Dicho Seminario se realizó en Quito, Ecuador, del 27 al 31 de marzo de 1978 con la concurrencia de diez países latinoamericanos, Estados Unidos e Italia, así como Observadores de instituciones de educación superior y compañías relacionadas a la exploración geotérmica (se anexa lista de participantes).

El programa geotérmico de OLADE, desde su inicio, contó con el valioso apoyo del Instituto Italo-Latino Americano (IILA), quien facilitó la presencia del Doctor Andrea Merla en el grupo de expertos mencionado. Asimismo, el IILA coauspició el Seminario. Por estas razones OLADE se congratula en haber unido sus esfuerzos con el Instituto Italo-Latino Americano para el buen inicio de su programa y especialmente por el Acuerdo de Cooperación firmado entre las dos Organizaciones, hecho que prevé una acción conjunta en las áreas comunes del campo energético.

Dadas las posibilidades reales que la Geotermia presenta para los países del área andina como una fuente sustitutiva de energía, la Corporación Andina de Fomento (CAF) se sumó a coauspiciar el Seminario.

Por otro lado, la experiencia que han adquirido sobre la materia, y como un soporte más a lograr la integración energética latinoamericana, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicanos (PEMEX) contribuyeron a coauspiciar el Seminario.

El principal resultado de dicha reunión es el presente trabajo y en él se propone:

- delinear el desarrollo de un proyecto geotérmico tipo;

- describir la metodología que puede ser aplicada durante las distintas fases de investigación de superficie;
- presentar una evaluación preliminar de los recursos humanos y financieros requeridos en un proyecto geotérmico tipo para alcanzar la fase de exploración profunda y ubicar en el tiempo las distintas fases de proyecto.

Por consiguiente, este trabajo pretende constituir una base de referencia para el planteamiento de proyectos geotérmicos específicos y orientar su desarrollo durante las primeras fases de actividad, utilizando en forma óptima, y prioritariamente, los recursos técnicos propios de los países.

Es importante destacar que la atención prestada a la geotermia por la Secretaría Permanente de la OLADE, está basada en esquemas técnico-económicos que pueden adecuarse a cualquier país de la Región y que de llevarse a cabo, siguiendo programas como el presente, podrán servirle en la búsqueda y captación de fondos que, manejados por OLADE, aseguren el inicio de nuevos proyectos geotérmicos o la intensificación y apoyo de los actualmente en curso.

Por último, OLADE quiere expresar su agradecimiento a los expertos mencionados que formaron el Grupo Geotérmico OLADE y lo extiende en forma especial a sus respectivas instituciones, por la cooperación brindada al aceptar la ausencia temporal de sus técnicos sin más beneficio que la experiencia adquirida por ellos.

La Secretaría Permanente reconoce el esfuerzo realizado por el personal administrativo que asistió esta parte del programa y en forma especial a la señora Elvia Ortega de Andrade, quien llevó la carga de mecanografía en borradores y documento final.

Quito, abril 1978

2. METODOLOGIA PROPUESTA DE EXPLORACION

La metodología de exploración que se propone, da una idea general de lo que es un proyecto geotérmico tipo, los métodos exploratorios a utilizarse y el personal necesario; todo ello, para cada una de sus fases y, finalmente, el orden de las inversiones requeridas. La metodología propuesta es resultado de la revisión de una cierta cantidad de proyectos de exploración geotérmica, terminados o en ejecución, en las áreas de volcanismo reciente en México, Italia y varios países latinoamericanos, y está de acuerdo con los progresos científicos más avanzados en técnicas de exploración geotérmica.

Este trabajo tiene como principal objetivo el orientar a los países en donde la exploración geotérmica está en sus primeras etapas por lo que se pone un énfasis particular en las herramientas de exploración de bajo costo; además, se destaca la importancia de los estudios completos de reconocimiento. En la definición de la secuencia de exploración se ha hecho un esfuerzo para minimizar, en las primeras etapas, el empleo intensivo de métodos que requieran fuertes inversiones.

Ante la inexistencia de un "método universal", capaz de resolver los problemas relacionados con las distintas fases de exploración y permitir automáticamente la identificación de un campo geotérmico, la elaboración de una metodología tiene su aspecto más delicado en la selección y combinación de las técnicas que tiendan a alcanzar los objetivos particulares de cada fase de investigación tomando en cuenta las situaciones particulares de cada proyecto. En efecto, la amplia variedad de condiciones locales posibles, puede exigir cambios sustanciales en la secuencia y/o en las características del uso de las técnicas de exploración propuesta. En la evaluación de los requerimientos de tiempo y de inversión, se han tomado en cuenta variables como: el tamaño del área de prospección, la disponibilidad local de personal, apoyos logísticos y las condiciones geográficas. De hecho, la filosofía de exploración aquí propuesta se enfoca al medio ambiente geológico de América Latina y el Caribe.

2.1 Desarrollo de un Proyecto Geotérmico Tipo

Una primera aproximación a la localización de objetivos de interés geotérmico son las márgenes de las placas litosféricas, caracterizadas por una actividad

tectónica y magmática reciente (v.g.: el sistema andino, la cordillera centroamericana, el sector del Caribe, etc.)

Sin embargo, el simple hecho de que un país o región pertenezca geográficamente a estas porciones de continentes, no garantiza el hallazgo, "a priori", de campos geotérmicos con interés industrial. Por consiguiente, para poder desarrollar un proyecto geotérmico en regiones geológicamente poco estudiadas, será necesario iniciar las actividades de exploración con un Estudio de Reconocimiento en áreas que pueden variar entre 10 mil y 100 mil kilómetros cuadrados.

Este estudio primario permitirá formular las primeras hipótesis de trabajo así como seleccionar zonas preferenciales, cuya extensión quede comprendida entre 500 y 2000 km², permitiendo con ello articular más fácilmente el desarrollo de un proyecto geotérmico.

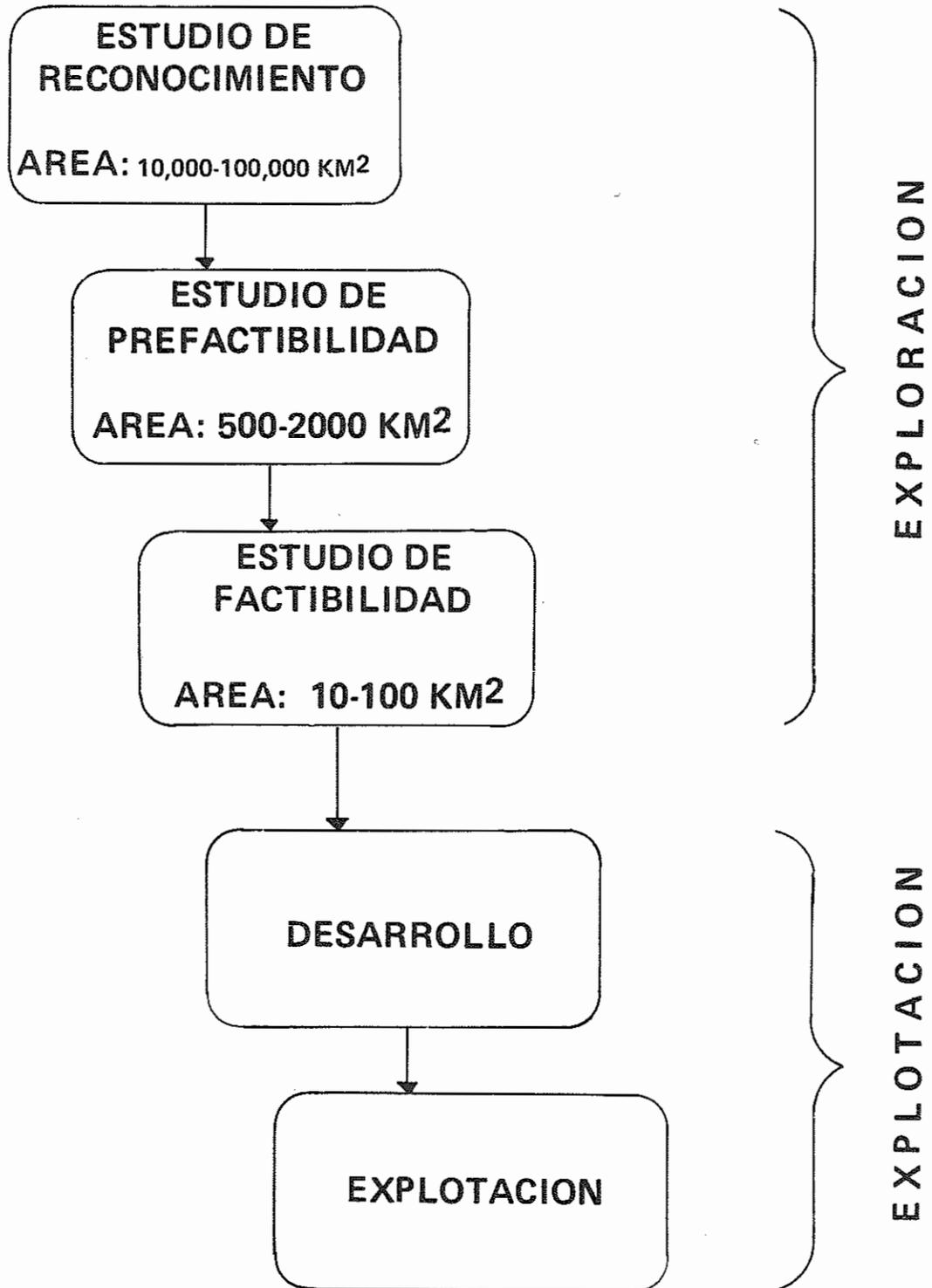
En general, un proyecto geotérmico tipo se compone de dos partes principales (fig. No. 1): la primera tiene un carácter prevalentemente de alto riesgo, asociado a la exploración de cualquier mineral o energético y su objetivo es la identificación del "yacimiento" ("campo geotérmico"), incluyendo un estudio de su posible utilización; la segunda, es de tipo mixto (de riesgo exploratorio, tecnológico y energético) y concierne al desarrollo y exploración del yacimiento. La primera parte comporta notables niveles de riesgo económico y debe ser enfrentada con inversiones progresivamente crecientes; sin embargo constituye un conjunto de poco monto según se verá más adelante en las estimaciones de inversión necesaria; la segunda parte, por el contrario, implica riesgos menores pero requiere de inversiones más elevadas.

