

6101490

Ecuador

**OLADE**  
**ORGANIZACION LATINOAMERICANA**  
**DE ENERGIA**

**BID**  
**BANCO INTERAMERICANO**  
**DE DESARROLLO**

**GUIA PARA LA**  
**EVALUACION DEL POTENCIAL ENERGETICO EN ZONAS**  
**GEOTERMICAS DURANTE LAS ETAPAS PREVIAS**  
**A LA FACTIBILIDAD**

Quito, Ecuador  
Septiembre, 1993



Preparada bajo el Convenio No Reembolsable BID/OLADE  
ATN-SF-3603-RE.

BID

---

Banco Interamericano de Desarrollo (BID)  
Av. Amazonas 477 y Roca,  
Edificio Banco de los Andes, 9no. Piso, Casilla 741 A  
Teléfonos: 550-011 / 562-141  
Facsimile: 593-2-564660  
Quito - Ecuador

OLADE

---

Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)  
Av. Occidental, Sector San Carlos OLADE, Casilla:17-11-6413 CCI  
Teléfonos: 538-280 / 539-676  
Télex: 2-2728 OLADE ED  
Facsimile: 593-2-539685  
Quito-Ecuador

## PRESENTACION

Basado en los objetivos de: a) promover acciones para el aprovechamiento y defensa de los recursos naturales de los Países Miembros y de la Región en conjunto, y b) fomentar una política para la racional explotación, transformación y comercialización de los recursos energéticos, OLADE, ante la crisis del petróleo en la década de los 70's, inició en 1978 un programa de actividades encaminado a fomentar la investigación y el aprovechamiento de la geotermia en los Países Miembros, como un recurso alternativo de las fuentes convencionales de energía.

Para alcanzar tal fin, una de las primeras acciones de la Organización fue integrar una metodología para la exploración y explotación geotérmica, adaptable a las condiciones y características de los países de América Latina y el Caribe.

Contando con la colaboración de diversas instituciones y expertos tanto de la Región como de fuera de la misma, OLADE elaboró en 1978 la "Metodología de Exploración Geotérmica para las Fases de Reconocimiento y Prefactibilidad", en 1979 la "Metodología de la Exploración Geotérmica para la Fase de Factibilidad", y en 1980 la "Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica para las Fases de Desarrollo y Explotación". Esta última, posteriormente, una vez revisada, complementada y actualizada, dio lugar a la "Metodología de la Explotación Geotérmica" que la Organización editó el año 1986.

La disponibilidad de tales metodologías, permitió a los países de la Región orientar la investigación y aprovechamiento de sus recursos con una herramienta útil y de fácil aplicación. Haití, Ecuador, Perú, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Jamaica, Colombia y Panamá, entre otros países, realizaron con el apoyo de OLADE y sus metodologías, reconocimientos en sus territorios. Nicaragua, Panamá, Ecuador-Colombia, Haití y Guatemala, también con la intervención de la misma Organización, desarrollaron estudios de prefactibilidad en algunas zonas termales en las que observaron condiciones favorables para llegar a constituirse en campos geotérmicos.

La aplicación de las metodologías de OLADE coadyuvó a incrementar el conocimiento de los países sobre sus recursos, al grado que para fines de la década de los 80's, 20 de los 26 Países Miembros contaban ya con estudios de reconocimiento, 17 países habían ejecutado estudios de prefactibilidad, 8 países estudios de factibilidad y 4 se encontraban generando electricidad mediante la explotación de algunos de sus campos geotérmicos. Sin embargo, el rápido desarrollo tecnológico de la geotermia mostró la necesidad de actualizar las metodologías.

Tomando en cuenta que en diversos foros de carácter internacional la comunidad geotérmica advirtió la necesidad de revisar, modernizar e incluso complementar las metodologías de OLADE, esta Organización y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

decidieron mediante el Convenio de Cooperación Técnica ATN/SF-3603-RE, revisar los documentos existentes y elaborar seis nuevas guías para la exploración y explotación geotérmica. Tales guías, atendiendo los requerimientos de los grupos técnicos de la Región, serían para: Estudios de Reconocimiento, Estudios de Prefactibilidad, Exploración de Factibilidad, Evaluación del Potencial Energético (en base a la información recopilada en las fases de reconocimiento y prefactibilidad), Operación y Mantenimiento de Campos y Plantas Geotérmicas, y Preparación de Proyectos de Inversión en Plantas Geotérmicas.

La elaboración de los nuevos documentos sobre geotermia, se llevó a cabo mediante la intervención de 7 consultores internacionales y 8 expertos de la Región con amplia experiencia en geovulcanología, geoquímica, geofísica, perforación, ingeniería de yacimientos, operación y mantenimiento de campos y plantas geotérmicas, e ingeniería y diseño de plantas.

El esfuerzo de OLADE y el BID por contribuir en el desarrollo geotérmico de América Latina y del Caribe, se presenta en este documento que contiene la guía para la Evaluación del Potencial Energético en Zonas Geotérmicas Durante las Etapas Previas a la Factibilidad, con el objetivo de poner a la disposición de los países de la Región un instrumento que les permita estimar, en las etapas iniciales de la investigación geotérmica, el potencial de este recurso que eventualmente podría ser incluido en la planificación energética nacional.

OLADE y el BID manifiestan su reconocimiento a la labor del Dr. Marcelo Lippmann, quien tuvo bajo su responsabilidad la elaboración del presente documento. Asimismo, agradecen a los señores Dr. Jesús Rivera, Dr. Paolo Liguori, Ing. Eduardo Granados e Ing. Antonio Razo sus aportaciones a la guía.

## CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. METODOLOGIA	2
2.1 Métodos de Evaluación del Recurso Geotérmico	4
2.1.1 Método del Flujo Térmico Superficial	4
2.1.2 Método de la Fractura Planar	4
2.1.3 Método del Calor Magmático o de la Cámara Magmática	5
2.1.3.1 Evaluación de la Fuente de Calor	6
2.1.3.2 Modelado de la Transferencia de Calor	7
2.1.4 Método Volumétrico	7
2.1.4.1 Recurso Base Accesible	8
2.1.4.2 Recurso Geotérmico	10
3. CONCLUSIONES	12
4. REFERENCIAS	14
TABLA	
Tabla No. 1 Problemas geotécnicos que afectan los costos de un proyecto de explotación geotérmica	17
FIGURAS	
Figura No.1 Modelo conceptual del campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, que corresponde a un ejemplo de un sistema geotérmico asociado con un aparato volcánico	18
Figura No. 2 Concepto de Reserva Geotérmica de acuerdo con limitantes tecnológicas y económicas	19

Figura No. 3	Factores de Recuperación Geotérmicos teóricos (relativos a 40 °C) dados en función de la temperatura y porosidad del yacimiento	20
Figura No. 4	Factores de Recuperación Geotérmicos teóricos (relativos a 15 °C) dados en función de la temperatura y porosidad del yacimiento	20
Figura No. 5	Razón de trabajo útil y la energía acumulada en el yacimiento versus su temperatura, para sistemas geotérmicos de tipo líquido dominante	21
Figura No. 6	Factor de Utilización para diferentes ciclos de trabajo eléctrico y temperaturas	21
Figura No. 7	Proceso global de evaluación del potencial energético	22

## 1. INTRODUCCION

En geotermia la existencia de un sistema geotérmico con perspectivas económicas depende de la presencia de una fuente de calor endógeno, generalmente asociada con un cuerpo magmático somero (Barberi y Marinelli, 1987). Por supuesto, cuanto mayor y más reciente sea dicho cuerpo, mayor será la anomalía térmica y más alta la probabilidad de encontrar un sistema que pueda ser explotado en forma económica.

La posibilidad de descubrir un sistema geotérmico de tipo hidrotermal (sistema en el cual el calor endógeno es transportado hacia o cerca de la superficie terrestre principalmente por convección) es favorecida por la presencia de vulcanismo reciente de tipo intermedio a ácido y por la existencia de formaciones rocosas con permeabilidad y porosidad adecuadas como para permitir la circulación y la acumulación en el subsuelo de grandes volúmenes de fluidos. Cuando se habla de vulcanismo intermedio a ácido reciente, se refiere a volcanes andesíticos a riolíticos actualmente activos o que lo estuvieron durante el último millón de años.

En general el vulcanismo de tipo más básico (por ej., basáltico) es de menor interés para la geotermia, porque generalmente la fuente del magma está más profunda y cuando éste asciende hacia la superficie, lo hace rápidamente sin calentar grandes volúmenes de roca; una excepción es el caso de Puna, Hawai, EE.UU.

Por otro lado, en el caso de un vulcanismo ácido, la cámara magmática tiende a encontrarse a menor profundidad y el magma, diferenciado, a permanecer mayor tiempo en la cámara antes de que ésta se vacíe, lo que permite una mayor transferencia de calor a la roca encajonante (Barberi y Marinelli, 1987).

Es conveniente aclarar que la presencia de diversos tipos de vulcanismo, estructuras y formaciones geológicas favorables, no permite asegurar la existencia de un sistema geotérmico de interés económico. Hay muchos factores que controlan su presencia, así como también complican su desarrollo y explotación.

Por otra parte el inferir la existencia de un recurso geotérmico en una zona, es decir, el haber estimado la acumulación de cierta cantidad de energía térmica en las rocas del subsuelo y establecer la factibilidad técnica de transformar y/o transportar la energía a centros de consumo, no significa que la energía pueda ser extraída económicamente o que la zona contenga lo que se denomina un Recurso Geotérmico (ver más adelante).

Por ejemplo, los problemas geotécnicos que pudieran aparecer durante la exploración, desarrollo y/o explotación del proyecto (Tabla No. 1), podrían aumentar los costos relacionados con la construcción de obras civiles, la perforación de los pozos y la

producción de fluidos geotérmicos en volúmenes suficientes. Estos costos adicionales podrían incidir negativamente en el aspecto económico de un proyecto de explotación geotérmica, pudiendo transformarlo en uno de poco interés comercial, a pesar de la gran cantidad de calor que pudiera estar presente en el subsuelo.

En la etapa de prefactibilidad, antes de perforarse pozos profundos, es posible inferir en forma preliminar y semicuantitativa el tamaño de un recurso geotérmico basándose en datos preliminares, ya que éste tiende a estar evidenciado por: a) el flujo térmico medido en la zona, b) las temperaturas del subsuelo calculadas en base a la composición química de los fluidos producidos por las manifestaciones (uso de geotermómetros) o las medidas en pozos de gradiente, c) el tamaño (área y descarga) de las manifestaciones superficiales, d) el área con alteración hidrotermal, y e) el tamaño de las anomalías geofísicas (por ej., de un bajo resistivo) o geoquímicas que se hayan detectado.

Es necesario aclarar que para inferir el tamaño del recurso, en términos generales son mucho más importantes las fumarolas que los manantiales calientes. No hay una regla universal pero en muchos campos geotérmicos las fumarolas tienden a estar localizadas sobre las regiones de mayor temperatura del yacimiento geotérmico, mientras que los manantiales tienden a estar asociados con las zonas de descarga (Figura No. 1<sup>1</sup>).

Las abundantes y extensas áreas de fumarolas reflejan un marcado ascenso de fluidos geotérmicos; mientras que la localización de los manantiales calientes indica hasta donde se extiende el sistema geotérmico y donde es descargado. Esto explica el hecho de que muchos pozos perforados en zonas de manantiales han penetrado acuíferos geotérmicos de relativamente poco espesor y baja temperatura. Al interceptar las zonas de descarga del sistema, los pozos encuentran fluidos geotérmicos que han perdido gran parte de su temperatura inicial por ebullición, conducción o mezcla con aguas subterráneas frías. Sin embargo, cabe aclarar que existen sistemas en los cuales debido a su compleja estructura, lo anterior no representa la situación verdadera.

## 2. METODOLOGIA

La magnitud del potencial energético de un sistema geotérmico de tipo hidrotermal, se puede "estimar" en forma aproximada considerando las características del sistema observables desde la superficie. Al hacer este análisis se tiene que recordar que la existencia de un sistema hidrotermal se debe a la presencia de: a) una fuente de calor endógeno, b) fluidos que capturen y transporten dicho calor, c) estructuras geológicas (fallas, fracturas) que

---

<sup>1</sup> Figura al final de la guía

permitan el flujo de estos fluidos geotérmicos, d) formaciones geológicas permeables donde almacenarlos fluidos (el yacimiento), y e) formaciones poco permeables cubriendo el yacimiento (capa sello) que prevengan o reduzcan el movimiento ascendente de los fluidos geotérmicos y la mezcla de los mismos con aguas subterráneas someras más frías.

Existen diferentes métodos utilizados durante las etapas iniciales de un proyecto geotérmico para el cálculo del potencial energético de una zona. Algunos de ellos se describen en forma sucinta a continuación, enfatizándose el Método Volumétrico por ser, bajo las condiciones que se tienen en estas etapas, el más riguroso y el más utilizado (ver por ej., ICE, 1991). Los demás métodos tienden a dar resultados muy aproximados basándose principalmente en suposiciones más que en datos obtenidos con investigaciones específicas. Mayores detalles de los diferentes métodos, se podrán obtener en los trabajos a los que se hace referencia más adelante.

En la evaluación del potencial energético de un sistema geotérmico, el primer paso consistirá en determinar el Recurso Geotérmico Base; la nomenclatura utilizada a continuación es la de Muffler y Cataldi (1978); figura No. 2. Este recurso comprende toda la energía térmica contenida en la corteza terrestre debajo del área considerada, referida a la temperatura media anual local.

El Recurso Geotérmico Base se divide en: a) una parte somera que muy posiblemente pueda ser alcanzada mediante pozos, el denominado Recurso Geotérmico Base Accesible (RBA), y b) una parte profunda que difícilmente pueda ser alcanzada en un futuro próximo, llamada Recurso Geotérmico Base Inaccesible (Figura No. 2). Obviamente, la línea de separación entre estas dos categorías es función de la tecnología de perforación y de factores económicos predichos para el futuro (Muffler y Cataldi, 1978).

El próximo paso en este proceso de evaluación consiste en determinar el Recurso Base Accesible Util, o Recurso Geotérmico (Figura No. 2), ya que no todo el RBA podrá ser extraído por los pozos aún si se es muy optimista sobre los posibles avances tecnológicos y cambios económicos futuros. El Recurso Base Accesible Util comprende el calor contenido en la parte de la corteza debajo del área estudiada que podrá ser explotado razonablemente a costos competitivos con otras formas de energía.

El Recurso Geotérmico se subdivide en: a) Recurso Geotérmico Económico, que corresponde a la energía geotérmica que puede ser extraída a costos competitivos y en forma legal en el momento de hacer la evaluación, y b) el Recurso Geotérmico Marginal que no puede explotarse competitivamente, pero que quizás lo pueda ser en el futuro, bajo diferentes condiciones económicas y utilizando nuevas técnicas.

El Recurso Geotérmico Económico está compuesto de dos partes: a) la Reserva Geotérmica que ha sido identificada o comprobada mediante técnicas geocientíficas, y b) el Recurso Geotérmico Económico por Descubrir, cuya magnitud puede inferirse en base a los datos recogidos (Rivera, 1983). Más adelante, cuando se describa el Método Volumétrico (Sección 2.1.4), se usará el término Recurso Geotérmico (RG) que corresponde aproximadamente al Recurso Geotérmico Económico. Conviene indicar que la nomenclatura que se utiliza en la Sección 2.1.4 basada en el trabajo de Brook y Otros, difiere algo de la de Muffler y Cataldi, la que se ha presentando en esta sección principalmente por su sistemática clara.

## 2.1 Métodos de Evaluación del Recurso Geotérmico

Los principales métodos para evaluar los recursos geotérmicos de un sistema durante la etapa de prefactibilidad de un proyecto, son los siguientes:

### 2.1.1 Método del Flujo Térmico Superficial

El método del flujo térmico superficial es muy simple y se basa en el cálculo de la cantidad de calor subterráneo que es transmitido a la superficie por unidad de tiempo (Muffler y Cataldi, 1978). Esta transferencia térmica es por conducción y convección ( $Q_{cond} + Q_{conv}$ ). La Potencia Térmica Natural (PTN) es igual a la suma del calor transferido por medio de estos dos procesos,

$$PTN = Q_{cond} + Q_{conv} = A * q_{cond} + q * c_f * (T_f - T_o)$$

donde,

A	=	superficie del área estudiada (m <sup>2</sup> );
$q_{cond}$	=	calor transmitido por conducción por unidad de área (W/m <sup>2</sup> )
q	=	caudal másico de fluido (kg/seg)
$c_f$	=	capacidad calorífica del fluido (J/kg - °C)
$T_f$	=	temperatura del fluido fluyendo de las manifestaciones (°C)
$T_o$	=	temperatura ambiente (°C).

Este método permite establecer la cantidad de vatios de energía térmica que es liberada por el sistema. Si se supone un factor de recuperación y un factor de transformación de energía térmica a eléctrica, es posible estimar en forma semicuantitativa el potencial eléctrico del sistema.

### 2.1.2 Método de la Fractura Planar

El método de la fractura planar se basa en el modelo de una fractura plana que recibe calor por conducción de la roca vecina impermeable (Bodvarsson, 1974). La cantidad de energía térmica que

se puede extraer de la fractura por unidad de área es función de la temperatura de la roca circundante y de la temperatura inicial y final (después de 25 ó 50 años) del fluido en la fractura.

El método se puede extender a un sistema de fracturas múltiples, siempre y cuando la distancia entre las mismas no cause interferencia térmica. Teóricamente este planteamiento se puede aplicar a sistemas geotérmicos localizados en rocas ígneas, pero la incertidumbre de los valores obtenidos puede ser muy alta debido a la falta de datos sobre el espaciamiento y orientación de las fracturas en el sistema geotérmico.

### 2.1.3 Método del Calor Magmático o de la Cámara Magmática

Debido a que la mayor parte de los campos geotérmicos están relacionados con zonas volcánicas, los principios vulcanológicos son muy útiles en exploración pero también pueden ser empleados, aunque sea como una primera aproximación, en la evaluación del potencial de sistemas geotérmicos.

Si se supone que una cámara magmática es la fuente térmica de un sistema geotérmico, el calor almacenado en el subsuelo dentro de un cierto intervalo de profundidades se podrá cuantificar aproximadamente estimando el volumen, profundidad, edad y temperatura de la cámara y calculando la transferencia de calor entre dicha cámara y la superficie.

El método que utilizan Smith y Shaw (1975, 1979) se basa en determinar la cantidad de calor acumulado en los 10 km superiores de la corteza. Esta cantidad la calculan infiriendo los volúmenes probables de las cámaras magmáticas someras y determinando las edades de los productos volcánicos más recientes que hayan provenido de dichas cámaras. (Nota: estos autores llaman cámaras magmáticas a las regiones de la corteza donde se infiere la actual existencia de roca fundida o parcialmente fundida).

Los cálculos de Smith y Shaw están basados en la suposición de que existe un volumen fijo de magma con una temperatura inicial de 850 °C que en determinado momento comienza a enfriarse. En su trabajo, estos autores presentan una figura mostrando el enfriamiento teórico de cuerpos ígneos recientes en función de su edad y tamaño.

La metodología que se esboza a continuación para obtener los parámetros que caracterizan la cámara magmática y calcular el calor acumulado en el yacimiento, corresponde en gran parte a la descrita por Barberi y Marinelli (1987); mayores detalles están dados en dicha referencia.

Primero se desarrolla un modelo de la cámara, o sea se estima su profundidad, volumen, edad y temperatura inicial y final, luego se calcula la distribución de temperaturas (o del gradiente térmico)

en la corteza considerando sólo conducción. Tal como lo indican Barberi y Marinelli (1987), este método de evaluación de la fuente de calor es muy rudimentario y un modelo conductivo-convectivo estaría más acorde con la realidad. Desgraciadamente en las etapas iniciales de un proyecto, donde no se tienen pozos profundos no hay datos suficientes para un cálculo preciso de la transferencia térmica por convección.

### 2.1.3.1 Evaluación de la Fuente de Calor

#### Determinación del Volumen y Profundidad de la Cámara Magmática

La interpretación de datos obtenidos mediante diferentes técnicas geofísicas (por ej., gravimetría, sísmica, magnetometría, estudios de la deformación de la corteza, etc.), podrá dar información aproximada sobre la presencia, profundidad y dimensiones de la presunta cámara magmática (ver por ej., Goldstein y Flexer, 1984; Donnelly-Nolan, 1988; Harjono y Otros, 1989).

Por otro lado, el volumen mínimo de la cámara se podrá estimar en base al volumen de los productos volcánicos diferenciados arrojados y del grado de fraccionamiento de los mismos. El volumen de la parte colapsada de la caldera podrá utilizarse como una medida del volumen eyectado. El grado de fraccionamiento de los productos se podrá estimar con métodos geoquímicos o petrológicos (ver por ej., Carmichael y Otros, 1974; Baker y McBirney, 1985).

Considerando el gradiente térmico existente se podrá calcular aunque en forma aproximada, la profundidad a la cual se alcanzaría la temperatura de formación de las rocas volcánicas aflorantes. La profundidad de la cámara magmática también se podrá estimar estableciendo las condiciones de presión de cristalización dentro de la cámara o por otras técnicas petrológicas. Barberi y Marinelli (1987) recalcan que la determinación de dicha profundidad es una tarea difícil que requiere una reconstrucción cuidadosa del proceso de cristalización.

#### Determinación de la Edad de la Cámara Magmática

La edad de la cámara magmática se establece determinando las edades de las distintas rocas volcánicas que provengan de dicha cámara. Se podrán utilizar métodos isotópicos, (K/Ar, carbono 14, argón 40/argón 39, etc.; ver por ej. Faure, 1986; González P. y Otros, 1991), paleomagnetismo (ver por ej., de Boer, 1979), cronología de depósitos piroclásticos (tefracronología, ver por ej., Steen-McIntyre, 1977; Rieck y Otros, 1992) o análisis químico del barniz de las rocas ("rock-varnish chemical analyses" en inglés, ver por ej., Dorn y Otros, 1990).

## **Temperatura de la Cámara Magmática**

La temperatura de la cámara se podrá inferir a partir de estudios de inclusiones de vidrio en fenocristales (ver por ej., capítulo 16 en Roedder, 1984; Cortini y Otros, 1985) o estimándola en base a estudios petrológicos (ver por ej., Carmichael y Otros, 1974; Tsukui, 1985).

### **2.1.3.2 Modelado de la Transferencia de Calor**

La distribución y evolución de las temperaturas en la región comprendida entre la cámara magmática y la superficie podrán calcularse utilizando modelos matemáticos, analíticos o numéricos. En general en el cálculo de la energía térmica acumulada en un intervalo dado de profundidades se ha supuesto que el calor de la cámara magmática es transferido a las rocas circundantes solamente por conducción. Sería mucho más realista incorporar en dicho cálculo el proceso de convección, pero esto es muy difícil por la falta de datos sobre las propiedades de las rocas a profundidad.

Las características físicas de la cámara magmática que se han mencionado anteriormente (temperatura, dimensiones, profundidad) son importantes, pero no suficientes, para calcular la distribución de temperaturas en el subsuelo que resultan de la conducción de calor entre la cámara magmática y la superficie. También se deberán especificar las propiedades térmicas de las rocas (conductividad, capacidad), las condiciones iniciales (distribución de temperaturas) y las condiciones de contorno (fronteras abiertas o cerradas al flujo de calor, contornos con temperaturas constantes). Habrá que suponer muchos de estos parámetros basándose en las características litológicas de la zona y en inferencias. Un ejemplo de este tipo de cálculo aplicado a Cerro Prieto, está dado por Elders y Otros (1984).

La distribución de temperaturas en la región localizada sobre la cámara magmática cambia con el tiempo a medida que la cámara se enfría y el calor es transferido hacia la superficie. En base a la edad y la temperatura inicial de la cámara magmática se podrán calcular las temperaturas actuales en los niveles superiores de la corteza donde se supone la existencia del yacimiento geotérmico. Esto a su vez permitirá estimar la cantidad de calor actualmente acumulado en dicho yacimiento.

### **2.1.4 Método Volumétrico**

El método volumétrico está basado en el cálculo de la energía térmica contenida en el volumen de roca correspondiente a la zona en evaluación. Entre los muchos autores que han descrito y utilizado este método se encuentran Nathenson y Muffler (1975), Muffler y Cataldi (1978) y Brook y Otros (1979).

Aquí se presentará la metodología descrita por Brook y Otros para estimar la cantidad de energía eléctrica que se podría generar aprovechando los fluidos de sistemas hidrotermales que presentan temperaturas superiores a los 150 °C. Esta descripción se restringirá a detallar los pasos a seguir en la evaluación de sistemas geotérmicos del tipo líquido dominante, ya que mundialmente son los más frecuentes. En Latinoamérica solamente uno parece ser del tipo dominado por vapor (Copahue, Argentina). Nathenson (1978) y Brook y Otros (1979) dan mayores detalles de cómo se desarrolló la metodología que se describe a continuación, cómo aplicar métodos estadísticos a la misma y cómo estimar el potencial geotérmico de sistemas dominados por vapor.

El primer paso en la determinación del potencial de un sistema geotérmico consistirá en establecer su Recurso Base Accesible (RBA), seguido por la determinación de su Recurso Geotérmico (RG) y por el cálculo de la cantidad de electricidad que se podría generar en base al mismo.

Es conveniente volver a recalcar que los valores que se obtienen empleando los métodos volumétricos son solamente estimativos. Esto se debe a que algunos de los parámetros utilizados en los cálculos son inferidos, y posiblemente puedan diferir de los que se obtengan en el futuro una vez que se hayan perforado pozos profundos de exploración y/o de desarrollo y analizado los resultados de sus pruebas y mediciones.

#### 2.1.4.1 Recurso Base Accesible

El Recurso Base Accesible (RBA) de un sistema hidrotermal es la cantidad de calor almacenado en el mismo y que puede ser alcanzado mediante pozos. Este valor se determina calculando la energía térmica contenida dentro de un volumen dado de rocas y fluidos (volumen que se denomina "el yacimiento"), tomando 15 °C como temperatura base de referencia. Considerando las diferentes características que puedan tener distintas regiones de la corteza en el área de interés, éstas se pueden dividir en subvolúmenes.

Dicho volumen (o volúmenes) se extiende desde la cima del yacimiento hasta los 3000 m de profundidad. Brook y Otros en 1979 consideraron que el elevado costo de pozos de más de 3 km tiende a hacerlos antieconómicos, y en general esta premisa continúa siendo válida en la actualidad. El RBA de Brook y Otros corresponde a lo que White y Williams (1975) y Renner y Otros (1975) llamaron "Recurso Base"; sin embargo, éste difiere del RBA definido por Muffler y Cataldi. Brook refiere el RBA a un determinado intervalo de profundidades mientras que Muffler y Cataldi al volumen comprendido entre la superficie y una profundidad dada (no necesariamente 3 km).

Al estimar el RBA se considera sólo el calor almacenado actualmente en el yacimiento y no se incluye la recarga térmica que pudiera

existir. Esto se debe a la falta de datos y a la incertidumbre que existe sobre la magnitud de dicha recarga durante la vida de un proyecto geotérmico. Una cuantificación de la recarga sólo se podrá obtener en etapas avanzadas del proyecto, una vez que se haya perforado un número apreciable de pozos y realizado estudios de modelado del yacimiento. Pero en dichas etapas, la estimación del RBA sólo es de interés secundario y es mucho más importante diseñar planes de manejo del yacimiento que optimicen la explotación del sistema geotérmico.

Lo anterior significa que, al no tomar en cuenta una posible recarga durante la vida del proyecto, el RBA que se calcula con el método de Brook y Otros corresponde a un valor mínimo del calor, y que éste podría aumentar a medida que se conozcan más detalles sobre el sistema.

#### Cálculo del Recurso Base Accesible

La cantidad de energía térmica almacenada en el yacimiento ( $q_y$ ), o sea el Recurso Base Accesible, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$q_y = C_v * A * E * (T - T_r)$$

donde,

$q_y$	=	Energía térmica acumulada en el yacimiento (J)
$C_v$	=	Capacidad calorífica del yacimiento por unidad de volumen, incluyendo roca y fluidos ( $2.7 * 10^6$ J/m <sup>3</sup> - °C)
A	=	Area del yacimiento (m <sup>2</sup> )
E	=	Espesor del yacimiento (m)
T	=	Temperatura del yacimiento (°C)
$T_r$	=	Temperatura base de referencia (15 °C)

La capacidad calorífica por unidad de volumen ( $C_v$ ) se calcula considerando valores característicos para yacimientos geotérmicos o sea utilizando una porosidad de 15% y una capacidad térmica volumétrica para la roca de  $2.5 * 10^6$  J/m<sup>3</sup> - °C. La temperatura base de referencia (15 °C) corresponde al promedio anual de la temperatura de la superficie de los EE.UU. (Brook y Otros, 1979). Estos valores se pueden ajustar de acuerdo a las características del sistema que se vaya a evaluar.

**Estimación del área.**- De acuerdo a Brook y Otros la mayor incertidumbre en la estimación del RBA está asociada con el área del yacimiento, la cual generalmente se infiere basándose en los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se tengan.

En zonas geotérmicas donde la existencia del yacimiento está basada en la presencia de una sola manifestación (o grupo de manifestaciones restringidas a una zona pequeña), se supone que el área más probable es de 2 km<sup>2</sup>. Si se tiene información sobre

varias manifestaciones que presenten características químicas similares, localizadas en una zona con geología superficial que sugiera que provienen del mismo yacimiento, se considera el área que incluye a dichas manifestaciones.

En algunos casos la extensión del yacimiento a profundidad, se podría inferir en base al tamaño del área con alteración hidrotermal que se observa en la superficie, a la extensión de la zona que presenta flujos o gradientes térmicos elevados, o al área que cubra las anomalías geofísicas (por ej., de resistividad).

**Cálculo del espesor.**- Para simplificar la estimación del volumen del yacimiento se considera que éste tiene un espesor uniforme. Debido a que en el cálculo del RBA se supone una profundidad máxima de 3 km (salvo que haya información que indique lo contrario), se considera que la base del yacimiento se encuentra a dicha profundidad.

En la etapa de prefactibilidad la localización de la cima del yacimiento se podría inferir con base a resultados de estudios geofísicos o a datos obtenidos en pozos de usos múltiples, si los hubiera. Los registros de la temperatura de los pozos de gradiente son también muy útiles para este propósito. Si no se tuviera este tipo de información, Brook y Otros proponen que se considere como la profundidad más probable de la cima, 1,5 km.

Basándose en lo anterior y suponiendo que el yacimiento se extiende hasta los 3 km de profundidad, Brook y Otros indican que 1,5 km es el espesor más probable para el yacimiento. Hay que indicar que la incertidumbre que existe sobre el espesor es normalmente menor que la correspondiente al área del yacimiento.

**Estimación de la temperatura.**- Generalmente durante las etapas previas a la factibilidad la temperatura del yacimiento se estima utilizando geotermómetros químicos. Estos métodos se basan en las reacciones entre rocas y fluidos, que dependen de la temperatura y que controlan la composición química e isotópica de los fluidos geotérmicos.

En este documento no se presenta la aplicación de diferentes geotermómetros y las precauciones que hay que tener al utilizarlos, ya que esto ha sido discutido en detalle por muchos autores (por ej., Henley y Otros, 1984; UNITAR/UNDP, 1991).

#### 2.1.4.2 Recurso Geotérmico

El Recurso Geotérmico (RG) es sólo una fracción del RBA y corresponde a la energía térmica que se puede recuperar del sistema a nivel boca de pozo, tomando en cuenta factores tecnológicos y económicos.

## Estimación del Recurso Geotérmico

Debido a razones físicas, técnicas y económicas no toda la energía térmica acumulada en el yacimiento puede ser aprovechada. El Recurso Geotérmico (RG) de un sistema de tipo líquido dominante, se calcula utilizando un Factor de Recuperación Geotérmico (FRG) que se define como la razón entre la energía que se puede extraer a nivel boca de pozo ( $q_{gp}$ ) y la energía contenida originalmente en el yacimiento ( $q_v$ ), o sea:

$$FRG = q_{gp} / q_v$$

Este factor refleja las limitaciones físicas y tecnológicas que impiden la extracción de toda la energía térmica acumulada en el yacimiento (referida a 15 °C), y por lo tanto representa la eficiencia de la recuperación de dicha energía.

Para sistemas dominados por líquido, el valor del FRG se calcula basándose en modelos de extracción térmica de tipo flujo intergranular o de barrido (Bodvarsson, 1974; Nathenson, 1975). En las Figuras Nos. 3 y 4 se presentan valores teóricos para el FRG, en función de la temperatura y porosidad del yacimiento. Debido al comportamiento no ideal de los sistemas geotérmicos, en la práctica los factores de recuperación son menores; Nathenson y Muffler (1975), y Brook y Otros (1979) proponen que el valor del FRG sea 0,25.

En una planta geotermoeléctrica se convierte parte de la energía térmica contenida en los fluidos geotérmicos a energía mecánica, la que luego se utiliza para generar energía eléctrica. Aún bajo condiciones ideales, durante la conversión de energía térmica a mecánica (o trabajo) siempre se pierde algo de calor al medio ambiente. Basándose en principios termodinámicos se demuestra que existe una cantidad máxima de trabajo, llamada trabajo útil ( $W_u$ ), que se puede obtener de cierta cantidad de energía térmica.

Para campos de líquido dominante el factor (o eficiencia) de conversión ideal (FCI) de energía térmica a mecánica empleando un ciclo de vapor, puede obtenerse aproximadamente mediante la relación (Paolo Liguori, com. pers., 1993):

$$FCI = (T - T_r) / (T + T_r + 546)$$

donde  $T_r$  es la temperatura base de referencia (en °C).

El resultado de los cálculos realizados por Brook y Otros y los obtenidos mediante la fórmula anterior están dados en la figura No. 5, en la que se gráfica la razón entre el trabajo útil ( $W_u$ ) y la energía térmica acumulada en el yacimiento ( $q_v$ ) contra la temperatura del yacimiento ( $T$ ). En la figura se muestra una curva para una profundidad (promedio) del yacimiento ( $Z_v$ ) de 3 km y otra para 1 km (de Brook y Otros, 1979) y curvas para temperaturas de

referencia ( $T_r$ ) de 15 y 40 °C, respectivamente (Paolo Liguori, com. pers., 1993). Hay que recalcar que en dichos cálculos se incluyó un factor de recuperación (FRG) igual a 0,25.

La energía eléctrica (E) que se puede obtener del trabajo útil está dada por el Factor de Utilización (FU), que representa la eficiencia de la conversión efectiva respecto a la ideal, tal que:

$$E = FU * Wu$$

Este factor es menor que 1 debido a las pérdidas que ocurren durante el proceso de conversión, aún respecto a la conversión ideal (FCI). El valor de FU depende de la temperatura del fluido y del ciclo de trabajo utilizado. Brook y Otros calcularon el valor de FU para diferentes ciclos y temperaturas del yacimiento o a boca de pozo (Figura No. 6). Para sistemas de líquido dominante con temperaturas mayores de 150 °C, un valor de FU de 0,4 se considera representativo. Para dichas temperaturas y utilizando ciclos de vapor, el valor de FU varía entre 0,5 y 0,6 (Paolo Liguori, com. pers., 1993).

El proceso global de la evaluación, desde el Recurso Base Accesible hasta la energía eléctrica disponible, está ilustrado en la figura No. 7 desarrollada por Paolo Liguori (com. pers., 1993).