Desde el punto de vista práctico, se ha convenido articular el proyecto geotérmico tipo en cinco etapas distintas, de las cuales las tres primeras: 1) estudio de reconocimiento; 2) estudio de prefactibilidad; y 3) estudio de factibilidad, se refieren a la parte exploratoria del proyecto; las otras dos: 4) desarrollo y 5) explotación, se orientan a la producción sistemática del fluido endógeno, a su utilización industrial y a los problemas de gestión del campo.

La representación esquemática del desarrollo de un proyecto geotérmico tipo está indicada en el diagrama de flujo de la fig. No. 1.

FIGURA 1

ETAPAS DE UN PROYECTO GEOTERMICO COMPLETO



La experiencia acumulada a la fecha ha demostrado que las dimensiones promedio de un "campo" se hallan comprendidas entre 10 y 100 km². Si como se ha dicho, el proyecto geotérmico se ubica en una región del orden de 10,000 - 100,000 km², la localización del posible campo requerirá de etapas de investigación intermedia que permitan: primero, la delimitación "del área de interés" (500 - 2000 km²) en base al estudio de reconocimiento y, posteriormente, la individualización de una o más áreas prometedoras no mayores de 100 km² donde se ubicarán las localizaciones de los pozos exploratorios profundos que deban perforarse.

De acuerdo a lo anterior, el estudio de prefactibilidad tendrá como objetivo principal la localización de los puntos donde se realizarán las perforaciones profundas y debe ser subdividido en distintas fases, mismas que deberán realizarse en tiempos razonables ya que las inversiones crecen progresivamente a medida que progresa el proyecto. Por eso, es preciso empezar con estudios e investigaciones de carácter regional que impliquen costos relativamente bajos, dejando la prospección e investigación de mayor detalle sólo para las áreas de mayor interés y que, como se dice, normalmente se encuentran entre 500 a 2000 km².

Este criterio, permite interpretar, periódicamente y de manera integrada, los resultados de las investigaciones y descartar las porciones de territorio poco favorables, así mismo, valorar la oportunidad de pasar a la siguiente etapa de trabajo.

2.2 Estudio de Reconocimiento

Consistirá en la valoración, con finalidades geotérmicas, de toda la información disponible acompañada de una serie de investigaciones preliminares a escala regional. Permitirá fijar las primeras hipótesis de trabajo, seleccionar una o más zonas preferenciales y plantear de manera concreta las líneas de acción de las fases sucesivas del proyecto (prefactibilidad y factibilidad).

2.2.1 Objetivos

- Evaluación preliminar de las posibilidades geotérmicas a nivel

nacional o regional.

- Selección de áreas de interés.
- Determinación de un esquema geotérmico preliminar y programa subsecuente de exploración detallada en cada área.

Estos objetivos representan los antecedentes técnicos que, junto con consideraciones socio-económicas y políticas, constituirán las bases para la toma de las siguientes decisiones:

- a) Qué prioridad se deberá dar, a nivel nacional o regional, a la geotermia en relación con fuentes energéticas alternantes (ejemplo: hidroelectricidad, combustibles fósiles. etc.)
- b) Definir áreas de máxima prioridad en la planeación de exploraciones futuras, tomando en consideración tanto el factor técnico (indicaciones del potencial geotérmico resultante del Estudio de Reconocimiento), como el factor económico y social. Algunos factores locales podrían jugar un importante papel en esta etapa; es el caso del posible aprovechamiento de energía geotérmica en una área en donde no hay disponibilidad de otras fuentes energéticas para generar, en esa zona, otras actividades que necesitan disponibilidad local de energía a bajo precio (ejemplo: la minería o cierto tipo de industrias, etc.)
- c) Definir la cantidad de inversiones y la estructura técnica necesaria para evaluar el potencial geotérmico del área que se ha considerado como la de mayor prioridad.

2.2.2. Metodología

Hablando en términos generales, un estudio de reconocimiento a nivel nacional o regional podría ser resumido de la siguiente manera:

específica relacionada con:

- 1) la posible presencia de una anomalía térmica a niveles superficiales de la corteza terrestre;
- 2) las condiciones hidrogeológicas regionales; y,
- 3) la naturaleza de las manifestaciones termales.

En regiones volcánicas será muy importante concentrar las observaciones geológicas a los siguientes puntos:

- Identificar las áreas en donde existe una concentración de episodios volcánicos recientes. Esta concentración es una clara evidencia de la persistencia de una importante anomalía térmica en el subsuelo.
- Evaluar la cantidad relativa de productos volcánicos ácidos que sean producidos por diferenciación de magmas básicos ó por anatesis.
- Definir, a nivel regional, las relaciones existentes entre las estructuras volcánicas y la tectónica regional.
- Investigar la posible presencia de cráteres de explosión freática.
- Recolectar muestras, en el mayor número posible, de tipos litológicos para trabajos analíticos subsecuentes. A este nivel, el trabajo petrográfico estará limitado, en la mayoría de las muestras, a estudios de láminas delgadas.
- Recolectar muestras de los xenolitos de los piroclásticos para estudios en láminas delgadas.
- Determinar la edad absoluta en muestras seleccionadas.
- Estudiar en forma preliminar todas las posibles formaciones;

Fase 1.— Evaluación de toda la información relativa existente

En esta etapa se recolectará la documentación básica. Esta documentación incluye:

- Mapas geológicos, a escala regional y detallados.
- Síntesis geológica regional, incluyendo estratigrafía, geología estructural, historia volcánica, etc.;
- Imágenes desde satélite y/o aerofotografía.
- Mapas topográficos, tanto detallados como regionales;
- Información sobre la presencia y características de las fuentes termales y manifestaciones hidrotermales;
- Informaciones recabadas en pozos que hayan perforado para otros fines (petróleo, agua, etc.);
- Todos los datos geofísicos disponibles;
- Información sobre hidrología y meteorología.

La evaluación de esta información permitirá la esquematización de las provincias geotérmicas (áreas geológicamente homogéneas) y la definición de las áreas en donde se llevará a cabo la siguiente fase (investigación de campo).

Fase II.— Investigación de campo y análisis de laboratorio.

Sobre la base de los resultados de la Fase I, se programará una investigación de reconocimiento de campo.

El objeto principal de esta investigación será recolectar información

cobertura y reservorio.

En lo que se refiere al trabajo geoquímico e hidrogeológico de campo, se deberán muestrear un número representativo de las aguas de la zona en reconocimiento (manantiales fríos o termales, aguas superficiales o de pozos).

El programa a desarrollarse en esta etapa deberá elegirse dependiendo de la disponibilidad de: 1) personal; 2) financiamiento; 3) equipo; y 4) tiempo. Dependiendo de la disponibilidad sobre los cuatro puntos anteriores, se pueden definir dos programas: uno que llamaremos mínimo y otro que sería el óptimo, ambos buscando cumplir con los objetivos del estudio de reconocimiento. Estos son:

| | | MINIMO | OPTIMO |
|-------------------|-------------|---|---|
| DATOS REQUERIDOS: | Campo | ToC pH estimación visual de flujo recolección de muestras | ToC pH Cl ⁻ o conductividad estimación visual de flujo recolección de muestras |
| PERSONAL: | Laboratorio | K; Na; Ca; Mg; Cl; SO ₄ ; SiO ₂ | K; Na; Ca; Mg; Cl; SO ₄ ; NH ₄ ; SiO ₂ (diluído) |
| EQUIPO: | Campo | Personal no necesariamente especializado en química Termómetro Papel pH Frascos para muestras y sistema de recolección | Persona (s) entrenada (s) en química de campo Termómetro Papel pH o medidor de pH Papel Cl ⁻ o medidor de conductividad Frascos para muestras y sistema de recolección |

Los análisis químicos permitirán el cálculo de temperaturas del subsuelo mediante la aplicación de geotermómetros tales como SiO₂, K/NA/Ca, etc. Las estimaciones de flujo (l/seg ó l/min) se requieren para la aplicación de modelos para determinar el posible grado de mezcla entre fluidos termales y otras aguas del suelo y del subsuelo.

2.2.3 Resultados

Los trabajos de la Fase I y II, en combinación con la evaluación subsecuente de toda la información, debe dar como resultado lo siguiente:

- a) Definición de las principales provincias geotérmicas. (ejemplo: áreas de interés geotérmico relacionadas con volcanismo reciente o intrusiones magmáticas, áreas de gradiente normal).
- b) Selección de áreas de interés, indicando la probable existencia de fluidos de alta entalpía en el subsuelo, esto es, áreas en las cuales podría ser factible la explotación de energía geotérmica con las técnicas aplicadas actualmente.

También se indicarán las áreas en donde únicamente se podrán encontrar fluidos de baja entalpía. Su aprovechamiento puede ser: energético por sistemas binarios o, no energético en campos de agricultura, industrial y residencial.

El área de las zonas seleccionadas deberán tener una extensión del rango de 500 a 2000 km².

- c) Definición de escala de prioridades. Deberán ser prioritarias aquellas áreas que presenten condiciones geológicas más favorables para la existencia de un campo geotérmico a profundidad explotable económicamente. Esta escala de prioridades deberá ser definida sobre la base de consideraciones "técnicas".
- d) Definición en cada área de un "esquema" geotérmico preliminar. Este esquema tomará en consideración los aspectos relativos a la presencia de una anomalía térmica superficial, y a las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona y,
- e) Definición de un programa detallado de exploración (Estudio de Prefactibilidad)

Se esquematizará un programa de las investigaciones detalladas necesarias para definir mejor el modelo geotérmico de cada área. El objetivo de este programa será la localización de sitios para perforar pozos profundos de exploración en diámetros adecuados para pruebas de producción.

2.2.4 Requerimientos de personal, tiempo y costos

La parte inicial de la exploración geotérmica de cualquier región, requiere personal altamente experimentado, ya que es durante esta etapa que se establecen los lineamientos de la exploración futura.

La recolección de información (Fase I), podría ser realizada por personal técnico no especialmente entrenado en geotermia.

La evaluación de la documentación recolectada deberá, sin embargo, ser realizada por personal técnico altamente calificado y experimentado en exploración geotérmica. Este personal será, por lo tanto, responsable de la Fase II del trabajo y estará formado por un geólogo estructural, un vulcanólogo, un geoquímico y un geohidrólogo.