### 3. CONCLUSIONES

En el desarrollo de proyectos geotérmicos uno de los estudios más importantes es la evaluación del potencial energético (en MWe-años o GJ) y de la vida económicamente útil del campo. En las etapas más avanzadas de factibilidad, desarrollo y operación de los proyectos, esto se realiza mediante la aplicación de métodos complejos pero confiables, basados en modelos matemáticos que utilizan la información proveniente de estudios de superficie y de pozos profundos terminados en el yacimiento.

Sin embargo en las etapas iniciales de un proyecto (reconocimiento y prefactibilidad) cuando la cantidad de información que se dispone del sistema geotérmico es limitada, el potencial de un posible yacimiento sólo puede evaluarse mediante métodos basados en estimaciones sobre las dimensiones, temperaturas, porosidades y otros parámetros del mismo, datos que generalmente no se conocen con precisión durante las etapas previas a las de factibilidad y desarrollo del campo. Para ello, se aplican uno o más de los métodos descritos en este documento, utilizando datos preliminares sobre muchas de las características geológicas y fisicoquímicas del sistema geotérmico.

De acuerdo con algunos autores como Muffler y Cataldi, cualquiera de los cuatro métodos aquí descritos, si bien son simples en su aplicación no son totalmente satisfactorios. De ellos, en general

parece existir una mayor preferencia por emplear el método volumétrico por ser el más riguroso y el más utilizado.

Tomando en cuenta que durante las etapas de reconocimiento o de prefactibilidad de un proyecto geotérmico generalmente no se dispone de datos de pozos profundos, al estimar el potencial energético con alguno de los métodos señalados anteriormente, se tendrá que considerar que la cantidad evaluada podrá diferir ampliamente de la que realmente podría obtenerse durante las fases ulteriores de desarrollo del proyecto. Esto es debido a la imprecisión de los métodos aplicados y al comportamiento del yacimiento que puede variar, entre otras cosas, con el ritmo de explotación del sistema y la densidad de pozos en operación.

#### 4. REFERENCIAS

- Barberi, F. y Marinelli, G., 1987. Recientes Progresos en la Vulcanología Aplicada a la Exploración Geotérmica. Revista Energética, OLADE, Vol. 11, No. 2, pp. 91-115.
- Barberi, F., Cataldi, R. y Merla, A., 1987. Resources and Development Perspective of Geothermal Energy in Central and South America. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 5, No. 2, pp. 245-265.
- Barker, B.H. y McBirney, A.R., 1985. Liquid Fractionation. Part III: Geochemistry of Zoned Magmas and the Compositional Effects of Liquid Fractionation. Journal Volcanology and Geothermal Research, Vol. 24, pp. 55-81.
- Bodvarsson, G., 1974. Geothermal Resource Energetics. Geothermics, Vol. 3, No. 1, pp. 83-92.
- Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti M. y Muffler, L.J.P., 1979. Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures > 90 °C, en Assessment of Geothermal Resources of the United States (L.J.P. Muffler, editor). U.S. Geological Survey Circular 790, pp. 18-85.
- Carmichael, I.S.E., Turner, F.J. y Verhoogen, J., 1974. Igneous Petrology. McGraw-Hill, New York, 739 p.
- Cortini, M., Lima A. y De Vivo B., 1985. Trapping Temperatures of Melt Inclusions from Ejected Vesuvian Mafic Xenoliths. Journal Volcanology and Geothermal Research, Vol. 26, pp. 167-172.
- de Boer, J., 1979. Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes Volcanic Domes in the Northern Part of the Gulf of California Rhombochasm. Actas Segundo Simposio sobre el Campo de Cerro Prieto, Baja California, México, Octubre 17-19, Mexicali, BCN, México, Comisión Federal de Electricidad, pp. 91-102.
- Donnelly-Nolan, J.M., 1988. A Magmatic Model of Medicine Lake Volcano, California. Journal of Geophysical Research, Vol. 93, No. B5, pp. 4412-4420.
- Dorn, R.I. y Otros, 1990. Dating Rock Varnishes by the Cation Ratio Method with PIXE, ICP, and the Electron Microprobe. International Journal of PIXE, Vol. 1, pp. 157-195.
- Elders, W.A., Bird, D.K., Williams, A.E. y Shiffman, P., 1984. Hydrothermal Flow Regime and Magmatic Heat Source of the Cerro Prieto Geothermal System, Baja California, México. Geothermics, Vol. 13, pp. 27-47.

Faure, G., 1986. The Principles of Isotope Geochemistry, 2nd. Edition. John Wiley and Sons, New York.

Goldstein, N.E. y Flexer, S., 1984. Melt Zones Beneath Five Volcanic Complexes in California: An Assessment of Shallow Magma Occurrences. Lawrence Berkeley Laboratory Informe LBL-18232, 134p.

González P., E. y Otros, 1991. Informe Final del Estudio Geovulcanológico sobre Ahuachapán-Chipilapa. Informe VNG-IF-003-C5-2 Preparado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa, abril 1991.

Grigsby, C.O., Goff, F., Trujillo, P.E., Jr., Counce, D.A., Dennis, B., Kolar, J. y Corrales, R., 1989. Resultado de las Investigaciones en el Campo Geotérmico de Miravalles, Costa Rica. Parte 2: Muestreo de Fluidos Pozo Abajo. Los Alamos National Laboratory Informe LA-11510, 51 p.

Harjono, H. y Otros, 1989. Detection of Magma Bodies Beneath Krakatau Volcano (Indonesia) from Anomalous Shear Waves. Journal Volcanology and Geothermal Research, Vol. 39, pp. 335-348.

Henley, R.W. y Ellis, A.J., 1983. Geothermal Systems Ancient and Modern: A Geochemical Review. Earth Sciences Review., Vol. 19, pp. 1-50.

Henley, R.W., Truesdell, A.H., Barton, P.B., Jr. y Whitney, J.A., 1984. Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, Vol.1, 267 p.

ICE, 1991. Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad, Informe Interno, Noviembre 1991.

Muffler, L.J.P. y Cataldi, R., 1978. Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources. Geothermics, Vol. 7, pp. 53-90.

Nathenson, M., 1975. Physical Factors Determining the Fraction of Stored Energy Recoverable from Hydrothermal Convection Systems and Conduction-Dominated Areas. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-525, 35 p.

Nathenson, M., 1978. Methodology of Determining the Uncertainty in the Accessible Geothermal Resource Base of Identified Hydrothermal Convection Systems. U.S. Geological Survey Open-File Report 78-1003, 51 p.

Nathenson, M. y Muffler, L.J.P., 1975. Geothermal Resources in Hydrothermal Convection Systems and Conduction-Dominated Areas, en Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975 (D.E.

White y D.L. Williams, Edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 104-121.

Renner, J.L., White, D.E. y Williams, D.L., 1975. Hydrothermal Convection Systems, en Assessment of Geothermal Resources of the United States - 1975 (D.E. White y Williams, D.L., edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 5-57.

Rieck, H.J., Sarna-Wojcicki, A.M., Meyer, C.E. y Adam, D.P., 1992. Magnetostratigraphy and Tephrochronology of an Upper Pliocene to Holocene Record in Lake Sediments at Tulare, Northern California. Geological Society of America Bulletin, Vol. 104, pp. 409-428.

Rivera R., J., 1983. Aplicaciones de la Ingenieria de Yacimientos en la Evaluación de un Campo Geotérmico. Trabajo Presentado Durante el Seminario Latinoamericano sobre Exploración Geotérmica, Quito, Ecuador, 5-9 de septiembre.

Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol. 12, Mineralogical Society of America, 544 p.

Smith, R.L. y Shaw, H.R., 1975. Igneous-Related Geothermal Systems, en Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975: (D.E. White y D.L. Williams, edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 58-83.

Smith, R.L. y Shaw, H.R., 1979. Igneous-Related Geothermal Systems, en Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978: (L.J.P. Muffler, editor). U.S. Geological Survey Circular 790, pp. 12-18.

Steen-McIntyre, V., 1977. A Manual for Tephrochronology. Colorado School of Mines, 167 p.

Tsukui, M., 1985. Temporal Variation in Chemical Composition of Phenocrysts and Magmatic Temperatures at Daisen Volcano, Southwest Japan. Journal Volcanology and Geothermal Research, Vol. 26, pp. 317-336.

UNITAR/UNDP, 1991. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (F. D'Amore, coordinador). UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Roma, Italia, 408 p.

White, D.E. y Williams, D.L., edits., 1975. Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975. U.S. Geological Survey Circular 726, 155 p.

Tabla No. 1      PROBLEMAS GEOTECNICOS QUE AFECTAN LOS COSTOS DE UN  
PROYECTO DE EXPLOTACION GEOTERMICA

LOCALIZACION DE LAS OBRAS

- . Acceso
- . Condiciones climáticas/Elevación
- . Erosión/Inestabilidad del terreno
- . Suministro de agua y demás servicios

PERFORACION Y/O TERMINACION DE POZOS

- . Formaciones inestables
- . Altas presiones de fluido (especialmente a profundidades someras)
- . Zonas de pérdida de circulación (frecuentes e importantes)

FLUIDOS

- . Alto contenido de sales y/o gases disueltos
- . Características corrosivas y/o incrustantes

CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO

- . Baja permeabilidad de la formación (bajos índices de productividad y/o inyektividad de los pozos)
- . Rápida recarga de aguas subterráneas frías (entrada de aguas frías en los pozos productores)
- . Precipitación de minerales en los poros y/o fracturas del yacimiento (reducción de porosidad y permeabilidad)

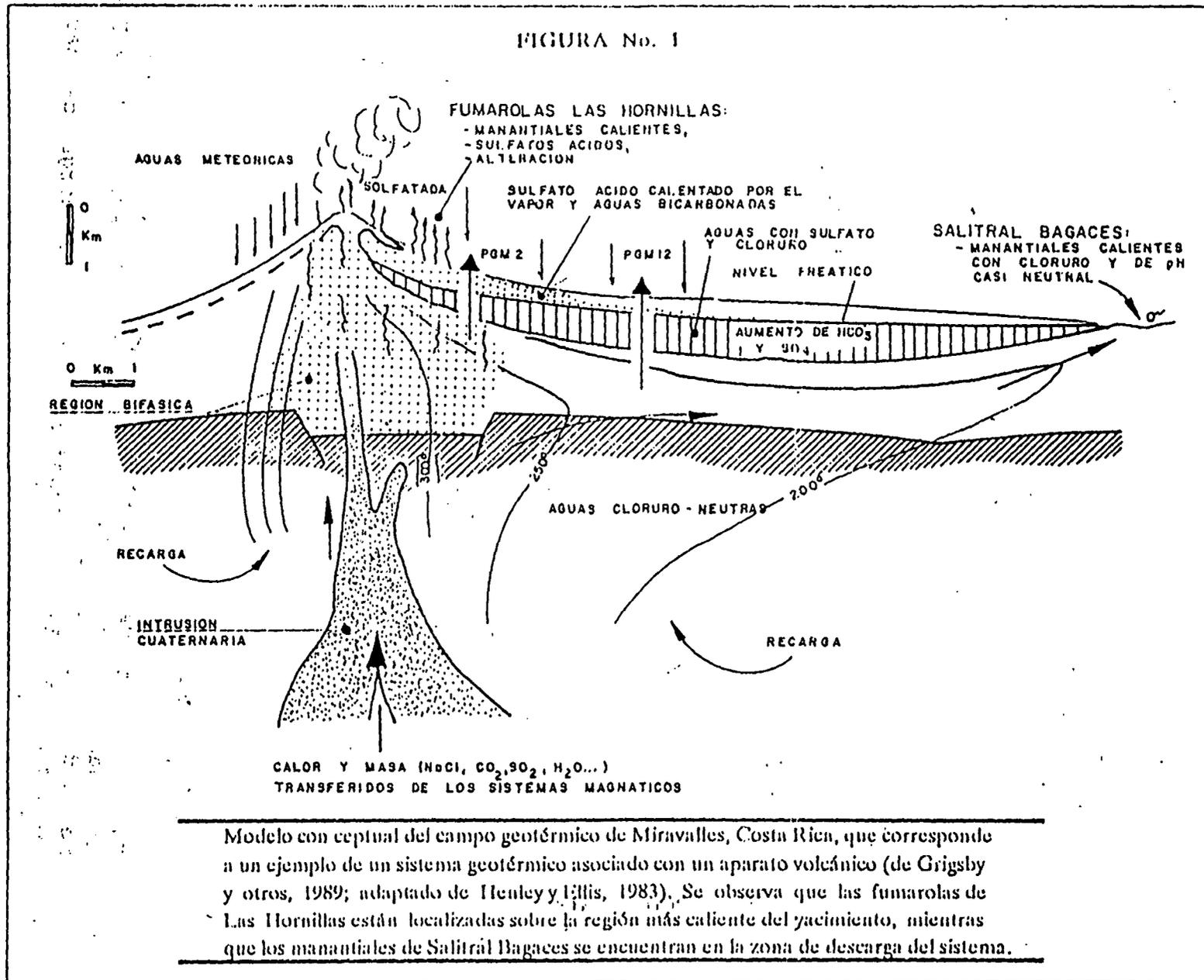
POZOS Y SUS TUBERIAS

- . Incrustación
- . Corrosión
- . Colapsos y fracturas

MEDIO AMBIENTE

- . Contaminación de acuíferos o cuerpos de agua por la eliminación de salmueras geotérmicas en la superficie o por medio de su inyección
- . Contaminación de la atmósfera por la descarga de gases incondensables
- . Asentamiento del terreno

FIGURA No. 1



Modelo conceptual del campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, que corresponde a un ejemplo de un sistema geotérmico asociado con un aparato volcánico (de Grigsby y otros, 1989; adaptado de Henley y Ellis, 1983). Se observa que las fumarolas de Las Hornillas están localizadas sobre la región más caliente del yacimiento, mientras que los manantiales de Salitral Bagaces se encuentran en la zona de descarga del sistema.

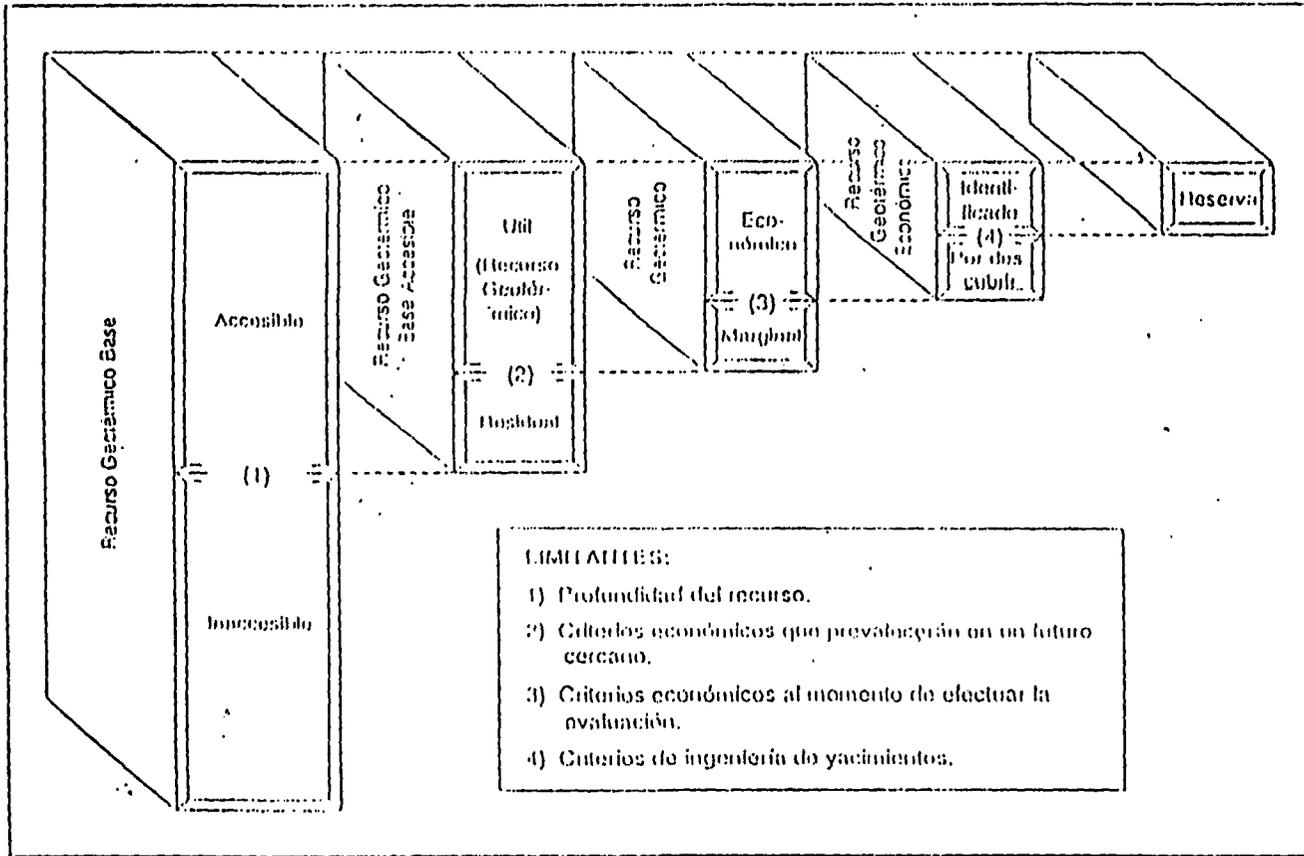


Figura No. 2 Concepto de Reserva Geotérmica de acuerdo con limitantes tecnológicas y económicas (de Rivera, 1983).

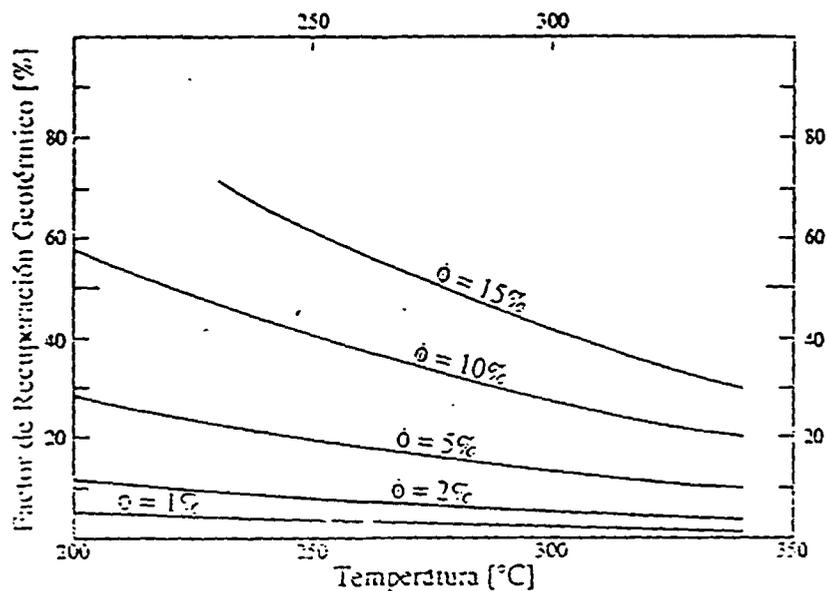


Figura No. 3 Factores de Recuperación Geotérmicos (FRG) teóricos (relativos a 40 °C) dados en función de la temperatura y porosidad ( $\phi$ ) del y Cataldi, 1978). Estos valores deberán ser considerados como límites superiores, ya que los factores verdaderos que se obtiene en la práctica son inferiores.

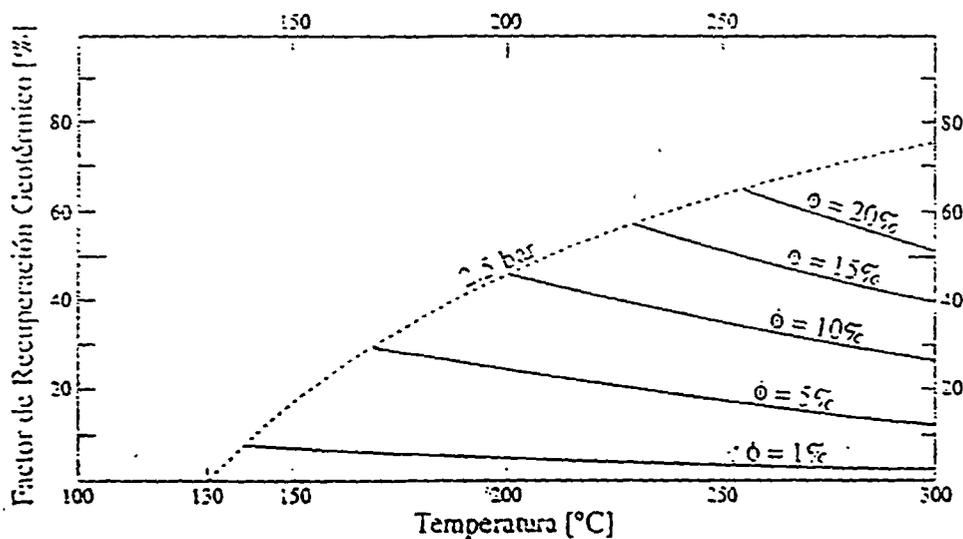


Figura No. 4 Factores de Recuperación Geotérmicos (FRG) teóricos (relativos a 15 °C) dados en función de la temperatura y porosidad ( $\phi$ ) del yacimiento. La curva punteada corresponde a una presión final límite de 2,5 bar (de Muffler y Cataldi, 1978). Estos valores deberán ser considerados como límites superiores, ya que los factores verdaderos que se obtiene en la práctica son inferiores.

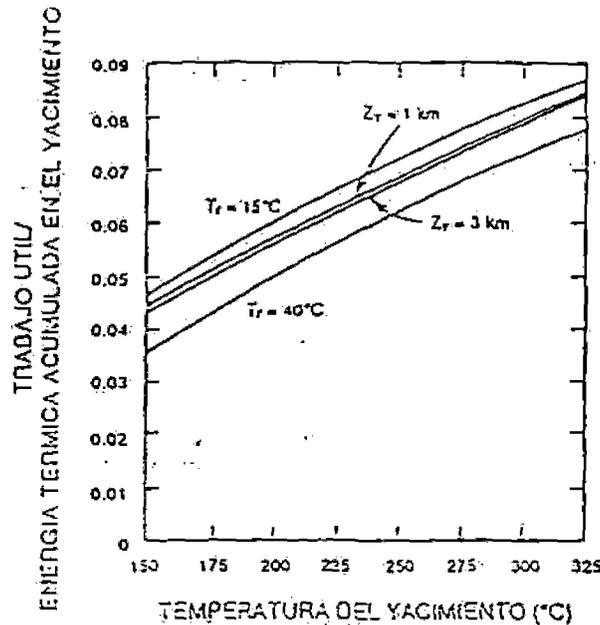


Figura No. 5 Razón de trabajo útil ( $W_u$ ) y la energía acumulada en el yacimiento ( $q_Y$ ) versus su temperatura, para sistemas geotérmicos de tipo líquido dominante. Dos curvas corresponden a diferentes profundidades promedio del yacimiento ( $Z_Y$ ; de Brook y Otros, 1979) y otras dos a diferentes temperaturas de referencia ( $T_r$ ; de Paolo Liguori, com. pers., 1993). Para calcular  $W_u$  fue utilizado un Factor de Recuperación Geotérmico igual a 0,25.

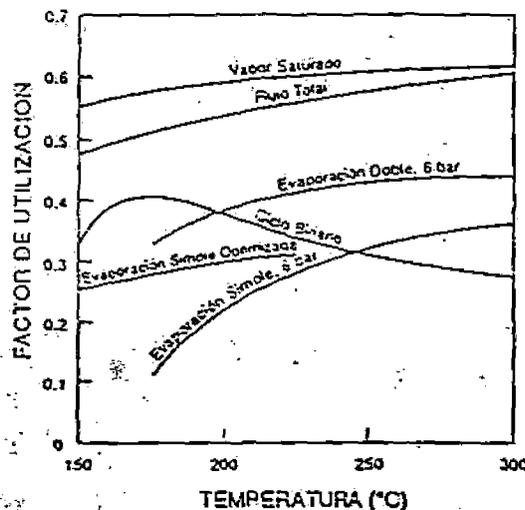


Figura No. 6 Factor de Utilización (FU) para diferentes ciclos de trabajo eléctrico y temperaturas (los distintos ciclos se muestran para ilustrar su comportamiento en general). Para vapor saturado la temperatura es la medida en el cabezal del pozo. Para sistemas de líquido dominante la temperatura corresponde a la entalpía en el cabezal del pozo, considerando que el fluido es agua líquida. Para todos los ciclos se supone que la temperatura de condensación es de 40 °C. Para los ciclos de evaporación instantánea simple o doble se considera que la primera etapa de separación se realiza a una presión 6 bars, o sea que dichos ciclos son sólo apropiados para temperaturas mayores de 200 °C, aproximadamente (de Brook y Otros, 1979).

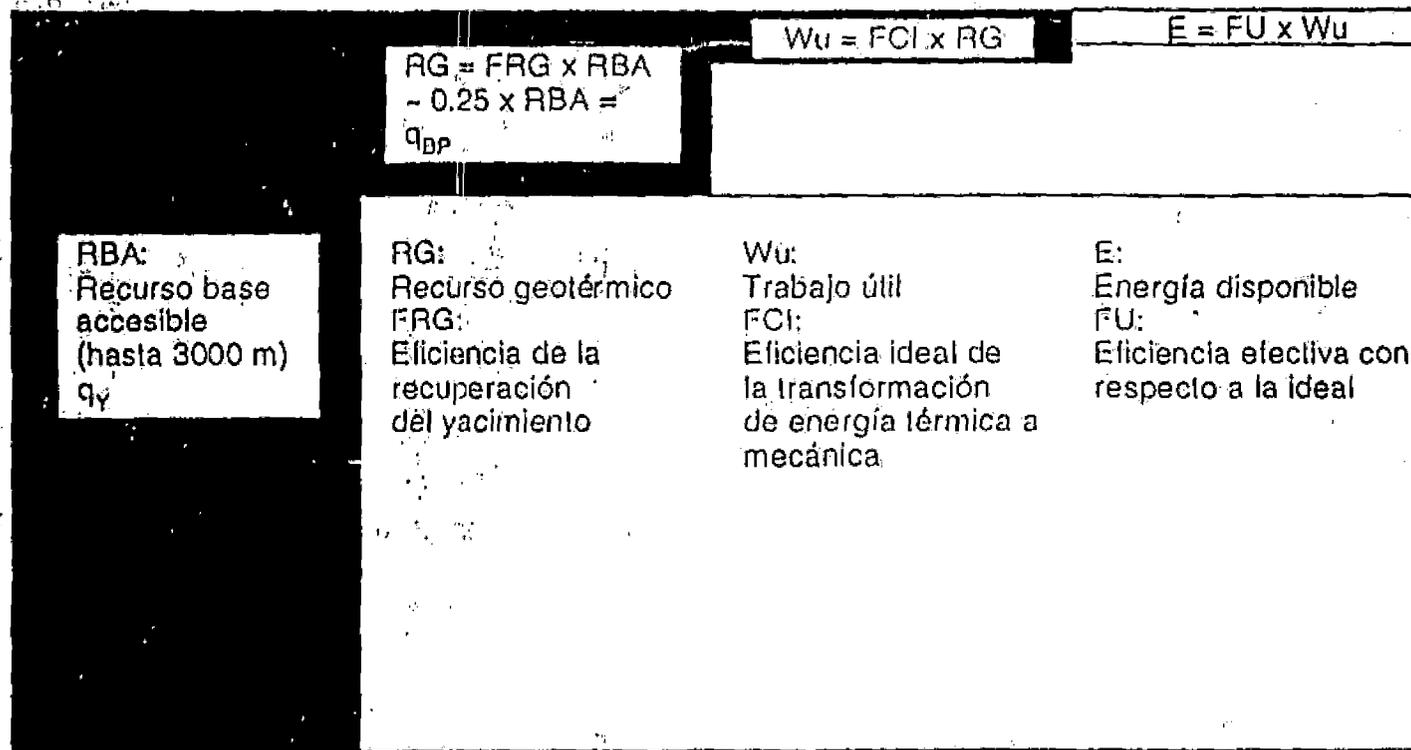


Figura No. 7 Proceso global de evaluación del potencial energético (de Paolo Liguori, com. pers., 1993).

Ecuador

OLADE  
ORGANIZACION LATINOAMERICANA  
DE ENERGIA

BID  
BANCO INTERAMERICANO  
DE DESARROLLO

GUIA PARA  
ESTUDIOS DE RECONOCIMIENTO Y  
PREFACTIBILIDAD GEOTERMICOS

Quito, Ecuador  
Septiembre, 1993



Preparada bajo el Convenio No Reembolsable BID/OLADE ATN-SF-3603-RE.

BID

---

Banco Interamericano de Desarrollo (BID)  
Av. Amazonas 477 y Roca,  
Edificio Banco de los Andes, 9no. Piso.  
Casilla 741A, Quito, Ecuador  
Teléfonos: 550-011 / 562-141,  
Facsimile: 593-2-564660

OLADE

---

Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)  
Av. Occidental, Sector San Carlos OLADE,  
Casilla:17-11-6413, Quito, Ecuador  
Teléfonos: 538-280 / 539-676,  
Télex: 2-2728 OLADE ED, Facsimile: 593-2-539685

## PRESENTACION

La presente "Guía para Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos", forma parte de un grupo de documentos cuyo objetivo es suministrar a los países de la Región un instrumento que les permita conocer, investigar y aprovechar sus recursos geotérmicos, como una fuente alterna que les lleve a satisfacer al menos parcialmente sus requerimientos de energía.

La elaboración de ésta y otras guías para la exploración y explotación, nació del interés y esfuerzo conjunto de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para apoyar el desarrollo energético de la Región mediante la ejecución de un convenio de cooperación.

El documento que aquí se presenta, aborda los aspectos metodológicos que involucran los estudios de reconocimiento y prefactibilidad, correspondientes a las etapas iniciales de la investigación geotérmica. En él se han incluido los avances tecnológicos más significativos, señalando las técnicas más efectivas y de menor costo en la identificación de las principales zonas geotérmicas y en la determinación de los posibles yacimientos.

Estamos convencidos que el uso adecuado de esta guía redundará en el conocimiento de los recursos geotérmicos en los países de la Región, permitiendo su aprovechamiento y coadyuvando a la diversificación de las fuentes de energía.

OLADE y el BID manifiestan su reconocimiento a la labor de los señores: Prof. Giorgio Pasquare, Ing. Mauricio Retaña, Dr. Norman Goldstein, Fís. Salvador García, Dr. David Nieva y Dr. Alfred Truesdell, quienes con la coordinación del Ing. Antonio Razo, Jefe del Programa de Geotermia de OLADE, tuvieron la responsabilidad de la elaboración del presente documento. Asimismo, agradecen las aportaciones de los Ingenieros Saúl Venegas y Luca Ferrari en parte de los temas sobre geología tratados en esta guía.

## INDICE

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA	2
3. METODOLOGIA PARA LA EXPLORACION GEOTERMICA	9
3.1 Etapas de un Proyecto Geotérmico	9
3.2 Desarrollo de un Proyecto Geotérmico Tipo	11
4. ESTUDIO DE RECONOCIMIENTO GEOTERMICO	12
4.1 Objetivos Generales	13
4.2 Fases del Estudio	13
4.3 Estudios Especificos	18
4.3.1 Geología	18
4.3.2 Geoquímica	31
4.3.3 Geofísica	42
4.3.4 Hidrogeología	51
4.3.5 Aspectos Ambientales	57
4.4 Integración Geocientífica	61
4.5 Resultados	62
4.5.1 Areas de Interés Geotérmico y Prioridades	62
4.5.2 Estimación Preliminar del Potencial Energético	63
4.5.3 Preparación de un Proyecto para la Etapa de Prefactibilidad	66
4.6 Infraestructura Requerida	68
5. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	69
5.1 Objetivos Generales	70
5.2 Metodología	71
5.2.1 Planificación, Organización y Supervisión	72
5.2.2 Revisión de Resultados del Reconocimiento	74
5.2.3 Aspectos Logísticos	74
5.2.4 Definición de Puntos de Revisión y Toma de Decisiones	75

	Página
5.3 Estudios Especificos	76
5.3.1 Geología	76
5.3.2 Geoquímica	90
5.3.3 Geofísica	96
5.3.4 Hidrogeología	108
5.4 Integración Geocientífica Preliminar	114
5.5 Perforación Exploratoria de Diámetro Reducido	116
5.5.1 Pozos de Gradiente	117
5.5.2 Perforación Profunda de Diámetro Reducido	120
5.5.3 Tiempos y Costos de la Perforación	129
5.6 Integración Geocientífica	130
5.7 Resultados	131
5.7.1 Modelo Conceptual del Sistem Geotérmico	131
5.7.2 Evaluación del Potencial Energético Probable	132
5.8 Consideraciones Ambientales	135
5.8.1 Examen Inicial Ambiental	135
5.8.2 Alcances y Actividades	136
5.8.3 Resultados	137
5.8.4 Requerimiento de Personal, Tiempo y Costos	138
5.9 Preparación de un Documento de Proyecto para la Etapa de Factibilidad	139
5.10 Infraestructura Requerida	140
5.10.1 Recursos Humanos	140
5.10.2 Recursos Fisicos	142
5.11 Tiempos y Costos	143
6. BIBLIOGRAFIA	145

## FIGURAS

Figura No. 1	Etapas de la Ejecución de un Proyecto Geotérmico	10
Figura No. 2	Determinación de la Temperatura Estabilizada de un Pozo	126

## TABLAS

Tabla No. 1	Resumen de Requerimientos de Recursos Humanos y Materiales para la Etapa de Reconocimiento	32
Tabla No. 2	Resumen de Tipos de Aguas Naturales, de su Origen y de la Información Obtenible	34
Tabla No. 3	Resumen de Tipos de Aguas Naturales y Requerimientos de Observación y Análisis	37
Tabla No. 4	Resumen de la Información a Generar durante la Etapa de Reconocimiento	41
Tabla No. 5	Información a ser Considerada en un Examen Ambiental Inicial	60

## 1. INTRODUCCION

Basado en los objetivos de: a) promover acciones para el aprovechamiento y defensa de los recursos naturales de los Países Miembros y de la Región en conjunto, y b) fomentar una política para la racional explotación, transformación y comercialización de los recursos energéticos, OLADE, ante la crisis del petróleo en la década de los años setenta, inició en 1978 un programa de actividades encaminado a fomentar la investigación y el aprovechamiento de la geotermia en los Países Miembros, como un recurso alterno de las fuentes convencionales de energía.

Para alcanzar tal fin, una de las primeras acciones de la Organización fue integrar una metodología para la exploración y explotación geotérmica, adaptable a las condiciones y características de los países de América Latina y el Caribe.

Contando con la colaboración de diversas instituciones y expertos tanto de la Región como de fuera de la misma, OLADE elaboró en 1978 la "Metodología de Exploración Geotérmica para las Fases de Reconocimiento y Prefactibilidad", en 1979 la "Metodología de la Exploración Geotérmica para la Fase de Factibilidad", y en 1980 la "Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica para las fases de Desarrollo y Explotación". Posteriormente, esta última, una vez revisada, complementada y actualizada, dio lugar a la "Metodología de la Explotación Geotérmica" que la Organización editó el año 1986.

La disponibilidad de tales metodologías, permitió a los países de la Región orientar la investigación y aprovechamiento de sus recursos geotérmicos, con una herramienta útil y de fácil aplicación. Haití, Ecuador, Perú, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Jamaica, Colombia y Panamá, entre otros países, realizaron con el apoyo de OLADE y sus metodologías, reconocimientos geotérmicos en sus territorios. Nicaragua, Panamá, Ecuador-Colombia, Haití y Guatemala, también con la intervención de la misma Organización, desarrollaron estudios de prefactibilidad en algunas áreas termales en las que observaron condiciones favorables para llegar a constituirse en campos geotérmicos.