El tiempo que se requiere para llevar a cabo la Fase I y la Fase II, puede variar de acuerdo con el tamaño de la región a ser investigada y la cantidad de información disponible.

En promedio, para el reconocimiento de una área de 10.000 a 100.000 km², no debe exceder del rango 9 a 16 meses, considerando de 2 a 4 meses el tiempo para la recolección y evaluación de la información; 2 a 3 meses para reconocimientos de campo; 1 a 3 meses para los análisis de laboratorio y 4 a 6 meses para la evaluación de los resultados y preparación del informe final de reconocimiento.

El costo de un estudio de reconocimiento, considerando las extensiones mencionadas, puede estar comprendido entre un mínimo de 100,000.00 US dólares y un máximo de 250,000.00 US dólares. Es-

tas estimaciones están sujetas a múltiples factores que se mencionarán más detalladamente en el capítulo de los costos de los estudios de prefactibilidad.

2.3 Estudio de Prefactibilidad

Tiene como objeto principal identificar las áreas más prometedoras, en las cuales el riesgo sea suficientemente reducido a modo que pueda aconsejarse pasar de la exploración de superficie a la exploración profunda. Esta fase contempla la evaluación preliminar de los recursos posibles.

2.3.1 Objetivos

- a) Definir el modelo geotérmico preliminar del área seleccionada.

El "modelo geotérmico" de una área será definido cuando haya disponibilidad de información detallada referente a: 1) la presencia y origen de las anomalías térmicas; 2) las características de las formaciones de cobertura o roca sello; 3) el modelo de circulación general de agua; y 4) el tipo y características del "reservorio".

- b) Localización de lugar(es) para perforación profunda exploratoria en diámetros para pruebas de producción.

Un modelo tri-dimensional de esta naturaleza; permitirá planificar un programa de perforación adecuado, dirigido a probar la validez del modelo.

2.3.2 Metodología

El programa detallado de exploración de una área dada, cuyas principales características geotérmicas fueron ya esquematizadas durante el Estudio de Reconocimiento, consistirá generalmente de investigaciones de costo variable. El énfasis dado a la exploración de bajo costo busca, como resultado, un máximo de efectividad en la inversión

de las investigaciones de mayor costo.

A. Geología - Hidrogeología - Geoquímica

A-1) Geología y Vulcanología

El trabajo generalmente comenzará con interpretación aerofotogeológica, tendiente a la definición de fallas, mapeo de estructuras volcánicas, definición de relaciones vulcano-tectónicas y sistemas de fallas relacionadas con posibles intrusiones sepultas, y a la integración de mapas geológicos existentes.

El segundo paso será un levantamiento geológico y vulcanológico. Sus objetivos principales serán:

- a) Investigar la presencia de una anomalía térmica a niveles superficiales de la corteza terrestre. Para este propósito, se tomarán muestras representativas de las secuencias volcánicas recientes, buscando obtener información sobre la presencia, a niveles superficiales, de una anomalía térmica (naturaleza de las rocas volcánicas, presencia de series de diferenciación, etc.) y estar así, en posibilidad de determinar edades absolutas. Se estudiarán todas las áreas hidrotermales, tanto fósiles como activas.

Se hará un mapeo detallado de todas las estructuras volcánicas (volcanes centrales, domos, cráteres de explosión, cráteres de explosión freáticos, extensiones de lavas fisulares y piroclásticos). También se llevará a cabo un estudio de características morfológicas.

- b) Identificación de las formaciones de cobertura y evaluación de su efectividad. Esto incluye el mapeo y la

toma de muestras de todas las formaciones que presenten características adecuadas de cobertura, tanto de origen primario (arcillas, etc.), como también debido al autosellamiento por procesos de alteración hidrotermal. En zonas volcánicas se dará un mayor énfasis a la búsqueda de cráteres de explosión freáticos. Su presencia muestra la existencia de una cobertura efectiva.

- c) Recolectar información sobre la presencia de posibles "reservorios" geotérmicos

Se deberán estudiar todas las evidencias existentes de la presencia de un "reservorio" a profundidad rentable.

En las zonas volcánicas, el muestreo y estudio de xenolitos producidos por erupciones explosivas, podrán proveer información sobre la naturaleza de las rocas localizadas debajo de la superficie de la cobertura volcánica.

En aquellos casos en que sea posible, esta investigación, de bajo costo, permitirá conocer la litología del reservorio y la temperatura y naturaleza de los fluidos circulantes. En todos los casos, estos datos proveen información de la litología del subsuelo que son de utilidad para otro tipo de investigaciones: hidrogeología, geoquímica, etc.

Finalmente, la identificación y mapeo de fallas recientes es muy importante, ya que las fallas activas frecuentemente representan buenos objetivos de exploración debido a su permeabilidad por fracturas. Las fallas antiguas, a diferencia, pueden estar selladas completamente por procesos hidrotermales.

En los países tropicales, en donde ocurre una rápida y fuerte intemperización de rocas y donde existe una espesa capa de vegetación, los datos geológicos pueden ser, a veces, difíciles de obtener con las investigaciones superficiales o bien, limitarse a zonas reducidas las cuales no son fácilmente correlacionables.

En tales casos se debe poner énfasis en los siguientes tipos de investigación:

- I. Observaciones morfológicas realizadas con ayuda de aerofotografías y análisis de imágenes de satélite. En muchos casos, simples observaciones morfológicas proporcionan información útil sobre la tectónica del área, estructuras volcánicas, edad del vulcanismo, etc.
- II. La identificación de fallas recientes puede ser la de mayor importancia en estas regiones ya que la rápida intemperización de los productos volcánicos podría reducir sustancialmente su permeabilidad primaria. Por tanto, en estas regiones las zonas fracturadas serán el objetivo de exploración geotérmica.
- III. La Geofísica aérea con sensores remotos (SLAR) podrían aplicarse útilmente en estas regiones; el grado de aplicación dependerá de consideraciones económicas y situaciones locales.

A-2) Geoquímica e Hidrogeología

Los objetivos principales del programa hidrogeológico-geoquímico durante los estudios de prefactibilidad, son los siguientes:

- I. Definir el marco geoquímico regional para la mejor

comprensión de los patrones de circulación de agua.

- II. Tratar de definir la presencia de un sistema geotérmico en el subsuelo, empleando geotermómetros químicos e isotópicos o detectando anomalías en las manifestaciones de fugas existentes.

El programa hidrogeológico-geoquímico se compone de tres actividades interdependientes entre sí y son:

a) Operaciones de campo

- Visita a todos los puntos de descarga de agua, tales como vertientes frías o calientes, pozos y drenajes.
- Descripción detallada de cada punto, incluyendo cálculo exacto del flujo de agua y descripción de la zona alterada adyacente al punto de origen de la descarga.
- Muestreo del agua y, si fuere pertinente, de los gases, siempre en envases adecuados.
- Determinación de Campo de: $T^{\circ}C$, pH, Cl^{-} , conductividad y posiblemente Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{-} , NH_4^{+} . Se requiere un análisis de campo, o un acondicionamiento adecuado de la muestra, para un análisis futuro, ya que con el tiempo pueden ocurrir cambios importantes en la química de los componentes. El análisis de campo debe hacerse con el nivel de calidad del análisis de laboratorio.
- Muestreo de los sublimados en las vertientes termales.

- Según el medio ambiente geológico, un análisis de gases (He, Hg, CO₂) puede indicar directamente la presencia de una anomalía térmica en el subsuelo.

b) Análisis de laboratorio

- El trabajo de análisis de laboratorio depende de la naturaleza del medio ambiente geológico, normalmente requiere la determinación de 12 a 18 componentes. La determinación de los sublimados puede hacerse en forma química o por medio de Rayos X.

c) Interpretación

- El procesamiento de los datos analíticos dará como resultados la identificación de los principales tipos químicos de agua y mezclas existentes; una interpretación del origen de las aguas termales; el levantamiento de mapas de las anomalías de fuga y el cálculo de la temperatura del reservorio. Este procesamiento de datos e interpretación puede facilitarse haciendo el análisis con computadora, cuando sea posible contar con ella.

B. Geofísica y Pozos Someros

B-1) Geofísica

El empleo de técnicas de prospección geofísica debe estar enfocado a tres objetivos principales:

- I. Determinar las condiciones geológico-estructurales regionales de la zona donde se encuentran situados los

recursos geotérmicos.

II. Localización y demarcación de anomalías térmicas.

III. Determinar condiciones estructurales particulares.

En el primer punto, un estudio de gravimetría, y eventualmente uno de magnetometría o aeromagnetometría, constituye la herramienta más adecuada para delinear las mayores estructuras geológicas de la zona. Estas técnicas de prospección geofísica pueden ser realizadas durante el desarrollo de los estudios del punto A, pero cuidando que su inicio sea a partir del momento en que la situación geológica más relevante sea conocida.

En el segundo punto, los métodos eléctricos tradicionales, mapas y/o perfiles geoelectricos de resistividad, se pueden utilizar para analizar los contrastes de resistividad asociados a posibles zonas de temperaturas anómalas. Un estudio de semidetalle, regional o parcialmente regional, se puede programar al tener un adecuado conocimiento de la situación geológica de la zona; en base a este estudio se programará un levantamiento más detallado.

El empleo de otras técnicas (eléctricas, electromagnéticas, ruido sísmico, etc.) se deberán considerar por ahora como técnicas de experimentación, pero sin descartar su utilización en el futuro.

En el último punto las técnicas geoelectricas (sondeos eléctricos verticales), sísmica activa (reflexión o refracción), sísmica pasiva (microtemblores) y otras, se pueden utilizar para determinar situaciones geológicas particulares como: espesor de cobertura, profundidad de capas geo-

lógicas particulares, determinación de fallas activas, etc. La programación de utilización de cualquiera de estas técnicas debe estar condicionada al problema específico a resolver y a la relación costo/precisión que se persiga.

B-2) Perforaciones someras de múltiple propósito

El programa de perforación de pozos superficiales no se decidirá hasta haber logrado un conocimiento suficiente de las condiciones geológicas e hidrogeológicas. El número, ubicación y profundidad de los pozos de prueba serán los necesarios para recoger la máxima información con el mínimo de inversión. Estos pozos proveerán elementos decisivos para la definición del modelo geotérmico de la zona.

La profundidad de estos pozos de pequeño diámetro se programará según las condiciones geohidrológicas; deben alcanzar, e incluso penetrar, la capa impermeable del reservorio de interés si el objetivo es calcular la temperatura del reservorio. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la determinación de gradientes geotérmicos en base a la suposición de que el proceso es puramente conductivo ha ocasionado numerosos fracasos, porque la interpretación de los gradientes térmicos poco profundos son frecuentemente erróneos.

El muestreo de agua y gas en horizontes no disturbados, las correlaciones estructurales y, naturalmente, las predicciones de temperatura a profundidades de interés, son ejemplos de algunos de los objetivos de estas perforaciones.

En estas circunstancias, es difícil establecer las profundidades más apropiadas; la decisión, depende de una correcta evaluación de la información que se pretende obtener frente al costo total de la perforación.

Generalmente, los objetivos de estos pozos son uno o más de los siguientes:

- Ejecutar una serie de medidas de temperatura a fin de calcular el gradiente térmico y predecir la temperatura en profundidad.
- Recolectar muestras de rocas para medidas de conductividad (cálculo de flujo calorífico).
- Recolectar muestras de los fluidos que eventualmente se encuentren, a fin de determinar posibles convectivos que alterarían el objetivo anterior, y efectuar análisis químicos para integrarlos al estudio geoquímico superficial.
- Mediciones de resistividad eléctrica a través de la sección perforada, para correlacionar las investigaciones de resistividad eléctrica superficial.
- Estudio de la secuencia estratigráfica.

Se debe enfatizar que solamente un conocimiento detallado de las condiciones superficiales geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas permitirá realizar una estimación y extrapolación del gradiente geotérmico, de las temperaturas y de las posibilidades de producción.

2.3.3 Requerimientos de personal, tiempos y costos

El número de personal técnico requerido para el cumplimiento de la fase depende de la situación local. Sin embargo, es posible dar una idea general con relación a la organización y el tiempo requerido, tomando en consideración una área entre 500 a 2000 km² y la existencia de información básica como mapas topográficos detallados, mapas geológicos y fotografías aéreas.

A. Personal

El siguiente es un resumen esquemático del personal requerido para llevar a cabo un estudio de prefactibilidad en tal magnitud de área.

— Geología y Vulcanología

| | |
|---------------------------------|--|
| Interpretación fotogeológica | 1 geólogo fotointérprete 1 técnico fotointérprete |
| Trabajo de campo | 1 geólogo 1 vulcanólogo |
| Análisis de laboratorio | 1 petrógrafo |
| Elaboración de datos e informes | 1 geólogo 1 vulcanólogo |
| Supervisión | 1 geólogo, experto en exploración geotérmica |

Hidrogeología y geoquímica

| | |
|---------------------------------|---|
| Trabajo de campo | 1 hidrogeólogo 1 geoquímico 1 técnico químico |
| Análisis de laboratorio | 1 geoquímico 1 técnico químico |
| Elaboración de datos e informes | 1 geoquímico 1 hidrogeólogo 1 calculista |
| Supervisión | 1 geoquímico experto en exploración geotérmica |

– Geofísica

Independientemente de que los estudios geofísicos sean realizados por administración o por medio de contratistas, el proyecto deberá contar con un geofísico supervisor, el cual será el responsable del programa geofísico a realizarse, así como de su ejecución e interpretación.

– Pozos someros

En este punto se empleará un contratista para la perforación a menos que se disponga de equipo propio. Considerando la utilización de un contratista, el proyecto deberá contar con el personal necesario para la supervisión de la perforación, las mediciones y los análisis de datos; este personal será:

| | |
|--------------|--------------|
| En los pozos | 1 geólogo |
| | 1 geoquímico |
| | 1 geofísico |

– Elaboración del informe final de prefactibilidad

Este trabajo será realizado por todo el personal que intervino en los trabajos de campo e informes parciales, incluyendo un ingeniero de perforación. La supervisión de expertos geotérmicos con experiencia comprobada en exploración es necesaria para lograr un mejor análisis.

B. Tiempos

Los tiempos técnicos, considerando los promedios alcanzados hasta ahora en la exploración geotérmica de algunos países latinoamericanos, se resumen en la siguiente manera:

| | |
|---|-------------|
| Geología – Vulcanología (trabajo de campo, análisis de laboratorio, informe) | 9 –15 meses |
| Geoquímica – Hidrogeoquímica (trabajo de campo, análisis de laboratorio, informe) | 9 –15 meses |
| Geofísica (trabajo de campo, interpretación, informe) | 9 –15 meses |
| Perforaciones someras* (perforación, mediciones, informe) | 7 –16 meses |
| Informe final | 4 –6 meses |

El tiempo total de desarrollo de un estudio de prefactibilidad, considerando que algunas de las actividades antes mencionadas se puedan llevar paralelamente, varía entre 20-30 meses. Sin embargo, estos tiempos, totales y parciales, se podrán reducir con una optimización de la metodología y del personal utilizado, que es en sí, una de las principales intenciones de este trabajo.

C. Costos

Los costos de un programa de exploración como el indicado en los capítulos anteriores, podrán variar de acuerdo a varios factores:

- El volumen de información geológica e hidrogeológica existente;
- La existencia de personal local entrenado y experto;
- Las características geográficas y geológicas de la región que deberá investigarse;

* Suma promedio: 2000 m. de perforación en múltiples pozos.

- La existencia local de instalaciones de laboratorio y computación.

Un cálculo de costos es, por tanto, muy difícil de realizar, debido a las grandes variaciones de los factores arriba indicados. Sin embargo, se tratará de definir la escala de inversiones necesarias. La filosofía que se seguirá al estimar la inversión necesaria se basa en dos principios:

- a) Se debe poner énfasis en instrumentos exploratorios, tales como vulcanología y geoquímica. Estos métodos proporcionan información muy importante y limitan el uso de técnicas más caras.
- b) Cuando se haya logrado una cierta etapa de exploración, no habrá necesidad de mayores inversiones para progresar en la comprensión del sistema geotérmico. Es en esta etapa que se debe tomar la decisión de comenzar la perforación profunda.

En esta estimación también se consideran variables tales como: disponibilidad de personal local experto, número de miembros de personal local, número de miembros de personal externo y, en cierto grado, condiciones geográficas.

Con las consideraciones dadas, el costo estimado, total, del estudio de prefactibilidad, considerando una área entre 500 a 2000 km², sería:

| | |
|-----------|----------------|
| mínimo de | 800.000 US\$ |
| máximo de | 1.600.000 US\$ |

Una vez terminada la fase de prefactibilidad, y si los resultados determinan continuar los trabajos, se pasará a la última fase de la etapa de exploración: el estudio de factibilidad.

La fase de factibilidad se puede definir como el estudio que busca la localización física de un campo geotérmico, su consecuente evaluación de reservas extraíbles y la evaluación preliminar de los recursos disponibles; el estudio del fluido y sus posibles esquemas de utilización energética y/u otras, así como la eventual instalación de una planta piloto o unidad industrial.

Este estudio, como parte de un proyecto geotérmico, comprende los primeros sondeos de exploración, los estudios que permitan definir las características de producción y utilización del fluido, los estudios económicos, así como el diseño de una planta de generación.

En el presente documento se analizan únicamente las dos primeras etapas de un proyecto geotérmico tipo, o sea, los estudios de reconocimiento y de pre-factibilidad. El análisis de la fase de factibilidad es motivo de otro trabajo.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES METODOS DE EXPLORACION

3.1 Exploración Geológica en Areas Volcánicas

Un campo geotérmico susceptible de aprovechamiento, ya sea para producción de vapor con fines de generación eléctrica o bien, de agua caliente (baja entalpia) para fines no energéticos, debe tener como principales características las siguientes:

Una anomalía térmica.

Un reservorio constituido por rocas permeables dentro del cual circule el fluido geotérmico. El reservorio debe estar a profundidades que haga económica su explotación.

Una cobertura impermeable sobre el reservorio que impida la pérdida de calor por convección de fluidos hacia la superficie.

3.1.1 Fuentes de calor

En muchas regiones volcánicas el calor requerido para la formación

de un sistema geotérmico, localizado cerca de la superficie terrestre, puede ser suministrado, esencialmente, por una masa de magma de alta temperatura situada en la corteza terrestre, ya sea como una intrusión en proceso de enfriamiento o bien como una cámara magmática alimentando un volcán. Teóricamente, todas las zonas afectadas por fenómenos volcánicos recientes, son localidades geotérmicas potenciales; sin embargo, las áreas de interés práctico solamente son aquellas donde un gran volumen de magma se encuentra relativamente a poca profundidad (menos de 10 km). Así, áreas en las cuales el magma ha subido directamente y rápidamente desde el manto a través de fisuras, tales como basaltos de meseta, son de menor interés.

También debe considerarse potencial geotérmico, aquellas áreas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental (v.g. magmas ácidos originados dentro de la corteza misma), ó áreas con grandes volcanes centrales relacionados con cámaras magmáticas.

En la exploración preliminar de una región geotérmica, el problema de localizar una anomalía termal, normalmente cercana a la superficie, debe afrontarse con métodos vulcanológicos, estructurales y petrológicos.

Esos métodos, ayudan a distinguir volcanes centrales evaluando su significado en el cuadro estructural regional y estimando su edad con criterios morfológicos o con medidas de edad absoluta usando métodos radiométricos. La presencia de fumarolas activas en el cráter de volcanes centrales es la mejor indicación de la edad reciente del volcán. Sin embargo, el cráter de un volcán activo no puede ser considerado por ahora para una explotación geotérmica.

Estudios petrológicos de lavas y otros productos volcánicos constituyen una ayuda para definir la naturaleza del magma, en particular su grado de acidez y diferenciación. Estos datos son esenciales para evaluar la posible existencia de cámaras magmáticas cercanas a la su-

perficie, las cuales alimentan al volcanismo; además, para estimar si la naturaleza del magma implica la presencia de una anomalía térmica superficial dentro de la corteza terrestre. Esto último, comprende el caso de magmas formados por anatexis de la corteza (v.g., fusión parcial de la corteza superior continental, que es un proceso que requiere fuertes anomalías a profundidad moderada).

La formación de cámaras magmáticas de suficiente capacidad térmica, que permita aumentar el calor de un gran volumen de roca, requiere de condiciones tectónicas favorables, como es el cruce de diferentes fallas o la inclinación de bloques fallados que forman trampas tectónicas apropiadas, donde el magma en ascenso reposa y produce su diferenciación. Por lo tanto, se debe investigar la relación entre estructuras volcánicas y lineamientos tectónicos a fin de reconocer la ocurrencia, a poca profundidad, de cuerpos magmáticos calientes.