La aplicación de las metodologías de OLADE en la Región, coadyuvó a incrementar el conocimiento de los países sobre sus recursos geotérmicos, al grado que para fines de la década de los años ochenta, 20 de los 26 Países Miembros contaban ya con estudios de reconocimiento, 17 países habían ejecutado estudios de prefactibilidad, 8 países estudios de factibilidad y 4 se encontraban ya generando electricidad mediante la explotación de algunos de sus campos geotérmicos. Sin embargo, el rápido desarrollo tecnológico de la geotermia mostró la necesidad de actualizar las metodologías.

Tomando en cuenta que en diversos foros de carácter internacional la comunidad geotérmica advirtió la necesidad de revisar, modernizar e incluso complementar las metodologías de OLADE, esta Organización y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) decidieron mediante el Convenio de Cooperación Técnica ATN/SF-3603-RE, revisar las metodologías existentes y elaborar seis nuevas guías para la exploración y explotación geotérmica. Tales guías, atendiendo los requerimientos de los grupos técnicos de la Región, serían para: Estudios de Reconocimiento, Estudios de Prefactibilidad, Exploración de Factibilidad, Evaluación del Potencial Energético de Zonas Geotérmicas (con base en la información recopilada en las fases de reconocimiento y prefactibilidad), Operación y Mantenimiento de Campos y Plantas Geotérmicas, y Preparación de Proyectos de Inversión en Plantas Geotérmicas y de Uso Directo.

La elaboración de los nuevos documentos sobre geotermia, se llevó a cabo mediante la intervención de 7 consultores internacionales y 7 expertos de la Región, con amplia experiencia en geovulcanología, geoquímica, geofísica, perforación, ingeniería de yacimientos, operación y mantenimiento de campos y plantas geotérmicas, e ingeniería y diseño de plantas geotérmicas.

El esfuerzo de OLADE y el BID por contribuir en el desarrollo geotérmico de América Latina y del Caribe, se presenta parcialmente en este documento que contiene las guías para la ejecución de Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos, con el objetivo de poner a la disposición de los países un instrumento que les permita identificar y estudiar en sus etapas iniciales, los proyectos que eventualmente podrían ser incluidos en la planificación energética nacional.

## 2. ASPECTOS GENERALES DE LA GEOTERMIA

La palabra geotermia se refiere, en términos generales, al calor natural existente en el interior de la tierra; sin embargo, desde el punto de vista práctico, se le denomina así al estudio y utilización de la energía calorífica que por conducción a través de la roca o transportada por fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia niveles superficiales de la misma, para formar yacimientos geotérmicos. Al conjunto integrado por la fuente de calor, el fluido y la zona cortical donde se almacena o circula fluido geotérmico, se le denomina sistema geotérmico.

La energía almacenada en forma de calor en las rocas y en acuíferos situados cerca de la superficie, en ciertos casos es susceptible de ser aprovechada mediante la perforación de pozos de hasta 3 km de profundidad, en la generación de electricidad, calefacción, refrigeración, agricultura, acuicultura, la industria, etc. Cuando esto sucede en condiciones rentables, el yacimiento y las

instalaciones superficiales constituyen lo que se denomina campo geotérmico.

Si bien se conocen diversas fuentes generadoras de calor en el interior de la Tierra (debidas al decaimiento de minerales radioactivos, reacciones químicas, fricción, presión mecánica, etc.), la tectónica de placas y ciertos procesos que dan lugar a la formación y flujo de magma hacia la superficie (creando volcanes y calentando formaciones geológicas), constituyen el mecanismo más importante al cual se asocian genéticamente los yacimientos geotérmicos.

Las corrientes de convección en la astenósfera han originado placas oceánicas y continentales en la litosfera terrestre, que al chocar o separarse constituyen regiones geológicamente activas en las cuales se presentan los fenómenos de la subducción de placas o la formación de fisuras corticales. En el primer caso, la colisión e introducción de una placa por debajo de la otra, ha generado elevadas temperaturas y la fusión de roca, formando magma que en ocasiones fluye hasta la superficie para crear volcanes. En el segundo caso, al separarse la corteza por el movimiento divergente de las placas, el magma del manto asciende a través de la litosfera y se derrama en la superficie originando también vulcanismo.

La energía calorífica transportada hacia los niveles superiores de la corteza, en cualesquiera de las formas indicadas en el párrafo anterior, puede ser almacenada en la roca o en acuíferos localizados a unos cuantos kilómetros de profundidad, llegando a constituir yacimientos geotérmicos que a veces se manifiestan en la superficie en forma de volcanes de lodos, fumarolas, géysers, manantiales hidrotermales, suelos calientes, etc.

El agua meteórica que se infiltra a través de rocas permeables a grandes profundidades, en ocasiones puede descender varios kilómetros, ser calentada directa o indirectamente por cámaras magmáticas y llegar a constituir yacimientos geotérmicos de alta, media o baja entalpía.

Cuando las cámaras magmáticas son de edades recientes (menores de un millón de años) y de grandes dimensiones, pueden aún retener energía calorífica y bajo ciertas condiciones llegar a favorecer la formación de yacimientos geotérmicos de alta entalpía. Los cuerpos magmáticos de escaso tamaño y/o con edades de varios millones de años, generalmente no reúnen condiciones favorables para la formación de tales yacimientos, pero sí para los de baja y media entalpía.

El enfriamiento de un cuerpo magmático superficial se produce en tiempos que pueden variar entre los cientos de miles de años a algunos millones de años (Jaeger, 1968), según sean las dimensiones, la temperatura y la profundidad del cuerpo. Por ejemplo, un plutón intrusionado a 20 km de profundidad y con

temperatura de 1,000 °C llegará a cristalizar en un tiempo de 2 a 4 millones de años (Barton et. al., 1988). Esto implica que plutones de las características señaladas pueden constituir fuentes caloríficas favorables para la formación de yacimientos geotérmicos, si la edad de la intrusión es Cuaternaria. Caso similar sería el de las cámaras magmáticas diferenciadas, asociadas con zonas de vulcanismo ácido con edades preferentemente menores de 500,000 años.

La ausencia de manifestaciones volcánicas de edades recientes no necesariamente debe conducir a pensar que una región no tiene posibilidades geotérmicas; prueba de ello son algunos campos geotérmicos como Larderello en Italia y Heber en Estados Unidos. Es necesario considerar que en ambientes de arcos volcánicos la relación del material efusivo y el intrusivo es igual a 1:10 (Crisp, 1984; Shaw, 1985), y que una intrusión superficial puede no dar lugar a manifestaciones volcánicas.

#### **Características de los Campos Geotérmicos**

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

- Una anomalía térmica.
- Un yacimiento constituido por rocas permeables, donde circule fluido geotérmico a profundidades económicamente explotables.
- Una cobertura impermeable del yacimiento, que impida la pérdida de calor por circulación del fluido geotérmico hacia la superficie.

#### **Anomalía Térmica (Fuente de Calor)**

En regiones volcánicas, el calor requerido para la formación de un sistema geotérmico cerca de la superficie, puede ser suministrado 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 que ha alimentado un volcán o una caldera.

Partiendo de tal observación, deben considerarse áreas potencialmente geotérmicas aquellas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental (por ej. magmas ácidos diferenciados dentro de la corteza), o donde existen manifestaciones volcánicas que indican la presencia de cámaras magmáticas. Tales áreas se caracterizan por

la presencia de volcanes poligénicos con productos andesíticos, dacíticos o riolíticos, o calderas y complejos dómicos ácidos.

En cambio las áreas con mesetas y conos monogenéticos de basaltos se consideran menos interesantes, dado que el magma ha ascendido a la superficie de manera directa y rápidamente desde el manto a través de fisuras.

En la exploración de una región geotérmica, el problema de localizar una anomalía termal (fuente de calor) cerca de la superficie terrestre se afronta con métodos vulcanológicos, estructurales y petrológicos. Estos métodos ayudan a distinguir los centros volcánicos evaluando su significado en el cuadro estructural regional, estimando su edad con criterios morfológicos y estratigráficos o con medidas de la edad absoluta de las rocas mediante métodos radiométricos. Además permiten reconstruir a grandes rasgos la geometría de las unidades geológicas en el subsuelo.

Los 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 superficie, las cuales alimentan al vulcanismo. En casos favorables estos métodos pueden ser utilizados para estimar la temperatura de la cámara magmática.

La formación de cámaras magmáticas con suficiente contenido de energía térmica, requiere de condiciones tectónicas favorables como son el cruce de diferentes fallas o la inclinación de bloques fallados, que forman trampas apropiadas donde el magma en su ascenso se estaciona y produce su diferenciación. Por lo tanto, durante la investigación de cualquier zona termal se tendrá que investigar la relación que existe entre las estructuras volcánicas y las estructuras tectónicas, a fin de conocer la posible ocurrencia, a poca profundidad, de cuerpos magmáticos calientes.

Elementos favorables para la existencia de áreas geotérmicas, son la persistente actividad volcánica a través del tiempo y las frecuentes erupciones de productos fuertemente diferenciados que requieren para su formación un largo periodo de estadia del magma en la cámara. En la mayoría de los casos, las cámaras son grandes depósitos de magma que alimentan a complejos volcánicos centrales, en los que las estructuras volcánicas se forman alrededor de una chimenea central, con varias erupciones de productos de diferente composición genéticamente relacionados unos con otros a través de la cristalización fraccional. En otros casos, los magmas diferenciados, más ligeros y con alto contenido de gases, son capaces de llegar hasta la superficie a través de erupciones explosivas de gran intensidad, formando calderas regionales con domos y algunos centros monogenéticos (por ejemplo, Campi Flegrei, Italia).

Actualmente, la mayoría de los campos geotérmicos en América Latina están localizados en zonas de vulcanismo Cuaternario, constituido por productos diferenciados (andesitas ácidas, riolitas o dacitas) relacionados con una intrusión ígnea bastante superficial (entre 10 y 15 km) que representa la cámara magmática de centros volcánicos recientes o activos. Mas raramente los hay también en áreas donde el magma permanece a poca profundidad sin producir vulcanismo, y los levantamientos que provoca en la corteza superior afectan la tectónica superficial con la formación de "horst", generalmente por colapsos menores (como en Larderello, Italia) o por sistemas de fallas radiales o concéntricas.

### El Yacimiento

Un yacimiento geotérmico debe estar formado por rocas permeables, con un volumen suficientemente grande para asegurar la explotación prolongada de fluidos geotérmicos. Además, debe estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación.

La delimitación del yacimiento es el problema más difícil de la exploración geotérmica, ya que frecuentemente existe una cubierta de rocas en superficie que a menudo impide el estudio de los substratos profundos. El estudio del yacimiento requiere del conocimiento del marco geológico general y, en particular, el de los espesores, profundidades, litología y permeabilidad de las rocas que se encuentran por debajo de la cubierta superficial. Los estudios estratigráficos y el levantamiento geológico estructural deberán proveer información concerniente al yacimiento, siendo importante la identificación de las áreas de mayor permeabilidad primaria y secundaria, y del modelo de distribución del fracturamiento tectónico. Es particularmente importante determinar si el fracturamiento es debido a la tectónica activa (neotectónica). En este caso la tectónica activa contribuirá a mantener abiertas las fracturas o a reactivar fracturas previas que podrían estar selladas por alteración hidrotermal.

Los xenolitos en rocas volcánicas pueden dar información importante sobre la existencia de un yacimiento. Estos son fragmentos de los horizontes litológicos subsuperficiales y su estudio puede proporcionar evidencias del fenómeno de alteración hidrotermal producido por la circulación de fluidos de alta temperatura a profundidad. Se encuentran ya sea en productos de explosiones volcánicas como en lavas, debiéndose muestrear y estudiar tanto los alterados como los no alterados. Debe darse especial atención a la observación de la textura de los minerales hidrotermales (distribuidos al azar o en venas) y a los eventuales cambios en la paragénesis, con los cuales se pueden identificar variaciones en las condiciones físico-químicas de los fluidos geotérmicos en circulación.

Cuando el yacimiento se encuentra en rocas volcánicas, la permeabilidad en la mayoría de los casos es de tipo secundario ya que estas rocas tienen generalmente baja porosidad primaria. En rocas sedimentarias en las que se encuentran yacimientos geotérmicos, la permeabilidad primaria suele ser escasa y sólo es posible que lleguen a ser productoras de fluidos geotérmicos gracias a la incorporación de la permeabilidad secundaria de origen tectónico. De hecho, en la mayoría de los campos geotérmicos la permeabilidad está controlada por un fracturamiento penetrante o por fracturas concentradas en zonas de fallas, más que por la porosidad primaria.

La permeabilidad de las rocas evoluciona por efecto de esfuerzos tectónicos, por cambios térmicos y por procesos químicos. La deformación tectónica y la contracción térmica aumentan la permeabilidad; mientras que la expansión térmica, la deformación dúctil y la depositación química, tienden a sellar la roca. El tipo de deformación de la roca (frágil o dúctil) y la solubilidad de muchos minerales en los fluidos hidrotermales, dependen de la temperatura. A temperaturas inferiores a 400-450 °C, la roca se comporta de manera frágil produciéndose en ella fracturas; mientras que a temperaturas superiores su comportamiento es generalmente dúctil. La precipitación química que generan los fluidos hidrotermales, generalmente sella las rocas en las partes más superficiales del sistema geotérmico. Estos procesos hacen que generalmente el yacimiento sea limitado en la base por el límite del comportamiento frágil de la roca y en la cima por la precipitación química (fenómeno denominado de autosellamiento).

Una situación típica de muchos campos geotérmicos localizados en sucesiones de rocas volcánicas, está dada por un yacimiento en lavas fracturadas confinadas en su parte superior por rocas de baja permeabilidad primaria (tobas, ignimbritas), que con el tiempo se vuelven impermeables por el fenómeno del autosellamiento por silicificación, caolinización y/o expansión térmica.

Desde el momento en que el fluido que circula por un sistema geotérmico está relacionado con agua meteórica, es necesario que la roca que contiene el yacimiento esté en comunicación con la superficie por medio de un afloramiento, o a través de fallas o fracturas que crucen la cubierta superficial de rocas impermeables. La circulación de fluidos en este último caso, estará siendo asegurada por las estructuras tectónicas o vulcano-tectónicas que permiten conducir las aguas meteóricas al yacimiento y que, eventualmente, regresan nuevamente a la superficie produciendo manifestaciones termales. Si bien casi todos los campos geotérmicos conocidos están localizados en las cercanías de manifestaciones termales naturales, la presencia de éstas no constituye por sí sola la prueba de la existencia de un campo geotérmico. En la sección 4.3.1.2.5 se analizan diversas situaciones estructurales en las cuales se encuentran algunos campos geotérmicos.

## La Cobertura (Capa Sello)

La cobertura o capa sello de un yacimiento geotérmico puede estar compuesta por una roca o una secuencia de rocas con nula o poca permeabilidad. Puede ser una roca sedimentaria o volcánica con impermeabilidad primaria (arcilla, limolita, toba, etc.) como en Cerro Prieto, México; Larderello, Italia; o en Wairakei, Nueva Zelanda; o una roca impermeabilizada por autosellamiento debido a los efectos prolongados de la actividad geotérmica, por mecanismos como los que se describen en párrafos superiores, tal es el caso de The Geysers, U.S.A.; Los Azúfres, México; y Otake, Japón. Para determinar dicha cobertura es necesario conocer la composición litológica de los horizontes sub-superficiales, y este problema generalmente es resuelto sobre bases puramente geológicas, con el apoyo de estudios geofísicos para determinar los espesores de las distintas unidades.

En regiones donde la cobertura está fracturada, los fluidos del yacimiento pueden ascender directamente a la superficie produciendo manifestaciones termales (manantiales calientes, suelos calientes, fumarolas, etc.). La presencia de tales manifestaciones puede ser indicadora de la posible existencia de un yacimiento geotérmico, pero esto no es absolutamente cierto ya que pueden existir yacimientos geotérmicos sin dichas manifestaciones (Heber y East Mesa, U.S.A.). También hay emanaciones calientes que no tienen relación con yacimientos geotérmicos de alta entalpía, puesto que éstas pueden estar asociadas con el rápido ascenso de agua proveniente de grandes profundidades, a lo largo de fallas, en áreas con gradiente geotérmico normal.

El estudio de la cobertura y de las manifestaciones termales superficiales debe considerar el marco hidrológico general. Este estudio por una parte debe implicar el conocimiento de la hidrología de la región (agua meteórica y agua subterránea), y por otro lado el de las condiciones estructurales y estratigráficas que controlan los sistemas hidrológicos e hidrotermales. Mediante una exploración geoquímica detallada, existe la posibilidad de obtener datos para la elaboración de un esquema hidrogeológico y detectar las manifestaciones de fuga del yacimiento geotérmico a través de la cobertura.

Un elemento particularmente significativo de una región geotérmica (no necesariamente volcánica), es la frecuente presencia de cráteres de explosión de acuíferos calentados y mantenidos bajo presión por la cobertura impermeable. Su presencia puede indicar que en la zona afectada por la explosión existen elementos básicos para la presencia de un yacimiento geotérmico (cobertura impermeable, fluido en profundidad, anomalía de calor). Por lo tanto, estas estructuras deberán ser cuidadosamente investigadas.

Determinar la presencia de una secuencia impermeable en la parte superior de un yacimiento geotérmico, es esencial para definir la

utilidad de pozos someros de gradiente geotérmico en etapas subsecuentes de la exploración. Estos pozos son útiles únicamente cuando penetran el estrato impermeable, donde la distribución de la temperatura no ha sido alterada por la circulación de agua meteórica o superficial. La perforación de pozos de gradiente será económica solamente si la cima de las rocas impermeables está a poca profundidad.

### 3. METODOLOGIA PARA LA EXPLORACION GEOTERMICA

#### 3.1 Etapas de un Proyecto Geotérmico

En general la ejecución de un proyecto geotérmico tipo se divide en dos partes principales (Figura No.1): una de alto riesgo (incertidumbre) asociado a la exploración del energético, cuyo objetivo es la identificación del yacimiento geotérmico (incluyendo un estudio de su posible utilización); y la segunda de menor riesgo que se relaciona con el desarrollo y explotación del yacimiento. La primer parte implica notables niveles de riesgo económico, que deben ser enfrentados con inversiones progresivamente crecientes pero que son de relativamente bajo costo, como se verá más adelante. La segunda parte, por lo contrario, implica riesgos menores pero requiere de inversiones más elevadas.

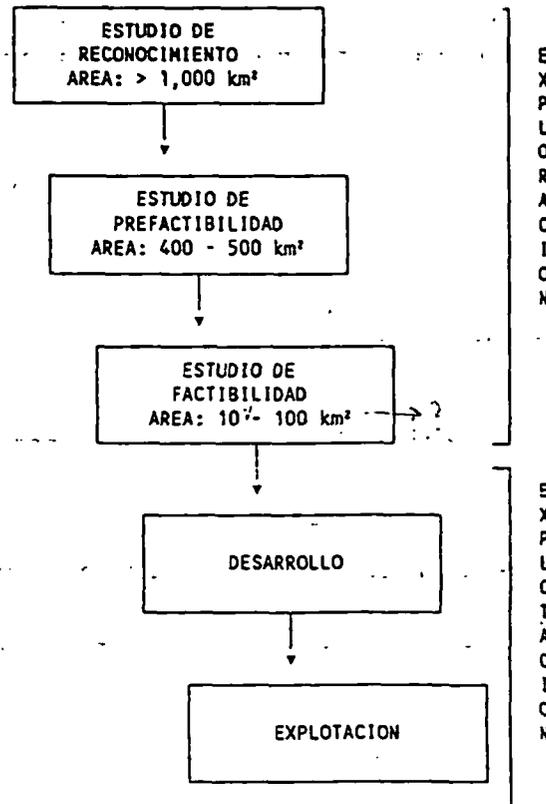
Desde el punto de vista práctico, el estudio de un proyecto geotérmico tipo se puede dividir en cinco etapas, de las cuales las tres primeras: 1) estudio de reconocimiento, 2) estudio de prefactibilidad y 3) estudio de factibilidad, se refieren a la parte propiamente exploratoria del proyecto; y las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

La metodología que se propone en esta guía para el reconocimiento y estudio de prefactibilidad de cualquier zona geotérmica, presenta en forma general los métodos exploratorios a utilizarse en cada una de sus fases, el personal necesario para cada estudio y, finalmente, el orden de magnitud de las inversiones requeridas. La metodología propuesta es resultado de la revisión de las guías previamente elaboradas por OLADE, actualizadas con base en las experiencias adquiridas en la exploración de varios campos geotérmicos de América Latina y del resto del mundo, tratando de incluir en ellas los avances científicos más importantes en la tecnología de la exploración geotérmica.

Este documento tiene como principal objetivo el orientar a los países en la exploración geotérmica en sus primeras etapas, poniendo énfasis en la aplicación de las técnicas de exploración más efectivas y de menor costo. En la definición de la secuencia de

Figura No. 1

ETAPAS EN LA EJECUCIÓN DE UN PROYECTO GEOTERMICO



exploración, se ha hecho un esfuerzo especial por precisar el orden de ejecución de los diversos métodos de exploración que intervienen en las etapas de reconocimiento y prefactibilidad, y en señalar la importancia que tiene el analizar los resultados que se van obteniendo durante los estudios, con el propósito de tomar una decisión respecto a la conveniencia de continuar o detener el estudio en cierto momento. En las primeras etapas de la exploración, se ha tratado de minimizar el empleo intensivo de métodos que requieren fuertes inversiones y no aportan información importante en la definición de las posibilidades geotérmicas del área en estudio.

Ante la inexistencia de un método universal, capaz de resolver los problemas relacionados con las distintas fases de exploración y permitir la identificación automática de un yacimiento geotérmico, la elaboración de una metodología tiene su aspecto más delicado en la selección y combinación de las técnicas que lleven a alcanzar los objetivos particulares de cada fase de la investigación. Tomando en cuenta las características particulares de los proyectos geotérmicos, la amplia variedad de condiciones locales posibles puede exigir cambios sustanciales en la secuencia y/o en el uso de

las técnicas de exploración propuestas. Sin embargo, la experiencia obtenida en varios países permite recomendar el orden de ejecución de los estudios que se presenta en estas guías.

La situación actual del desarrollo de la geotermia en América Latina y el Caribe presenta una realidad diversificada. Existen países con una larga experiencia en la investigación y aprovechamiento de sus recursos geotérmicos, otros que sólo en tiempos recientes han iniciado el estudio de tales recursos y, finalmente, otros más donde aún no se han iniciado las investigaciones. Resulta entonces evidente que las líneas desarrolladas en esta guía para el reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos, serán útiles sobre todo para los países en los cuales la investigación geotérmica está en su fase inicial. Y para los países que tienen cierta experiencia en este campo, puede resultar útil realizar una actualización de los procedimientos que tienen establecidos, con base en los criterios sugeridos en estas guías. Esto les permitirá optimizar los resultados de sus futuras investigaciones.

En la definición de los requerimientos de tiempo e inversiones que se podrían necesitar para desarrollar los estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos, se han tomado en cuenta algunas variables tales como: un tamaño promedio de las áreas de prospección, la disponibilidad local de personal, apoyos logísticos y supuestas buenas condiciones topográficas en la región del estudio. La filosofía de exploración aquí propuesta, se enfoca al medio ambiente geológico y morfológico de América Latina y del Caribe.

### 3.2 Desarrollo de un Proyecto Geotérmico Tipo

La experiencia acumulada a la fecha demuestra que las dimensiones promedio de los yacimientos geotérmicos se hallan comprendidas entre 10 y 100 km<sup>2</sup>, y que en América Latina y el Caribe tales yacimientos se localizan en las márgenes de las placas litosféricas (por ejemplo el Sistema Andino, la Cordillera Centroamericana, el Arco del Caribe, el Eje Neovolcánico Mexicano, etc.), especialmente en regiones que se caracterizan por una actividad tectónica y magmática de edad reciente (menor de un millón de años). Sin embargo, el simple hecho de que un país o región se encuentre geográficamente en dichas márgenes, no garantiza "a priori" la existencia de yacimientos geotérmicos de interés comercial. Por consiguiente, para poder desarrollar un proyecto geotérmico en regiones geológicamente poco estudiadas, será necesario iniciar las actividades exploratorias con un estudio de reconocimiento que cubra áreas de mil o más kilómetros cuadrados.

El estudio inicial de reconocimiento permitirá formular las primeras hipótesis sobre las posibilidades geotérmicas de la región

y seleccionar una o varias áreas favorables para realizar en ellas estudios de prefactibilidad, como una segunda etapa del proyecto.

Un estudio de prefactibilidad tendrá como principal objetivo el identificar con trabajos de superficie, la posible existencia de un yacimiento geotérmico en el subsuelo en condiciones tales que el riesgo de continuar la exploración con perforaciones profundas sea bastante reducido. Las investigaciones de prefactibilidad generalmente se realizan en áreas cuya extensión queda comprendida entre 400 y 500 km<sup>2</sup>, preseleccionadas con base en el resultado de los estudios de reconocimiento.

Los proyectos geotérmicos cuya etapa de prefactibilidad haya sido superada positivamente, evolucionarán a la etapa de factibilidad cuyo objetivo será: la comprobación de la existencia de un yacimiento en un área de 10 a 100 km<sup>2</sup> (mediante la perforación de pozos exploratorios profundos), la evaluación del potencial energético del área prospectada y el diseño preliminar de los sistemas de utilización del recurso detectado.

Identificado el recurso geotérmico, la etapa subsecuente de desarrollo del proyecto comprende la continuación de la perforación, la ejecución de estudios geocientíficos complementarios de detalle, la evaluación precisa del yacimiento, la extracción del fluido geotérmico, la elaboración del proyecto definitivo y la construcción de una central generadora de electricidad o de uso directo del calor.

Cubierta la etapa de desarrollo, el proceso de explotación del recurso involucra el manejo del fluido geotérmico desde su extracción del yacimiento hasta su aprovechamiento en la producción de energía eléctrica o el uso directo del calor en otras aplicaciones. Durante la explotación se optimizará el uso del fluido y se garantizará la operación continua y confiable del campo, observando y controlando la evolución del yacimiento con el tiempo.

#### 4. ESTUDIO DE RECONOCIMIENTO GEOTERMICO

Un estudio de reconocimiento consiste en la evaluación preliminar de los recursos geotérmicos susceptibles de ser aprovechados con fines de generación eléctrica u otros usos en una región determinada, identificando y delimitando las áreas de mayor interés para plantear, de manera concreta, las líneas de acción a seguir en la siguiente etapa de la investigación (prefactibilidad).

La evaluación será realizada mediante la recopilación, análisis y procesamiento de la información geocientífica y técnica existente, y la ejecución de investigaciones de campo geológicas, geohidrológicas y geoquímicas, de carácter regional.

#### 4.1 Objetivos Generales

El estudio de reconocimiento tendrá como objetivos:

- Evaluar en forma preliminar las posibilidades geotérmicas a nivel nacional o regional.
- Identificar las áreas de interés geotérmico.
- Definir un esquema geotérmico preliminar de cada área identificada y seleccionar las más atractivas para la ejecución de estudios de prefactibilidad.
- Elaborar un programa de exploración detallada (de prefactibilidad) para las áreas de interés geotérmico.

Estos objetivos tienen el propósito de reunir información técnica que, aunada a consideraciones socio-económicas y políticas, constituyan las bases para la toma de decisiones sobre:

- La prioridad que se deberá dar a nivel nacional o regional a la geotermia, en relación con otras fuentes alternas de energía, por ejemplo: la hidroelectricidad y la energía térmica convencional.
- La definición de áreas de máxima prioridad en la planeación de exploraciones futuras, tomando en consideración tanto el factor técnico (potencial geotérmico estimado) como el económico y social. Algunos factores locales podrían jugar un papel importante en esta etapa, como es el caso del posible aprovechamiento de la energía geotérmica en un área donde no hay la disponibilidad de otras fuentes alternas de energía, o la conveniencia de su uso en actividades que requieran el recurso calorífico a bajo precio (la minería, agricultura, acuicultura, cierto tipo de industrias, etc.).
- Las inversiones y la estructura técnica necesarias para evaluar el potencial geotérmico del área o áreas que se consideren prioritarias.

#### 4.2 Fases del Estudio

En términos generales, un estudio de reconocimiento a nivel nacional o regional se puede desglosar en cuatro fases: la primera que corresponde a una recopilación de la información geocientífica existente, la segunda a una evaluación de la información y realización de investigaciones geocientíficas de campo, la tercera a la integración de tales estudios y la definición de las áreas de interés geotérmico, y la cuarta a la preparación de un documento del proyecto para el estudio subsecuente de prefactibilidad. La

descripción de cada una de estas actividades se presenta a continuación.

### **Fase 1. Recopilación de Información Existente**

La primer fase de un estudio de reconocimiento corresponde a una recopilación de la documentación básica del proyecto, consistente en:

- Información bibliográfica lo más completa posible de estudios de carácter regional y en algunos casos de detalle, sobre vulcanología, estratigrafía, geología estructural y tectónica. Será importante disponer de las dataciones radiométricas realizadas a rocas volcánicas e intrusivas de la región.
- Mapas geológicos y topográficos regionales a cualquier escala, pero preferentemente los de escalas entre 1:100,000 y 1:1,000,000.
- Información específica sobre la región, especialmente la que se refiere a las manifestaciones termales y fumarolas y a su estratigrafía, geología estructural, historia volcánica, geoquímica, etc.
- Imágenes de satélite ya sea en el rango visible o el infrarrojo (Landsat Multiple Spectral Sensor (MSS) y Thematic Mapper (TM), Spot y HCMM), imágenes de radar y fotografías aéreas de escala regional. En los casos en los que sea posible, será conveniente disponer de información digitalizada (en cinta compatible para computadora) para procesarla posteriormente.
- Datos del subsuelo (columnas litológicas, registros geofísicos, etc.) recabados en pozos perforados para otros fines (petróleo, agua, etc.).
- La información geofísica disponible cualquiera que haya sido su propósito.
- Datos sobre la hidrología, la hidrogeología y la meteorología.

En algunos casos esta información podrá ser obtenida de organismos oficiales, universidades y empresas privadas, las cuales se dedican a la investigación o la exploración, evaluación y explotación de los recursos naturales (agua, petróleo, gas, minerales) del país.

La información de satélite en algunos casos se podrá conseguir en el propio país donde se realiza el estudio, y en otros en Estados Unidos de Norteamérica y/o en Francia. El material que más comúnmente se consigue corresponde a imágenes del explorador

multiespectral Landsat (MSS), que resalta mediante un procesado de falso color las zonas de alteración hidrotermal y algunos rasgos geológicos.

La obtención de información deberá ser realizada preferentemente por personal especializado en cada una de las disciplinas involucradas en el estudio de reconocimiento, aún cuando no sea un especialista en geotermia. Sin embargo el análisis, el procesamiento y la integración de la información deberán ser desarrollados, o al menos dirigidos y supervisados, por una persona con experiencia en geotermia.

Con el fin de almacenar y procesar los datos recopilados, es recomendable utilizar sistemas informáticos de manejo de datos, del tipo denominado sistema de información geográfica (GIS). Durante el registro de la información se tendrá cuidado de dar siempre referencia de su localización geográfica. Estos sistemas permiten una inmediata visualización cartográfica combinada de cualquier información geográfica, pudiendo ser actualizada en cualquier momento. Por otro lado, permiten integrar la información geográfica almacenada independientemente del formato (tabla de datos o mapas temáticos) y de la escala en que estén disponibles. La selección entre los diferentes paquetes (software) disponibles en el mercado, debe ser hecha teniendo en cuenta la compatibilidad en el intercambio de datos con sistemas ya en uso en otras instituciones nacionales o regionales.

## **Fase 2. Evaluación de la Información Recopilada y Ejecución de Investigaciones de Campo**

Sobre la base de la información obtenida en la Fase 1, se llevará a cabo un análisis y evaluación de la documentación recopilada, se identificarán las zonas geotérmicas conocidas y potenciales y se definirá el área o las áreas donde se llevarán a cabo investigaciones geocientíficas de campo. Para este propósito, la aplicación de un método geoestadístico ha demostrado ser de gran utilidad, puesto que mediante la interpretación de imágenes de satélite y el procesado de la información recabada es posible obtener cierto tipo de planos que señalan las zonas de interés geotérmico.

Como resultado de la evaluación se programarán investigaciones de campo con estudios específicos de geología, hidrogeología y geoquímica, cuyos objetivos serán obtener información relacionada con la existencia de condiciones favorables para la presencia de uno o más yacimientos geotérmicos. Los levantamientos de campo se complementarán con trabajos de laboratorio tanto petrográficos como químicos, isotópicos y de dataciones de rocas.

Considerando que la ejecución de los trabajos de campo generalmente está sujeta a diversos factores que afectan su realización e

influyen en la determinación de los tiempos, costos y requerimientos físicos y humanos, antes de iniciar los levantamientos se deberá llevar a cabo la planificación de todas y cada una de las actividades, tomando en cuenta factores tales como:

- La extensión del área sujeta a investigación. A mayor área, mayores serán los requerimientos para el levantamiento.
- La cantidad de información geocientífica previamente disponible. A mayor cantidad de información, menor será la investigación de campo necesaria para el conocimiento del área.
- La infraestructura vial del área. En zonas con buenas vías de comunicación los levantamientos de campo se efectuarán con mayor rapidez, llevando a la simplificación (portabilidad) de los equipos de investigación y a la reducción de los requerimientos de cierto tipo de apoyo como helicópteros, vehículos de doble tracción, campamentos, etc.
- La infraestructura técnica. Contar en la localidad o en el país con empresas, laboratorios o universidades con experiencia en exploración geotérmica o de otros recursos naturales, permite efectuar la investigación del área en menor tiempo y costo.
- Facilidades de alojamiento. La existencia de poblaciones cercanas al área de estudio, en ciertos casos reduce los problemas de alojamiento y alimentación de los grupos de exploración.
- El clima de la región. Dependiendo de las condiciones climatológicas del área en estudio, la investigación geotérmica se podrá desarrollar con mayor o menor rapidez. El clima no sólo puede afectar el acceso a la zona de interés, sino que en ocasiones limita la ejecución de algunas investigaciones de campo.

Una vez analizadas las condiciones de trabajo y preparado el personal técnico y los equipos, las investigaciones de campo y de laboratorio se podrán realizar de acuerdo a los programas elaborados con anticipación.

### **Fase 3. Interpretación de Estudios, Integración de Resultados y Definición de las Areas de Interés Geotérmico**

Al terminar la Fase 2 del reconocimiento se interpretarán los datos de campo y los de laboratorio, se integrarán los resultados y se evaluará el área o áreas geotérmicas potenciales identificadas. Con base en la integración de la información geológica, geoquímica e hidrogeológica obtenida con los levantamientos de campo y los datos

de geofísica disponibles, se elaborará un esquema geológico preliminar del sistema geotérmico del área o áreas de interés y se determinarán las posibilidades geotérmicas de cada una tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- La existencia de una zona de alta temperatura anómala en el subsuelo. Desde el punto de vista de la geología este parámetro podrá ser estimado con base en las condiciones vulcanológicas, y tal información podrá ser complementada mediante el resultado de los geotermómetros químicos.
- El grado de permeabilidad de las rocas en las que se infiere se encuentra el yacimiento. Este parámetro es importante dado que existen muchos casos de áreas con una anomalía térmica considerable pero sin una permeabilidad suficiente. Su evaluación deberá basarse en el grado de fracturamiento tectónico que hayan sufrido las rocas y/o en la permeabilidad primaria que caracterice a las mismas.
- La extensión y profundidad del supuesto yacimiento. Estos parámetros permitirán estimar tentativamente el volumen del yacimiento, lo cual es fundamental para la evaluación de la capacidad energética del área y para determinar, en lo posible, la magnitud del costo de la perforación que se tendrá que tomar en cuenta para alcanzar el yacimiento. Actualmente por razones tecnológicas y económicas, los pozos exploratorios se programan generalmente con profundidades máximas entre 1,500 y 2,500 m, y rara vez superan los 3,000 m.
- La posibilidad de recarga del acuífero. Será importante evaluar si las rocas que constituyen el yacimiento pueden recibir la aportación de agua a través de uno o más acuíferos, de tal manera que se pueda prever la explotación del yacimiento sin problemas de recarga hidráulica.