Elementos favorables son: la gran persistencia de actividad volcánica a través del tiempo y las frecuentes erupciones de productos fuertemente diferenciados, los cuales requieren para su formación un largo período de estadía del magma en la cámara. En la mayoría de los casos, las cámaras magmáticas son reservorios que alimentan al complejo de volcanes centrales; las estructuras volcánicas se forman alrededor de una chimenea central con varias erupciones de productos de diferente composición, genéticamente conectados unos con otros a través de cristalización fraccional.

En otros casos, solamente los magmas diferenciados, más evolucionados y ligeros, son capaces de llegar hasta la superficie a través de erupciones fisurales de diferente intensidad, formando campos volcánicos con algunos centros monogenéticos (v.g. Campi Flegrei, Italia) o, también, erupciones piroclásticas importantes.

También, el magma puede permanecer a poca profundidad sin producirse volcanismo; sin embargo, estos levantamientos en la corteza superior afectan la tectónica superficial con la formación de "horst"

generalmente interesados con colapsos menores (como en Larderello, Italia) o, sistemas peculiares de fallas radiales o concéntricas.

3.1.2 El reservorio

El reservorio está formado por rocas de alta permeabilidad, con volumen suficiente para asegurar una prolongada explotación. Además, el reservorio debe estar localizado dentro de un sistema hidrológico favorable. La delimitación del reservorio es el problema más difícil de la exploración geológica. La causa principal, es la presencia de extensas coberturas volcánicas superficiales que a menudo impiden el estudio directo del sustrato más profundo. Esto, requiere del conocimiento del marco geológico general; en particular, el de los espesores, profundidad, litología y permeabilidad de las varias unidades estratigráficas que se encuentran debajo de la cobertura volcánica superficial. En muchos casos, los estudios estratigráficos y el levantamiento geológico pueden proveer información importante concerniente al reservorio. También, es muy importante la identificación de áreas de mayor permeabilidad por fracturas, debido al tectonismo, y su modelo de distribución.

A partir del estudio de los xenolitos en las rocas volcánicas se puede obtener importante información. Estos, son muestras de los horizontes litológicos subsuperficiales y su estudio puede también proporcionar evidencias del fenómeno de alteración hidrotermal producida por la circulación de fluidos de alta temperatura.

Los xenolitos de rocas del subsuelo ocurren preferentemente en productos de explosiones volcánicas (ibnimbritas, tefra o tobas). Estos xenolitos se deberán estudiar y muestrear, tanto los alterados como los no alterados. Debe darse especial atención a la observación de la textura de los minerales hidrotermales (en venas, o distribución al azar) y, a los eventuales cambios paragenéticos, con los cuales se puede identificar cambios en las condiciones físico-químicas de la circulación de fluidos.

Finalmente, la evaluación de un reservorio (litología, profundidad, estructura) requiere el uso de métodos geofísicos; uno de los principales objetivos de la exploración geológica es evaluar el mejor método geofísico y aplicarlo en la exploración, basándose siempre en las características geológicas locales.

3.1.3 La cobertura

La cobertura debe estar compuesta de una secuencia impermeable. Puede ser roca sedimentaria con impermeabilidad primaria (arcilla, limo, depósitos lacustres), como en Cerro Prieto, México; Larderello, Italia o; en Wairakei, Nueva Zelandia, o roca impermeabilizada por auto sellamiento (self-sealed), debido a los prolongados efectos de la actividad térmica, como en el caso de los Geysers, USA u Otake, Japón. Para definir dicha cobertura, es necesario conocer la estratigrafía y litología de los horizontes sub-superficiales, este problema puede ser sobre bases puramente geológicas; aunque casi siempre son necesarios los estudios geofísicos para determinar el espesor de la unidad impermeable. La presencia de la secuencia impermeable cerca de la superficie es esencial para determinar la utilidad de pozos someros de gradiente geotérmico en las etapas subsecuentes de la exploración. Estos pozos son útiles únicamente cuando penetran el estrato impermeable, donde la distribución de la temperatura no está alterada por la circulación de agua meteórica o superficial. La perforación será económica solamente si los lechos impermeables están a poca profundidad.

3.1.4 Manifestaciones superficiales

En regiones donde la cobertura está fracturada por fallas, los fluidos del reservorio pueden ascender directamente a la superficie, produciendo varias manifestaciones termales (manantiales calientes y fumarolas). La presencia de tales manifestaciones superficiales es un indicador de la posible existencia de un campo geotérmico. Sin embargo, tales indicaciones no son absolutamente indispensables; pueden existir campos geotérmicos sin dichas manifestaciones geo-

térmicas (Los Humeros, México). También hay emanaciones calientes que no tienen relación con campos geotérmicos de alta entalpía, ya que éstas están relacionadas con una rápida subida, a lo largo de fallas, de agua proveniente desde profundidades en áreas con gradiente geotérmico normal.

El estudio de las manifestaciones superficiales debe realizarse considerando el marco hidrológico general. Por una parte implica el conocimiento de la hidrología de la región (agua meteórica y agua subterránea), así como de las principales estructuras que controlan los sistemas hidrotermales y también de las características estructurales de cada fuente; por otro lado, se requiere de una exploración geoquímica detallada. El estudio geoquímico tiene como finalidad proveer datos para el modelo hidrogeológico y detectar las manifestaciones de fuga del reservorio geotérmico profundo. Se puede obtener también valiosa información de estudios de los sublimados de las fumarolas.

3.1.5 Cráteres de explosión freática (hidrotermal)

Un elemento particularmente significativo de una región geotérmica (no necesariamente volcánica) es la frecuente presencia de cráteres de explosión freática (hidrotermal). Estas estructuras son producidas por la explosión de bolsas de vapor calentado y mantenido bajo presión por una cobertura impermeable. Su presencia indica que todos los elementos básicos de un campo geotérmico (cobertura impermeable, fluidos en profundidad, anomalías de calor) están presentes en la zona afectada por la explosión. Por lo tanto, estas estructuras deben ser cuidadosamente investigadas, estimando su edad.

3.2 Geoquímica

Un área geotérmica puede ser considerada como un sistema químico de alta temperatura. Los componentes principales de este sistema son: la fase de fluidos (agua, vapor, gases), y una fase sólida compleja, heterogénea, (roca). Dos clases de sistemas geotérmicos han sido reconocidos basándose en el es-

tado físico de la fase del fluido que domina el control de presión: a) Sistemas de agua caliente, en los cuales el agua es la fase de fluido de control del gradiente de presión; y b) Sistemas de vapor dominante, en los cuales el agua y el vapor normalmente co-existen en el "reservorio", siendo el vapor la fase continua controladora de la presión.

Los sistemas de vapor dominante son óptimos para la generación de energía eléctrica; desafortunadamente, los sistemas de vapor dominante son mucho más escasos que los sistemas de agua caliente.

En los sistemas de agua caliente, la química de la fase fluida mantiene relación directa con el "reservorio" subterráneo de agua termal y con la roca. Debido a la alta temperatura, las reacciones químicas entre los componentes, alcanzan el equilibrio en un proceso relativamente rápido. La química del fluido en un sistema de agua caliente refleja el estado de "equilibrio" entre el fluido y la roca del "reservorio" y puede ser interpretado de acuerdo con ello. Sin embargo, la química del fluido de un sistema de vapor dominante no tiene generalmente una relación directa con el "reservorio" subterráneo, debido a la ebullición del fluido y la subsecuente presencia de dos fases: líquido y vapor. En este caso, ya está establecida la presencia de un fluido con alta temperatura.

En la etapa de prefactibilidad, los estudios geoquímicos son utilizados para:

- a) Determinar la variación en el medio ambiente geoquímico, mediante la clasificación de los tipos e interacciones (mezclas) de las diferentes aguas y gases, de acuerdo a su composición química. Esto, da como resultado un agrupamiento de aguas superficiales, aguas subterráneas y manantiales termalés según su composición química y permite la identificación o caracterización del posible o los posibles reservorios, de acuerdo con el tipo de agua.
- b) Determinar el origen de la fase fluida, así como la(s) localización(es) del(as) área(s) de recarga, mediante análisis isotópicos (hidrógeno y oxígeno) de las aguas.

- c) Reconocer los patrones de distribución de ciertos elementos particulares, los que podrían resultar de la dispersión de dichos elementos fuera de la fuente de calor o, más generalmente, fuera de un sistema geotérmico.
- d) Estimar la temperatura mínima del reservorio mediante la utilización de varios geotermómetros y modelos de mezcla.
- e) Conocer los problemas químicos relacionados con la producción y eliminación de los fluidos de desperdicio, incluyendo tanto las aguas como los gases.

3.2.1 Esquema del programa y metodología

El programa geoquímico consiste de tres actividades: 1) de campo; 2) de laboratorio y 3) de procesamiento e interpretación de datos.

Las relaciones entre estas tres actividades están representadas en forma diagramática en la figura 2.

a) Actividades de campo

Los estudios de campo son necesarios para recoger muestras de agua, gas y sublimados para analizarlos en laboratorio y, también para hacer mediciones de variables tales como T^oC y caudal de fluido, los cuales no pueden ser medidos en laboratorio. Es aconsejable llevar al campo equipos portátiles de laboratorio para realizar mediciones de pH, NH₄, Fe⁺², gas disuelto en el agua, así como muestreo y análisis de gases.

b) Actividades de laboratorio

Los estudios de laboratorio incluyen el análisis de las muestras recogidas en el campo. Se debe determinar, en las muestras de agua, los siguientes elementos y compuestos:

3.2.2 Técnicas

En esta sección se presenta una breve descripción de las diferentes técnicas aplicadas en un estudio geoquímico. Cabe subrayar que las técnicas de prospección geoquímica están siendo desarrolladas, revisadas, y mejoradas constantemente; por lo tanto, no se discute en detalle los métodos específicos. La implementación misma de estos métodos depende de varios factores tales como la ubicación y el acceso al área; personal y equipo disponibles así como disponibilidad financiera. Según los factores meteorológicos tales como variaciones anuales de precipitación y el índice de evapo-transpiración, se puede establecer la necesidad de hacer el muestreo más de una vez al año, a fin de tener una comprensión correcta del potencial geotérmico.

a) En campo

El estudio de campo debe ser llevado a cabo por un geoquímico entrenado y familiarizado con los problemas y escollos de las mediciones y del muestreo de campo. La siguiente tabla resume los tipos de mediciones que son necesarias, el equipo y los costos aproximados del mismo:

| MEDICIONES | EQUIPO | COSTOS |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| 1) temperatura ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) | Termómetro | US \$ 20–100 c/u |
| 2) pH (± 0.1 unidad pH) | Medidor pH | US \$ 300 cada uno |
| 3) conductancia | Medidor de conductancia | US \$ 300 cada uno |
| 4) alcalinidad | Equipo de alcalinidad | US \$ 200 cada uno |
| 5) estimación del flujo | (estimación visual) | |
| 6) álcalis (Ca, Mg) | Equipo de campo | Hasta US\$ 1000 cada equipo |
| 7) NH_4 , CO_2 | Equipo de campo | US\$ 1500 – 3000 cada equipo |
| 8) recolección de muestras | Botellas, reactivos | US\$ 1000 |

b) En laboratorio

El análisis preciso de la aguas y gases recolectados, y la identificación de los sublimados, es quizás el aspecto más importan-

cationes: Ca, Mg, Na, K;
Li, Rb, Sr, Cs, B;

aniones: Cl, SO₄, HCO₃;
F, Br.

Es conveniente que las muestras de gas sean analizadas en relación a:

O₂, N₂, Ar, CO₂, H₂, He, CH₄ y otros hidrocarburos.

Se puede obtener información acerca del origen de las aguas termales mediante la medición de la distribución isotópica del oxígeno (¹⁸O/¹⁶O) y del hidrógeno (H/D).

c) Procesamiento e interpretación de datos

El procesamiento automático de datos tiene como fin el ordenamiento de una gran cantidad de información numérica y no numérica obtenida. Mediante el uso de computadoras se puede realizar: selección de análisis, cálculos estadísticos, impresión de listas y tablas para informes, trazado de curvas de relaciones químicas.

Algunos de los objetivos perseguidos en la interpretación de los datos geoquímicos incluyen: el modelo de mezcla, la interacción agua/roca, y en forma más general, el entendimiento del proceso o procesos que conducen a la composición del agua observada. El análisis de los factores se lleva a cabo generalmente para identificar procesos o para manejar una gran cantidad de datos. Es así como se pueden calcular las temperaturas del reservorio, detectar fugas del reservorio, y, en ocasiones, determinar el valor relativo del gradiente geotérmico de las áreas adyacentes.

De contarse con los servicios de computación, estos cálculos pueden producirse con más eficiencia y rapidez, y por ende minimizando costos.

te en los estudios geoquímicos. Los análisis deben ser hechos lo más rápidamente posible después de su recolección, (especialmente los gases), por laboratorios especializados en análisis químicos de aguas y gases. Satisfacer las especificaciones requeridas en la exploración geotérmica presupone una gran cantidad de tiempo y de esfuerzo, aún para los laboratorios altamente calificados. El siguiente equipo de laboratorio es el mínimo necesario para llevar a cabo los análisis requeridos: 1) absorción atómica (AA); 2) cromatografía de los gases; 3) análisis químicos normales; y 4) espectrofotometría.

Cuando no existan facilidades locales, se recomienda que los análisis químicos sean hechos sobre una base contractual por un laboratorio confiable y experimentado. Se recomienda un sistema mediante el cual muestras seleccionadas al azar sean analizadas por otros laboratorios, a fin de comprobar la exactitud de los resultados; este método de verificación es practicado comúnmente en la prospección geoquímica. En el caso de que no se hagan arreglos contractuales para los análisis, un químico especializado en análisis de aguas debe ser miembro integrante del equipo geoquímico, supervisando la preparación y el análisis químico de las muestras.

Un análisis químico completo puede hacerse sobre la base de un contrato global con un costo entre 100,00 y 20000 US dólares por muestra. El análisis de los isótopos de oxígeno y de hidrógeno puede ser realizado, donde y cuando sea necesario, por aproximadamente 150,00 US dólares por muestra. Cuando se consideren los gases, se debe analizar O₂, N₂, CO₂, H₂S, He, H₂ y metano. En casos especiales, pueden ser necesarios los análisis de hidrocarburos pesados, CO, gases nobles raros (Ne, Xe, Kr). El costo del análisis de gases de este tipo fluctúa entre 50,00 US dólares y 200,00 US dólares por muestra.

c) Procesamiento e interpretación de datos

Una vez completados los estudios de campo y de laboratorio,

se habrá obtenido una gran cantidad de mediciones de los diferentes parámetros físicos y químicos del sistema geotérmico. El manejo de estos datos se facilitará mediante el uso de la computadora.

El procesamiento de datos puede incluir:

- Comprobación de los análisis químicos para verificar su consistencia interna.
- Cálculos estadísticos, tales como: medias, desviaciones estandar, medidas de correlación entre las variables, etc.
- Trazado de correlaciones de dos variables.
- Análisis de regresión multivariantes, análisis de factores y subsecuentes estudios y preparación de gráficas.

El procesamiento y la representación de los datos, como se ha indicado sirve para la interpretación. La distribución de los tipos de agua y los procesos geoquímicos que tienen lugar en el sistema o sistemas estudiados pueden ser entendidos y probados de esta manera. A este punto tendrá significación la utilización de técnicas exploratorias como la termometría geoquímica, la detección de manifestaciones de fuga y los cálculos de modelos de mezcla.

Sobre la base de estos estudios, se puede construir un modelo térmico e hidrogeoquímico coherente del sistema geotérmico. Este modelo debe tomar en cuenta todos los datos geológicos, geofísicos y geoquímicos. El refinamiento de este modelo es un proceso iterativo, en el que se están continuamente incorporando los resultados de los últimos estudios geoquímicos, geológicos y geofísicos que se van realizando, incluyendo los de las etapas de desarrollo y explotación del programa geotérmico.

Varias de las interrogantes que estos estudios pueden ayudar a resolver incluyen:

- Identificación de los tipos químicos de las aguas;
- Identificación de acuíferos y su papel en la circulación regional del agua;
- Estudios de manifestaciones de fuga;
- Geotermometría;
- Modelos de mezcla.

Manifestaciones de fuga

El reconocimiento de las manifestaciones de fuga (desprendimientos de vapor geotérmico hacia la superficie) y la detección de anomalías de fugas (anomalías geoquímicas resultantes del desprendimiento de vapor y/o gases geotérmicos en lugares donde no ocurren manifestaciones superficiales), son una parte importante de los estudios geoquímicos, ya que pueden ser detectadas pequeñas mezclas de vapor y/o gases del "reservorio" geotérmico. Los mejores indicadores de fugas son: amoníaco (NH_4), ácido bórico (H_3BO_3) y, gases de reservorio (CH_4 , H_2S , CO_2 , H_2 , He , Ar-40). Los estudios de fugas, a la vez que proveen información valiosa para los sistemas de agua caliente, son particularmente importantes para detectar la presencia de sistemas de vapor dominante.

Debido a la presencia de agua y vapor en el sistema de vapor dominante, la química del condensado del vapor puede no tener relación directa con el reservorio subterráneo, pero la tiene con sus componentes volátiles. El ácido bórico y el amoníaco son comunes en las fumarolas y se concentran en el agua condensada.

Debido a la volatilidad relativamente baja del ácido bórico y a la alta reactividad del amoníaco con el material arcilloso, cercano a la superficie, estos componentes no son arrastrados largas distancias en la fase vapor. Donde estén presentes, estos componentes podrían presentar gradación continua dentro del área de prospección, lo cual podría indicar la zona más intensa de ebullición subterránea. Los análisis estadísticos procesados en computadoras podrán probar la validez de los datos, así como también indicar la presencia o ausencia de anomalías de fugas en el área de estudio.

Geotermometría

Una meta importante de los estudios geoquímicos es la estimación de la distribución de la temperatura del reservorio. En los sistemas geotérmicos de agua caliente, las temperaturas del reservorio pueden ser estimadas mediante la química de los manantiales. Los dos geotermómetros más populares son el contenido de SiO_2 y las relaciones atómicas de K/Na/Ca. Ambos geotermómetros han sido calibrados empírica y experimentalmente; con ellos se asume que el fluido químico refleja equilibrio con la roca del reservorio a través de reacciones químicas dependientes de la temperatura. Otros geotermómetros tales como el contenido de Mg, contenido de Cl, relación Cl/F, contenido de Ca y HCO_3 , no han sido calibrados y proveen solamente estimaciones semicuantitativas de la temperatura del reservorio.

Un problema para la geotermometría, es el requerimiento de muestras bastante puras de los fluidos del reservorio. Los requisitos que se deben tomar en cuenta en la geotermometría incluyen: reacción insignificante del fluido con la roca durante la trayectoria hacia la superficie de manera que su composición se mantenga equilibrada con la del reservorio; ausencia de dilución o mezcla con otras aguas a niveles intermedios y; flujo rápido del agua desde el reservorio hasta la superficie. Tales requisitos no son necesarios para el estudio de las manifestaciones de fuga,

ya que se pueden interpretar en término de modelos de mezcla.

Modelos de Mezcla

Allí donde las manifestaciones superficiales de un sistema geotérmico son mezclas de agua caliente proveniente de la profundidad y agua freática fría, la composición del agua de la fuente termal y las características del flujo pueden ser apropiadas para la aplicación de modelos de mezcla, con el fin de estimar la temperatura y salinidad del componente de alta temperatura de la mezcla. La temperatura estimada es comúnmente más elevada y precisa que la temperatura máxima obtenida por los geotermómetros químicos, cuando no se considera la mezcla. En algunos lugares los modelos de mezcla han indicado la existencia de diferentes reservorios (zonas permeables donde el período de residencia del agua en la roca es suficientemente largo y la temperatura es lo suficientemente elevada para alcanzar un equilibrio químico agua/roca) con diferentes temperaturas y composiciones en distintas partes de un mismo sistema hidrotermal.