Definidas las características del área o las áreas geotérmicas identificadas, se podrá hacer entonces una jerarquización preliminar de las que se consideren de interés, desde el punto de vista técnico, para llevar a cabo cualquier tipo de desarrollo geotérmico. Posteriores evaluaciones de tipo socio-económico y político conducirán a la selección definitiva de las áreas prioritarias para seguir con estudios de prefactibilidad.

#### **Fase 4. Preparación del Programa Subsecuente de Estudios de Prefactibilidad**

Una vez realizada la selección del área o áreas de mayor interés, se deberá preparar un programa de estudios para la etapa de prefactibilidad, señalando en detalle los trabajos que se tendrán que realizar en lo que respecta a geología, geoquímica, geofísica, hidrogeología, estudios ambientales y a algunas perforaciones

exploratorias de diámetro pequeño. En este documento de proyecto para la prefactibilidad, se mencionarán los estudios en que las actividades tendrán que ser de mayor detalle, debido a la escasa información existente en cualquiera o cualesquiera de las disciplinas que intervengan en la investigación geotérmica, o a la importancia que pudiese tener la información que proporcionen en la definición del proyecto.

#### 4.3 Estudios Específicos

##### 4.3.1 Geología

###### 4.3.1.1 Objetivos

Los objetivos específicos de la geología en la etapa de reconocimiento, serán los de proporcionar elementos geocientíficos que permitan identificar y clasificar, en orden prioritario, las áreas de interés geotérmico. La contribución de la geología en el reconocimiento se considera fundamental, en cuanto los recursos económicos y la extensión del área por investigar generalmente no permiten desarrollar estudios geofísicos. Al geólogo le tocará realizar la integración geológica de los datos geofísicos, geoquímicos, hidrogeológicos e hidrológicos recopilados y analizados por los especialistas de esos sectores, y elaborar un esquema vulcanológico regional y geotérmico de las áreas de interés.

No obstante que el objetivo primario de la exploración geotérmica será en la mayoría de los casos encontrar condiciones propicias para la existencia de campos de alta entalpia, en esta primera fase de la exploración también se tendrán que identificar las áreas con diferente finalidad geotérmica que no sea el aprovechamiento de los recursos de alta entalpia. Áreas con yacimientos de baja entalpia o aquellos de rocas calientes secas, si bien por el momento no son de interés comercial, podrían serlo a futuro en función de los progresos tecnológicos o los cambios en los costos de la energía.

Actualmente, con el fin de que sea posible la generación de electricidad, la temperatura del fluido geotérmico por encontrar deberá ser superior a 150°C. En caso contrario (campos de baja entalpia) el yacimiento podría ser explotado para otros usos (agrícola, industrial, turístico, etc.).

La posibilidad de aprovechamiento de áreas donde esté presente sólo el calor en las rocas (Hot Dry Rocks), está aún en la etapa de estudio pero podría transformarse en realidad en un futuro próximo (Garnisch, 1987).

#### 4.3.1.2 Actividades y Alcances

Las actividades de geología consistirán en trabajos de gabinete y de campo tanto de carácter regional como local. Cuando exista abundante información de la región por estudiar, el trabajo de gabinete representará una buena parte del tiempo destinado a las actividades de geología, quedando subordinados los trabajos de campo y de laboratorio, cuyos objetivos serán corroborar y complementar la información e interpretaciones obtenidas durante la fase de gabinete.

Los alcances de la geología en esta etapa de la exploración, en forma general se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Elaborar la cartografía regional y definir el esquema geovulcanológico preliminar de la zona investigada.
- Definir la relación de la geodinámica regional con la tectónica y el vulcanismo de la zona.
- Determinar las anomalías termales a niveles someros de la corteza terrestre.
- Definir la secuencia estratigráfica regional y las características litológicas de las formaciones que la integran.
- Elaborar la cartografía geovulcanológica de las áreas geotérmicas identificadas.
- Describir preliminarmente el marco geovulcanológico de las anomalías o áreas geotérmicas identificadas.
- Identificar los elementos que podrían integrar los sistemas geotérmicos descubiertos (fuente de calor, yacimiento y sello) y formular el esquema geotérmico preliminar
- Definir, clasificar y seleccionar las áreas geotérmicas de interés.

Estos objetivos y alcances programados para la geología, se obtendrán mediante la ejecución de los estudios y actividades que se detallan a continuación:

##### 4.3.1.2.1 Trabajos de Gabinete

Con base en la información recopilada durante la primera fase del estudio de reconocimiento, se procederá a realizar las siguientes actividades:

- Una evaluación y síntesis de la información existente.
- Estudios de teledetección y morfoestructurales.
- Elaboración de un plano geológico estructural preliminar de la región por investigar.

El resultado de este trabajo de gabinete permitirá determinar el grado de conocimiento de la geología que se tenga sobre la o las regiones por explorar y, por ende, orientar adecuadamente las investigaciones complementarias que se deban realizar.

Puesto que en la mayoría de los casos la información geológica de una región, y en especial la cartográfica, se encuentra en forma comúnmente incompleta, será necesario que al principio de los trabajos de gabinete, se integre la información bibliográfica recopilada con los trabajos de interpretación que se realicen para tal fin. En casi la totalidad de las regiones donde se proyectan exploraciones geotérmicas, existen estudios geovulcanológicos que si bien no satisfacen los objetivos de la exploración geotérmica, podrían ser la base para programar las investigaciones complementarias.

Teniendo en cuenta la gran extensión que generalmente abarca un estudio de reconocimiento, durante la primera fase de la investigación geológica se recurrirá a los estudios de teledetección (interpretación de fotografías aéreas y de imágenes de satélite) integrados con algunos controles del terreno. En esta fase se utilizarán cartas topográficas a gran escala (1:50,000, 1:100,000 ó 1:200,000), fotografías aéreas a escalas 1:60,000 ó 1:50,000 e imágenes de satélite (1:1'000,000 ó 1:500,000) que tienen la ventaja de permitir una visión de conjunto de grandes regiones. En áreas cubiertas de intensa vegetación o para la individualización de superficies sepultadas, resulta óptimo el uso de imágenes radar que poseen una notable penetración superficial.

El estudio de teledetección tendrá la finalidad de recabar información sobre la litología de las formaciones aflorantes, sobre la distribución de los principales centros volcánicos y sobre la tectónica de la región. Desde el punto de vista litológico, el estudio se iniciará con la identificación de los litotipos aflorantes en una área conocida para después extrapolar esta información al resto de la región. La litología aflorante puede ser inferida con base en la textura, el color o tono de las imágenes aéreas y de satélite, y a la densidad del drenaje y el tipo de vegetación. La densidad del drenaje en condiciones de igual inclinación de los taludes, cubierta vegetal y clima, es también función de la permeabilidad de las rocas y por tanto representa un parámetro de gran interés geotérmico. Las zonas de alteración asociadas a la actividad hidrotermal, son fácilmente reconocibles con el análisis y procesado de los datos obtenidos por el satélite Landsat TM.

Mediante el estudio de imágenes de satélite con control en la carta topográfica, es posible definir con precisión la tectónica de una región. La teledetección vulcanológica permitirá individualizar los principales centros de actividad volcánica, de clasificarlos en su edad relativa y en sus relaciones con los rasgos morfológicos y tectónicos regionales. El objetivo principal de un análisis tectónico de este tipo, debe ser el de realizar una buena carta estructural y no una simple carta de lineamientos. La atribución del tipo de movimiento de un lineamiento, puede ser dado por la interpretación misma de la imagen cuando el dislocamiento es suficientemente grande, o cuando existen datos de campo. En general, las estructuras más fácilmente reconocibles son los pliegues, los bloques basculados, las fallas distensivas y las transcurrentes. En áreas con vulcanismo reciente es posible reconocer con gran precisión ciertas estructuras volcánicas y volcano-tectónicas.

Algunos procesos para resaltar las características geológicas en las imágenes de satélite, pueden ser hechos a través del tratamiento digital de los datos, por medio de programas especializados actualmente disponibles en el mercado. Cualquiera que sea el método utilizado en la elaboración de datos, el resultado será la enfatización de los cambios bruscos de tonalidad, ya sea relacionada con la topografía o con cualquier cambio en las superficies planas. En todo caso, es oportuno proceder al filtrado manual de los lineamientos visibles en la imagen procesada, evaluando cada uno de los lineamientos con base en la información bibliográfica y a la cartografía disponibles. Es necesario mencionar que la interpretación de los lineamientos observados en las imágenes de satélite, no puede hacerse con base en modelos tectónicos de deformación a priori, sin tener datos adecuados microtectónicos de campo sobre el tipo de movimiento de las fallas, su edad y las relaciones de recíproca dislocación.

Mediante la interpretación de fotografías aéreas se elaborarán mapas geovulcanológicos y tectónicos. Se identificarán las estructuras y eventos volcánicos de todo tipo, así como las formas circulares. Mediante este procedimiento se tratará de establecer la evolución estructural de los aparatos volcánicos y se cartografiarán los productos de sus erupciones recientes, tanto efusivas como piroclásticas. Toda información obtenida de la fotointerpretación será trasladada a mapas topográficos a una escala de trabajo o a diferentes escalas, y esta información deberá confirmarse y correlacionarse con la de los mapas geológicos existentes.

Al finalizar el trabajo de gabinete, el resultado de todo el procesado de la información será la disponibilidad de una carta geológica y estructural preliminar (a escala 1:100,000 ó 1:250,000) de la región en estudio, complementada con un esquema de la secuencia estratigráfica. Cuando se trate de un estudio de

reconocimiento en áreas relativamente pequeñas (< 1,000 km<sup>2</sup>), la escala que se utilizará para la carta geológica podrá ser 1:50,000.

#### 4.3.1:2.2 Reconocimiento de Campo

Previo a la fase de campo, la carta geológica preparada en la fase de gabinete se subdividirá en grandes unidades homogéneas desde el punto de vista estratigráfico, tectónico y vulcanológico. Para cada una de estas unidades, el trabajo de campo se desarrollará de tal manera que sea posible reconstruir la secuencia estratigráfica de la región y se pueda elaborar una descripción cronológica de los procesos tectónicos principales.

Se efectuará un estudio vulcanológico regional cuyo propósito será identificar los principales edificios y complejos volcánicos, la afinidad geoquímica que exista entre ellos, su edad y la ocurrencia de eventos recientes e históricos (especialmente los de tipo freato-magmático). Para tal propósito, se usará el plano elaborado en la fase anterior de gabinete, ratificando, rectificando y complementando la información previamente integrada a escala 1:100,000 ó 1:250,000. El estudio pretenderá hacer una estimación del volumen de los productos efusivos y piroclásticos procedentes de cámaras magmáticas diferenciadas. Durante este estudio, se deberá tener cuidado en la identificación de xenolitos que, además de dar indicios de la constitución de las rocas volcánicas del subsuelo, puede mostrar evidencias de alteraciones hidrotermales. Adicionalmente se identificarán y mapearán las fallas y fracturas de carácter regional y local.

Se considerarán todos los indicios vulcanológicos de campo para identificar el tipo de erupciones que caracterizan el área estudiada, sus relaciones en el tiempo y reconstruir el desarrollo del ciclo volcánico correspondiente. Esto permitirá establecer en cual etapa de la evolución se encuentran actualmente los aparatos volcánicos de interés geotérmico. La reconstrucción de la tipología eruptiva podrá individualizar la ocurrencia de la actividad hidromagmática indicadora de la interacción agua-magma, debido a la existencia de un acuífero confinado a un nivel alcanzable por un fuerte calentamiento de origen mágnico.

Durante el trabajo de campo será necesario realizar varias observaciones geológicas, para ratificar o rectificar las interpretaciones hechas durante el trabajo de gabinete o las señaladas por otros investigadores en trabajos previos. Con ello se podrán definir las grandes unidades geológicas, señalándose su extensión, geometría y límites.

Desde el punto de vista de la estratigrafía y de la tectónica regional, será muy importante aclarar las relaciones entre el basamento prevolcánico, la cobertura volcánica antigua y la cobertura volcánica reciente, así como las fases deformativas que

les afectan. Estas tareas se cumplirán sin hacer un verdadero levantamiento de la geología, pero sí visitando áreas clave donde sean visibles estas unidades y sus contactos. El resultado del trabajo será la disponibilidad de un plano geológico-estructural general que sintetice todas las observaciones de campo.

Las áreas termales activas o fósiles identificadas durante el trabajo de campo, serán objeto de un levantamiento geológico de semidetalle (a escala 1:50,000 ó 1:20,000), en el cual se resalten los aspectos vulcanológicos, estratigráficos, estructurales y termales que caracterizan la zona, de tal manera que esta información correlacionada con la del levantamiento regional, sea lo suficientemente completa para elaborar un esquema del sistema geotérmico al que podrían asociarse las manifestaciones termales.

Para integrar o completar los datos sobre los diferentes tipos y edades de las rocas en la región, se coleccionarán muestras para análisis petrográficos, petrológicos, químicos y dataciones radiométricas. También será conveniente, en algunos casos, el muestreo de carbón en paleosuelos interestratificados con piroclásticos procedentes de eventos volcánicos recientes.

Las muestras de rocas para análisis petrográficos, químicos, petrológicos y radiométricos se obtendrán por cuadruplicado, debiendo guardarse una en el archivo, previamente identificada con un código y las coordenadas de su ubicación. Los especímenes para dataciones no deberán estar alterados.

El número de muestras para tales análisis generalmente varía entre 100 y 200 ejemplares para las determinaciones petrográficas, entre 20 y 40 para análisis químicos de rocas, de 15 a 30 para dataciones y unas 10 para los análisis isotópicos de rocas.

#### 4.3.1.2.3 Trabajo de Laboratorio

Esta actividad comprende la preparación de muestras de rocas, sus análisis, el procesado de los resultados y su interpretación. Es una actividad importante que complementa los trabajos de campo y es esencial para determinar las características geológicas de la región en estudio. Esta fase de la investigación consiste principalmente de lo siguiente:

- Elaboración de láminas delgadas. De los especímenes de rocas coleccionados se prepararán láminas delgadas para análisis petrográficos y petrológicos. El número de muestras por trabajar dependerá de la extensión de la región explorada, del número de formaciones, de las estructuras o aparatos volcánicos existentes, de la actividad volcánica registrada en el tiempo y el espacio y del grado de detalle que se pretenda alcanzar en el estudio geológico. Las áreas identificadas como de mayor interés, deberán investigarse con mayor detalle. Las

Las láminas delgadas de los especímenes de rocas colectadas, serán analizadas mediante un microscopio polarizante para su clasificación petrográfica, petrológica y la determinación del grado de alteración.

- Estudio petrográfico. Su propósito es determinar el tipo de roca y clasificarla.
- Estudio petrológico. Tiene el objetivo de determinar la naturaleza del magma, su grado de acidez y la diferenciación a la que estuvo sujeto. Con este estudio se tratarán de determinar los procesos de fraccionamiento sólido-líquido que han afectado a los productos volcánicos, con el fin de estimar los volúmenes y las temperaturas de las cámaras magmáticas a profundidad (<15 km). El conocimiento del proceso de cristalización del magma permitirá conocer la profundidad de la cámara.
- Análisis químico por microsonda electrónica. Tiene el propósito de estudiar las condiciones físicas de cristalización en el vidrio residual de magmas diferenciados, permitiendo la caracterización cuantitativa de la o las cámaras magmáticas que dieron lugar a los principales aparatos volcánicos. Con este método es posible determinar la composición química de los minerales que integran las inclusiones fluidas. Se estima que para esta etapa de la exploración será necesario realizar unos 10 análisis.
- Análisis de minerales de alteración hidrotermal (por difracción de rayos X y mineralografía). Su estudio permitirá determinar la paragénesis de los minerales y una zonificación térmica del posible sistema geotérmico.
- Estudio de la interacción agua-magma en el subsuelo así como la determinación de niveles permeables subterráneos (eventuales zonas del yacimiento).
- Análisis químicos de rocas. Las muestras de rocas que no presenten alteraciones (frescas), serán seleccionadas para análisis químicos. Estos servirán para determinar elementos mayores tales como: SiO<sub>2</sub>, AlO<sub>3</sub>, Total FeO, Na<sub>2</sub>O, CaO, MnO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO y L.O.I (Low Oxide Index). También los elementos traza: Ni, Cr, Rb, Sr, Ce, La, Zr y Nb. Por isotopía se determinará la relación Sr<sup>86</sup>/Sr<sup>87</sup>.
- Dataciones radiométricas por:
  - . El método de K/Ar.
  - . El método de C<sup>14</sup>, con base en el carbón en suelos fósiles

#### 4.3.1.2.4 Interpretación de Datos, Compilación de Mapas e Individualización de Áreas Geotérmicas

Una vez recopilada e integrada la documentación geológica de campo y de laboratorio, se pasará a su análisis e interpretación para llegar a determinar las áreas de interés geotérmico. La primera parte de este trabajo consistirá en la elaboración definitiva de la carta geológica-estructural regional, integrada con la información previamente existente y las nuevas aportaciones de los trabajos de campo y de laboratorio.