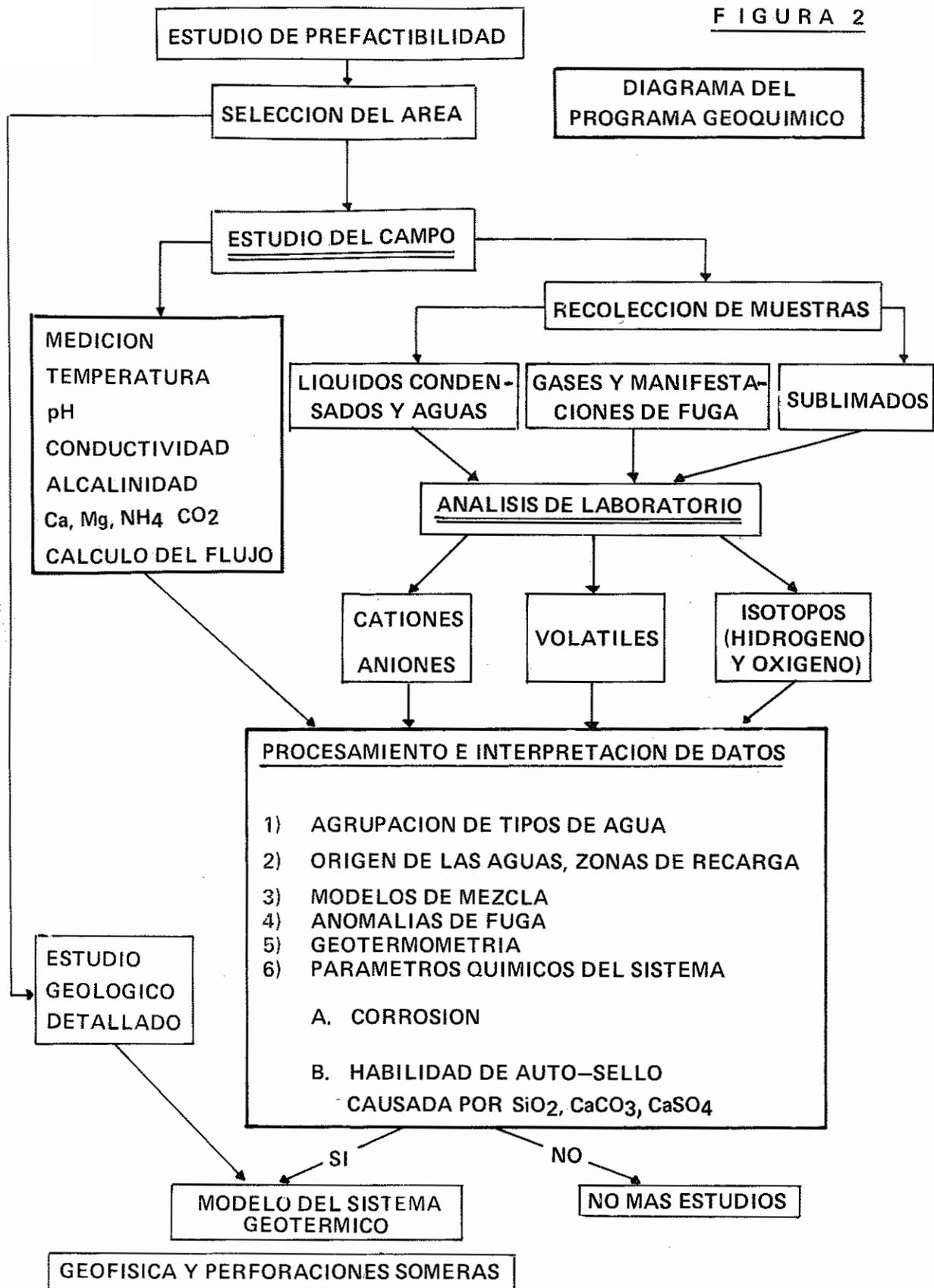
3.2.3 Costos, equipo y personal

Los estudios geoquímicos son altamente rentables cuando se los compara con otros métodos de exploración geotérmica tales como la geofísica y la perforación exploratoria. La siguiente tabla es una estimación de costos, así como el requerimiento de equipo y personal necesario para el estudio de una área (1) seleccionada por la fase de reconocimiento y estudiada en la de prefactibilidad.

(1) Area de 500 a 2000 km²

| COSTOS APROXIMADOS (1977) | EQUIPO | PERSONAL/TIEMPO |
|---|--|---|
| <p>CAMPO (excluyendo salarios del personal local)</p> <p>US\$ 3000 a US\$ 4000 por cada equipo</p> <p>US\$ 7500 /mes por experto consultor</p> | <p>termómetro medidor pH medidor de conductancia equipo de alcalinidad equipo para Ca, Mg, NH₄ equipo de recolección de muestras, incluyendo botellas y reactivos químicos</p> | <p>1 experto geoquímico</p> <p>1 asistente de campo</p> <p>(2 a 6 meses)</p> |
| <p>LABORATORIO US\$ 100- US\$200 por muestra para elementos y compuestos</p> <p>US\$150 por muestra para los isótopos de hidrógeno y de oxígeno</p> <p>US\$ 50-200 por muestra para los análisis de gas.</p> | <p>Cuando las instalaciones locales no estén disponibles se recomienda que los análisis químicos sean hechos sobre una base contractual. El siguiente equipo es el mínimo necesario para llevar a cabo los análisis requeridos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Absorción atómica (AA); 2) Cromatografía de gases; 3) Instalaciones de análisis químicos normales 4) Espectrofotometría | <p>(2 a 4 meses)</p> |
| <p>CALCULO Y PROCESAMIENTO DE DATOS US\$ 1000 a US\$2000 para alquiler de tiempo de computadora (Costos si los cálculos son hechos por computadora) US\$7500 por mes. por consultor</p> | <p>Tiempo de alquiler de computadora</p> | <p>1 geoquímico (experto) 1 procesador de datos</p> <p>(1 a 2 meses)</p> |

FIGURA 2



3.3 Geofísica

El objetivo principal del empleo de las técnicas de prospección geofísica en la exploración geotérmica, es contribuir con los otros estudios de exploración (geología, vulcanología, geohidrología y geoquímica) a la elaboración del modelo geotérmico del área en estudio. Se busca:

- a) Determinar las condiciones geológico-estructurales regionales.
- b) Localizar y delimitar anomalías térmicas en el área.
- c) Definir condiciones estructurales particulares.

Los métodos de prospección geofísica se basan en la medición de la variación, en el tiempo y en el espacio, de alguna de las propiedades físicas de las rocas, siendo las más comunes: densidad, susceptibilidad magnética, elasticidad y conductividad eléctrica y térmica.

El análisis de esas variantes permitirá realizar una interpretación cualitativa y/o cuantitativa que, en unión de los antecedentes geológicos, vulcanológicos, geohidrológicos y geoquímicos, sirva para la elaboración de un modelo geotérmico tridimensional.

3.3.1 Métodos de exploración geofísica

- a) Determinaciones estructurales regionales

En el marco general de las exploraciones geotérmicas, las técnicas geofísicas de magnetometría y gravimetría han sido utilizadas principalmente para delinear la situación geológico-estructural del área regional donde se encuentran situados los recursos geotérmicos. Una interpretación cualitativa de los mapas gravimétricos y magnetométricos muestra indicaciones sobre la situación de las mayores estructuras geológicas. La interpretación de modelos rigurosos, haciendo uso de computadoras e información geológica reduce el número de datos por determinar.

La utilización de estas técnicas está supeditada al conocimiento previo que se tenga de la zona. Un estudio gravimétrico y, eventualmente, uno magnetométrico o aeromagnetométrico, proveerán valiosa información a un costo bastante reducido de la situación estructural regional.

b) Delineación de anomalías térmicas en el área

A la fecha, para determinar, delinear y evaluar un campo geotérmico, se ha estado haciendo uso intensivo de métodos eléctricos y electromagnéticos (técnicas de resistividad, telúricas, magnetotelúricas y otras).

Se han realizado reconocimientos regionales de anomalías geotérmicas buscando contrastes de resistividad, producidos por la existencia de zonas de temperatura anómalas. Estos contrastes de resistividad son producidos, entre otros, por efecto de la temperatura. Sin embargo, se debe considerar que la resistividad eléctrica de las rocas también es afectada por factores tales como: porosidad, salinidad, presión, alteración mineral, y que deben tomarse en cuenta para una interpretación correcta.

En algunos casos, técnicas de mapeos de resistividad, de corriente directa, usando diferentes configuraciones (perfiles Schlumberger, perfiles Wenner, Dipolo-Dipolo, Bipolo-Dipolo), han delineado las zonas de anomalías térmicas.

Otras técnicas eléctricas como: telúrico, magnetotelúricas, audio-magnetotelúricas, así como otras técnicas geofísicas, como ruido sísmico, se encuentran en etapa de experimentación para delinear las anomalías térmicas del subsuelo; sin embargo, se deberá considerar su posible utilización en el futuro.

c) Determinaciones particulares

La utilización de las técnicas geofísicas para la determinación

de situaciones particulares, dependerá de la naturaleza misma del problema. En este punto, las técnicas de gravimetría y magnetimetría han permitido obtener información muy particular. En algunos casos, las anomalías gravimétricas están directamente ligadas a la existencia de cuerpos o fluidos calientes del subsuelo. Idéntica situación se obtiene de los estudios magnetométricos, donde es posible tener, en algunos casos, información sobre cuerpos ígneos relacionados con la fuente calorífica del campo geotérmico.

Estos datos gravimétricos y magnetométricos, tienen además otras aplicaciones específicas: en ciertas áreas y con modelos cuantitativos, obtener información específica sobre problemas de localización de fallas, zonas de fracturas o alteración, anomalías de masa relacionadas con temperaturas; también, detectar las variaciones de densidad de un campo geotérmico causada por la transferencia de masa durante la explotación del mismo.

Los métodos sísmicos (activos o pasivos) también proveen valiosa información sobre situaciones particulares. Con los métodos de sísmica activa, se obtiene una considerable información sobre la posición de las interfases geológicas por medio del análisis riguroso de las trayectorias seguidas por las ondas elásticas generadas en o cerca de la superficie.

En la prospección geotérmica, estos métodos han sido poco utilizados, debido principalmente a sus altos costos. Sin embargo, dios de reflexión y refracción han sido utilizados en algunos campos geotérmicos para conocer situaciones geológicas muy particulares (profundidad y espesor de capas, fallas, etc.)

Desde años recientes se utiliza la actividad sísmica, dentro de una zona geotérmica (microtemblores), para determinar la zona de fallas activas. Se están llevando a cabo como una posible herramienta para determinar cámaras magmáticas, estudios sobre la atenuación de la velocidad de las ondas P y S, del tiempo de

retardo, y del espectro relativo de las ondas producidas por temblores regionales o microtemblores locales muy bien localizados.

Han sido utilizadas con bastante éxito, considerando su relación costo/eficacia, técnicas de resistividad (sondeos eléctricos verticales, para determinar profundidades de capas geológicas particulares; espesor de la cobertura, etc.

3.3.2 Consideraciones finales

La realización de cualquier estudio geofísico implica contar con personal capacitado y equipo adecuado. Normalmente, salvo excepciones, estos estudios geofísicos se dan a contrato a compañías especializadas.

Aún cuando ese sea el caso, deberá contarse, cuando menos, con un geofísico experto en técnicas de prospección geotérmica, para que sea él el que programe, en coordinación con el personal de geología, vulcanología, geohidrología y geoquímica, los estudios geofísicos a realizarse.

Una cuestión bastante delicada es establecer un programa de exploraciones geofísicas dentro de la exploración geotérmica, dado el sinnúmero de situaciones geológicas que se pueden presentar y de los resultados obtenidos en los otros estudios de reconocimiento (geología, vulcanología, geohidrología y geoquímica).

El empleo de estas técnicas geofísicas, deberá ser una herramienta auxiliar complementaria en el conocimiento de la zona geotérmica. Los métodos empleados en prospecciones de exploración regional, conocimiento estructural y delineación de anomalías han aportado excelentes resultados. Otras técnicas para delinear y evaluar un campo geotérmico están en etapa de experimentación.

Una conclusión importante es la conveniencia de crear un grupo geo-

físico dedicado a la exploración geotérmica, a pesar de que la mayoría de estos estudios se realizan por contrato. De no contarse con ello, sí es indispensable, cuando menos, una persona competente que programe y supervise la realización de estos estudios.

NOMINA DE PARTICIPANTES

GRUPO ASESOR DE OLADE

| | |
|------------------------------------|---|
| Ing. Gustavo Rodríguez Elizarrarás | COORDINADOR DEL SEMINARIO |
| Dr. Andrea Merla | JEFE DE EXPLORACION DE AQUATER ENI - Italia |
| Dr. Thomas Casadevall | EPN; ECUADOR US GEOLOGICAL SURVEY; U. S. A. |
| Dr. Salvador García Durán | JEFE DE LA OFICINA DE EVALUACION Y ESTUDIOS ESPECIALES DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD México |

PARTICIPANTES

COLOMBIA

| | |
|---------------------------|--|
| Ing. Edison Adolfo Lozano | GEOLOGO DEL INSTITUTO COLOMBIA- NO DE ENERGIA ELECTRICA |
| Ing. Alberto Naranjo | INGENIERO DE LA CENTRAL HIDRO- ELECTRICA DE CALDAS |

CHILE

| | |
|------------------------------|--|
| Ing. Claudio Cádiz Chavarría | JEFE DE PROYECTO DEL COMITE GEOTERMICO DE CORFO |
|------------------------------|--|

ECUADOR

| | |
|-----------------------|--|
| Ing. Rodrigo Alvarado | DIRECTOR GENERAL DE GEOLOGIA Y MINAS. JEFE DEL PROYECTO GEO- TERMICO DEL ECUADOR |
|-----------------------|--|

Ing. Marcelo Osorio

JEFE DE PLANIFICACION DEL INSTITU-
TO ECUATORIANO DE ELECTRIFICA-
CION, INECEL

Ing. Leonardo Elizalde Calle

JEFE DE PROCESAMIENTO DE DATOS
DE LA DIRECCION GENERAL DE
GEOLOGIA Y MINAS

EL SALVADOR

Dr. Gustavo Cuellar

SUPERINTENDENTE DE RECURSOS
GEOTERMICOS DE CEL

Ing. Mauricio Enrique Retana

GEOLOGO DE LA SUPERINTENDENCIA
DE RECURSOS GEOTERMICOS DE CEL

Lcdo. Oscar Díaz

GEOFISICO DE LA SUPERINTENDENCIA
DE RECURSOS GEOTERMICOS DE CEL

ESTADOS UNIDOS DE AMERICA

Dr. Robert Christiansen

COORDINADOR DEL PROGRAMA DE
INVESTIGACION GEOTERMICA DEL U.S.
GEOLOGICAL SURVEY

Dr. Robert Fournier

GEOQUIMICO DEL U.S. GEOLOGICAL
SURVEY

GUATEMALA

Ing. Hugo Rolando Bethancourt

DELEGADO RESIDENTE DE ESTUDIOS
GEOTERMICOS DEL INSTITUTO
NACIONAL DE ELECTRIFICACION

Ing. Julio César Palma

GEOFISICO DEL INSTITUTO NACIONAL
DE ELECTRIFICACION

ITALIA

| | |
|--------------------------|--|
| Dr. Cesare Augusto Corti | SECRETARIO DE LEGACION DEL MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES |
| Dr. Raffaele Cataldi | JEFE DEL SERVICIO DEL CENTRO DE BUSQUEDAS GEOTERMICAS DEL ENTE NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA |
| Ing. Edoardo Dominco | INGENIERO GEOTERMICO DE ELECTROCONSULT |
| Dr. Enzo Ducci | COORDINADOR DEL GRUPO GEOTER- MICO DE AQUATER - ENI |
| Dr. Renato Ghelardoni | AGIP – EXPLORACION DE RECURSOS GEOTERMICOS |
| Dr. Constanzo Panichi | GEOQUIMICO DEL INSTITUTO INTERNA- CIONAL DE INVESTIGACIONES GEOTER- MICAS - CNR |
| Ing. Giancarlo Stefani | GEOLOGO DEL ENTE NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA |

MEXICO

| | |
|----------------------------|--|
| Dr. Arturo Reinking Cejudo | COORDINADOR DEL PROGRAMA DE GEOTERMIA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS |
| Ing. Alfredo Mañón Mercado | SUPERINTENDENTE GENERAL DE ESTUDIOS DE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD - COORDINADORA EJECUTIVA DE CERRO PRIETO |

Ing. Sergio Mercado

JEFE DE GEOTERMIA DEL INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS

NICARAGUA

Ing. Ariel B. Zúñiga Mayorga

JEFE DEL PROYECTO GEOTERMICO
DE LA EMPRESA NACIONAL DE LUZ
Y FUERZA - ENALUF

PANAMA

Dr. Virgilio Luque

DIRECTOR DEL PROYECTO GEOTERMI-
CO DE LA CORPORACION DE
DESARROLLO MINERO

REPUBLICA DOMINICANA

Ing. Julio César Granja Vaca

ASESOR DEL DEPARTAMENTO DE
RECURSOS NATURALES ENERGETICOS

VENEZUELA

Ing. Rafael Gudiño Tolosa

GERENTE DE PLANIFICACION DE
ENERGIAS DE C.A.D.A.F.E.

Ing. Carlos Lezama B.

INGENIERO GEOLOGO DE C.A.D.A.F.E.

ORGANISMOS INTERNACIONALES

INSTITUTO ITALO-LATINO AMERICANO, IILA

| | |
|---------------------------|---|
| Emb. Carlo Perrone Capano | SECRETARIO GENERAL |
| Dr. Enrique Arízaga | ASISTENTE |
| Sra. Gina Bucci | ASISTENTE PARA EL SECTOR CIENTIFICO |
| Prof. Franco Barberi | PROFESOR DE VULCANOLOGIA EN LA UNIVERSIDAD DE PISA |
| Prof. Paolo Gasparini | PROFESOR DE LA UNIVERSIDAD DE NAPLES |
| Prof. Franco Tonani | PROFESOR DE LA UNIVERSIDAD DE PALERMO |

OBSERVADORES

ORGANISMOS INTERNACIONALES

| | |
|---------------------------------|---|
| Econ. Eduardo Andrade Chiriboga | JEFE DE LA OFICINA NACIONAL PROMOCION ECUADOR DE LA CORPORACION ANDINA DE FOMENTO, CAF |
|---------------------------------|---|

ORGANISMOS OFICIALES

| | |
|-------------------------|--|
| Ing. Leonardo Mac Kliff | CONSULTOR TECNICO DE LA COMISION ECUATORIANA DE ENERGIA ATOMICA |
|-------------------------|--|

REPRESENTANTES PAISES

Econ. José Eyzaguirre Bernales

AGREGADO ECONOMICO DE LA EMBA-
JADA DEL PERU EN EL ECUADOR

INSTITUTOS DE EDUCACION SUPERIOR

Ing. Gastón Vásquez Merizalde

DECANO DE LA FACULTAD DE GEOLO-
GIA, MINAS Y PETROLEOS DE LA
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
Quito – ECUADOR

Ing. José Francisco Carrión

PROFESOR PRINCIPAL EN LA ESCUELA
POLITECNICA NACIONAL - Quito,
ECUADOR

Ing. Minard L. Hall

PROFESOR PRINCIPAL EN LA ESCUELA
POLITECNICA NACIONAL - Quito,
ECUADOR

Ing. Antonio di Molfetta

EXPERTO DEL MINISTERIO DE ASUNTOS
EXTERIORES DE ITALIA EN LA ESCUE-
LA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITO-
RAL—Guayaquil, ECUADOR

Ing. Gabriel J. Colmont

PROFESOR INVESTIGADOR EN LA
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL - Guayaquil, ECUADOR

Sr. Johnny Hernández Bermeo

ESCUELA DE GEOLOGIA, MINAS Y
PETROLEOS DE LA UNIVERSIDAD
CENTRAL DEL ECUADOR - Quito

Sr. Fernando Benavídez

FACULTAD DE INGENIERIA, CIENCIAS
FISICAS Y MATEMATICAS DE LA
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
Quito

PRIVADOS

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| Ing. Guillermo Bixby García | Quito, ECUADOR |
| Ing. Freddy Checa Morillo | Quito, ECUADOR |
| Sr. William Gustav Weber | Managua, NICARAGUA |
| Sr. Paul B. Storm | California, ESTADOS UNIDOS |
| Sr. Giancarlo Facca | California, ESTADOS UNIDOS |
| Ing. Claude Urbain | San Salvador, EL SALVADOR |
| Ing. Alberto Vidés Ramos | San Salvador, EL SALVADOR |