La segunda parte consistirá de la identificación de los principales elementos que normalmente sugieren la presencia de yacimientos geotérmicos, tales como:

- La existencia de una fuente de calor que tenga relación con el o los posibles yacimientos geotérmicos en la región.
- La existencia de condiciones estratigráficas y estructurales favorables para la presencia de fluidos termales en el subsuelo.
- La existencia de condiciones estratigráficas, estructurales e hidrometeorológicas favorables para la alimentación hídrica al o a los yacimientos geotérmicos.

Un primer paso para determinar la presencia de yacimientos geotérmicos en la región de estudio, será considerar las manifestaciones termales superficiales (manantiales termales, fumarolas, suelos calientes, etc), no obstante que estas manifestaciones secundarias no sean determinantes para definir la existencia de los yacimientos.

El segundo paso será la identificación de la fuente de calor mediante la interpretación y correlación de los estudios de gabinete, campo y laboratorio.

La persistente actividad eruptiva de un aparato volcánico central por un largo período de tiempo y la frecuente erupción de productos diferenciados, junto con la evolución estructural (especialmente la de tipo caldérico), son indicios inequívocos de la presencia de cámaras magmáticas superficiales. Los mismos indicios pueden ser proporcionados por conjuntos de centros volcánicos monogenéticos ácidos muy estrechamente asociados superficial y cronológicamente, en ocasiones asociados al desarrollo de una estructura caldérica, especialmente en su fase tardía o de resurgencia. Estas observaciones correlacionadas con los estudios petrográficos, petrológicos, mineralógicos y las dataciones radiométricas, conducen a la identificación y caracterización de anomalías geotérmicas de origen magmático asociadas a procesos volcánicos.

La temperatura de una cámara magmática específica se puede estimar experimentalmente a partir de la determinación de la temperatura de cristalización de las fases sólidas y de la temperatura de equilibrio de las inclusiones de vidrio en los productos volcánicos. Otra forma es a partir de la reconstrucción del equilibrio de cristalización mediante diagramas petrogenéticos.

Los estudios petrológicos de lavas y piroclásticos contribuyen a definir la naturaleza y grado de diferenciación magmática, y estos datos sirven para determinar la presencia de cámaras magmáticas a niveles superficiales.

La correlación de los estudios geocientíficos permitirá, a su vez, diferenciar el origen de las anomalías termales que no sean de naturaleza volcánica y que podrían ser originadas por factores tales como:

- El gradiente terrestre normal; que implica el descenso de agua a través de fracturas que alcanzan grandes profundidades.
- Cuerpos intrusivos de grandes dimensiones en proceso de enfriamiento.
- Cuerpos subvolcánicos de gran tamaño en proceso de enfriamiento.
- Zonas de convergencia de placas litosféricas continentales.
- Zonas de divergencia de la corteza.

La posible existencia de un yacimiento geotérmico se podría inferir en primera instancia, por el estudio de fenómenos freatomagmáticos o hidromagmáticos, evidenciados en la superficie por flujos piroclásticos tipo "surges", por erupciones plinianas, por xenolitos hidrotermalizados y por los cráteres de explosión freática y/o freatomagmática que manifiestan condiciones en el subsuelo favorables para la existencia de un acuífero termal confinado. La litología del yacimiento y de las capas superiores que lo cubren, se puede interpretar "a priori" mediante el estudio petrográfico de xenolitos obtenidos en los flujos piroclásticos expulsados en erupciones plinianas recientes.

La temperatura del yacimiento podrá estimarse con base en los estudios mineralógicos de xenolitos hidrotermalizados, a la petrología de los productos efusivos recientes y a la edad radiométrica de éstos.

El establecimiento de la secuencia estratigráfica de la zona estudiada contribuirá también a definir las características hidrogeológicas de las formaciones en el subsuelo.

En áreas de anomalía termal en la que las rocas no sean de origen volcánico, la identificación de la formación en la que se podría encontrar un yacimiento, únicamente se puede deducir con base en los estudios estratigráficos de la zona explorada.

Respecto a la cobertura del posible yacimiento, los estudios estratigráficos y el establecimiento del grado de alteración hidrotermal que presentan las rocas, contribuirán a la interpretación de la existencia de una cubierta impermeable sobreyacente al eventual yacimiento.

La existencia de una cobertura impermeable sobre el yacimiento cuando se trata de rocas sanas, podría estar constituida por rocas como las tobas de grano fino, lutitas, limolitas y arcillas, etc. Estos materiales presentan impermeabilidad primaria. Sin embargo, también es cierto que la actividad hidrotermal generada por los campos geotérmicos, produce agilización de las rocas y depositación de minerales en los poros, las fracturas y las diaclasas, imprimiéndoles impermeabilización secundaria.

#### 4.3.1.2.5 Condiciones Geológicas en Algunos Campos Geotérmicos de Latinoamérica

El análisis de las condiciones geológicas en las que se encuentran algunos campos geotérmicos de Latinoamérica, permite concluir que las zonas geotérmicas más prometedoras comúnmente se localizan en áreas recientemente activas desde el punto de vista vulcanológico y tectónico. Estas áreas se caracterizan por estar en depresiones estructurales asociadas a manifestaciones volcánicas explosivas. En cambio las áreas de rocas calientes secas están generalmente localizadas en la cima de intrusiones graníticas someras o aflorantes, que desde el punto de vista estructural se caracterizan por tener un patrón radial y eventualmente anular de fracturas y fallas.

Para la realización de esta guía se hizo un estudio de las principales zonas geotérmicas en América Latina, con el fin de individualizar las diferentes condiciones geológicas que les caracterizan. Para ello, se examinaron los campos de alta entalpia que se encuentran en la etapa de explotación o de estudios de factibilidad. El análisis de estos campos indicó que las estructuras geológicas más significativas desde el punto de vista geotérmico, son las siguientes:

- Areas de intersección entre fallas regionales distensivas y estructuras caldéricas, algunas veces éstas del tipo resurgente. Esta es una de las situaciones más difundidas en América Latina y está siendo ejemplificada por los campos de La Primavera y Los Humeros en México; Amatitlán en Guatemala; Momotombo en Nicaragua y Miravalles en Costa Rica. En estos casos, la fuente de calor está constituida por una intrusión

magmática ligada a un colapso caldérico o a una resurgencia. Normalmente los yacimientos se encuentran entre sucesiones de lavas fracturadas o depósitos vulcanoclásticos que constituyen el basamento relativo de los volcanes recientes. En estos casos los yacimientos están limitados regionalmente por las fallas del colapso caldérico y están siendo cubiertos por depósitos piroclásticos o domos ácidos. Casi siempre el fondo de las calderas fue seccionado posteriormente en bloques, por fallas con diferentes desplazamientos, encontrándose éstos basculados con diferentes inclinaciones. En estos casos las fallas regionales tienen el papel principal de permitir el ascenso de los fluidos termales a la superficie, así como la recarga de los acuíferos.

- Areas de intersección de sistemas de fallas distensivas, con edificios volcánicos o complejos dómicos. Los ejemplos son La Soledad en México, Zunil y Moyuta en Guatemala, Ahuachapán-Chipilapa en El Salvador, El Tatio en Chile y Copahue en Argentina. En estas áreas la fuente de calor ha sido proporcionada por la cámara magmática de un centro volcánico, encontrándose el yacimiento en el basamento volcánico relativo o bien en rocas del basamento prevolcánico, desplazado lateralmente con respecto a la cámara magmática. Por un lado el yacimiento está siendo controlado por rocas del basamento que confina a la cámara magmática, y por otro por fallas distensivas que permiten también la circulación vertical de fluidos termales.

- Areas en depresiones caldéricas de simples edificios volcánicos, como el área geotérmica de El Tacaná en México. En estos casos las depresiones caldéricas son de dimensiones limitadas y están contenidas dentro de los edificios volcánicos. Las calderas constituyen las estructuras que limitan a los yacimientos, y las fallas que bordean al colapso permiten la salida de los fluidos termales.

- Areas en depresiones ligadas a estructuras distensivas (grabenes) asociadas a "Rifts" continentales o a estructuras transtensivas (cuencas de "pull-apart") asociadas a grandes fallas transcurrentes. Ejemplos de este tipo se encuentran en México en el campo geotérmico de Cerro Prieto y posiblemente en Ixtlán de los Hervores, Cuitzeo y Las Tres Vírgenes. En estas áreas la fuente de calor es producida por una anomalía regional relacionada a un adelgazamiento de la corteza y/o a la presencia de cámaras magmáticas antiguas en proceso de enfriamiento. El yacimiento está generalmente en una sucesión clástica sedimentaria o de lavas andesíticas, asociado a las fallas que bordean o son transversales a las que forman las depresiones y que constituyen la vía de salida de los fluidos termales. En estos campos es posible encontrar diversos niveles productivos, con temperaturas que decrecen hacia la superficie. Estas situaciones son raras en América Latina.

#### 4.3.1.3 Resultados

Durante el desarrollo del estudio y al final del mismo, los resultados de las investigaciones geológicas deberán presentarse en diferentes informes, de los cuales los más importantes son los siguientes:

**Informe de Síntesis de los Datos Recopilados y Evaluados.** Este informe será preparado por el personal especializado responsable de la ejecución del trabajo de recopilación y evaluación de la información geológica, y en él se sintetizarán los aspectos de interés geotérmico. El resultado técnico de la evaluación de la información contendrá los aspectos referentes a la programación y planificación del trabajo de campo y de laboratorio.

El programa de campo y de laboratorio deberá ser congruente con el grado de conocimiento de la geología de la región en estudio, alcanzado con base en las investigaciones preexistentes las cuales debieron ser analizadas en la fase inicial del reconocimiento geotérmico.

**Informes de Avance del Programa.** Estos informes son de carácter técnico y tienen como objetivo establecer un control del avance del trabajo programado. Estos informes se prepararán al final de cada mes o de cada etapa del trabajo, indicando el porcentaje de avance de las actividades durante la ejecución del proyecto.

**Informe Geovulcanológico Preliminar.** Al final de la investigación de campo se procederá a la elaboración de un informe geológico que tendrá el carácter preliminar y que será complementado posteriormente con datos de laboratorio.

**Informes de Laboratorio.** Los trabajos desarrollados en laboratorios deberán presentarse en informes independientes según sea el tipo de análisis realizado. Los principales informes de laboratorio son los siguientes:

- Informe petrográfico.
- Informe mineralógico.
- Informe de análisis químicos de rocas.
- Informe de la caracterización de las cámaras magmáticas evolucionadas en áreas de interés geotérmico.
- Informe de dataciones de rocas.
- Informe de análisis por microsonda electrónica

**Informe Geológico Final.**- Este informe integra la información procesada en el gabinete y la obtenida en el campo, así como su

correlación con los resultados de la dataciones y los estudios petrográficos, petrológicos, mineralógicos y químicos de las rocas. Incluirá la cartografía geológica a la o las escalas previstas, tanto regionales como locales, incluyendo un mapa estructural y vulcano-tectónico. Contendrá información de las áreas termales y las zonas de alteración. Deberá incorporar un mapa de ubicación de muestras. Adjuntará secciones geológicas y esquemas estructurales, así como también el esquema conceptual del o de los sistemas vulcanológicos con los cuales se relacionen las anomalías termales. El texto del informe contendrá la descripción de los elementos geológicos regionales, las condiciones estructurales y vulcanotectónicas, una descripción del vulcanismo reciente y antiguo y el esquema preliminar del o de los sistemas geotérmicos identificados. Finalmente se señalará la importancia de las anomalías termales y se indicará el orden prioritario de los estudios geológicos que se deberán llevar a cabo en la siguiente etapa de prefactibilidad, en las áreas de mayor interés geotérmico.

El informe incluirá una síntesis de los aspectos geológicos fundamentales desde el punto de vista geotérmico, la cual será integrada a la síntesis general del Estudio de Reconocimiento del Proyecto.

El conocimiento general de la región permitirá preparar un programa de estudios geológicos de detalle para la siguiente etapa de la exploración (Prefactibilidad), el cual deberá ser incluido en el Informe Final del Estudio de Reconocimiento.

#### 4.3.1.4 Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos

El personal especializado necesario para la ejecución de las actividades involucradas en las investigaciones geológicas, normalmente es el siguiente:

Para los trabajos de gabinete y campo:

- 1 Geólogo vulcanólogo,
- 1 Geólogo estructural.

Para los trabajos de laboratorio:

- 1 Petrógrafo-petrólogo.

Para la coordinación del estudio:

- 1 Especialista en geotermia.

El tiempo total para la ejecución de las investigaciones geológicas de reconocimiento depende generalmente de la extensión del área del proyecto y de las facilidades en cuanto a personal especializado, equipo de transporte y laboratorios que existan. Sin embargo,

considerando condiciones normales de trabajo, el tiempo de ejecución de esta actividad cubriendo áreas  $\geq 1,000 \text{ km}^2$  se estima podría ser del orden de 8 a 12 meses.

El costo de los estudios geológicos y vulcanológicos, incluyendo gastos administrativos, de laboratorio, servicios de consultoría y otros puede fluctuar entre US\$ 200,000 y US\$ 400,000 dólares, dependiendo del área por cubrir y de que las investigaciones se contraten con una compañía nacional o del extranjero.

#### **4.3.2 Geoquímica**

##### **4.3.2.1 Objetivos Específicos**

Sobre la base de que el objetivo fundamental de un estudio de reconocimiento regional es la integración de un inventario de las áreas termales, que incluya información suficiente para permitir la jerarquización de dichas áreas para estudios subsecuentes de prefactibilidad, para estos fines los estudios geoquímicos juegan un papel fundamental puesto que proveen una estimación de las temperaturas en el subsuelo en una determinada área, así como información cualitativa sobre la extensión de cada sistema hidrotermal.

##### **4.3.2.2 Actividades y Alcances**

###### **4.3.2.2.1 Trabajo de Gabinete**

El estudio geoquímico puede partir de una definición de áreas de interés, basada en la información geológica recopilada sobre las anomalías termales existentes en la región en estudio (manantiales calientes, fumarolas, solfataras, etc.). Ocasionalmente existirán datos sobre estudios geoquímicos previos, los cuales, dependiendo de la calidad de los análisis químicos realizados, podrían proveer información inicial importante.

Una vez integrada esta información inicial y habiendo asegurado el apoyo de uno o más laboratorios para los análisis químicos e isotópicos, el estudio geoquímico de reconocimiento puede ser llevado a cabo por un geoquímico y un asistente. Los requerimientos de recursos humanos y de equipo para el estudio geoquímico en la etapa de reconocimiento se presentan en la tabla No. 1:

###### **4.3.2.2.2 Trabajo de Campo**

###### **Selección de Sitios para la Toma de Muestras**

En la etapa de reconocimiento el muestreo en cada área termal normalmente será limitado (entre veinte y veinticinco muestras). Se tomarán muestras de las manifestaciones termales de mayor

Tabla No. 1

RESUMEN DE REQUERIMIENTOS DE RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES PARA LA ETAPA DE RECONOCIMIENTO

**Recursos Humanos**

**Indispensable:** Un técnico especializado, con entrenamiento en métodos de colección de muestras y la observación/descripción de manifestaciones termales. Un geoquímico que planifique (aunque no ejecute) la campaña de muestreo, que coordine los trabajos de laboratorio y lleve a cabo la interpretación de los resultados. Apoyo local para el muestreo (un guía/motorista y una o dos personas, según el caso).

**Optimo:** Un geoquímico especializado en exploración geotérmica que, con la asistencia de un técnico como el descrito arriba, dirija las actividades de campo, coordine los trabajos de laboratorio y lleve a cabo la interpretación de los resultados. Apoyo local (ver párrafo anterior).

**Equipo**

**Indispensable:** Termómetro, potenciómetro o papel para medición de pH, botellas para muestras líquidas sin dilución, con dilución y acidificadas, pipetas, filtros (cartucho/jeringa o de otro tipo), recipiente con ácido nítrico o clorhídrico, botellas para muestreo de gases (aire evacuado, y provistas de volumen conocido de NaOH 4N), embudo, serpentín, tubo de plástico para alta temperatura. Apoyo de un laboratorio competente para análisis químicos.

**Optimo:** Lo anterior más un conductímetro y botellas para muestras para análisis isotópicos. Apoyo de un laboratorio competente para análisis isotópicos.

temperatura (manantiales y fumarolas), así como muestras representativas de las aguas no termal (manantiales fríos, pozos domésticos o de irrigación, ríos, lagunas, etc.). Dependiendo de la cantidad de información previa disponible, podría ser necesaria la exploración preliminar de la zona para llevar a cabo una adecuada selección de los puntos de muestreo. Con el fin de evitar la duplicación de actividades, este reconocimiento se deberá planear y ejecutar en coordinación con el estudio hidrogeológico.

En cada manifestación termal visitada se tomará nota de su temperatura, el pH, el flujo estimado, los depósitos de sólidos y la apariencia general. Su localización se marcará en un mapa y se elaborará un dibujo esquemático que describa su forma y otras características, de tal manera que resulte posible la localización de todos y cada uno de los puntos para posibles muestreos confirmatorios o estudios subsecuentes. La temperatura deberá ser medida en el afloramiento más caliente y el flujo medido o al menos estimado semicuantitativamente.

Se tomará nota de los rasgos indicativos del tipo de manifestación de que se trate. Un manantial de aguas limpias de alta temperatura y con depósitos de sílice, probablemente produzca agua de pH cercano al neutro y con altas concentraciones de ion cloruro y de sílice; las muestras colectadas en este tipo de manantiales son útiles para los cálculos geotermométricos. Por otro lado, un manantial con aguas turbias y humeantes pero de bajo flujo, probablemente produzca aguas ácidas con alto contenido de ion sulfato; las muestras recolectadas en este tipo de manantiales no son útiles para cálculos geotermométricos. Las aguas de manantiales limpias y tibias frecuentemente representan mezclas de un componente termal de alta temperatura con aguas frías subterráneas; el muestreo de estas aguas es útil para la definición de los procesos de mezcla en el subsuelo. La ubicación de este tipo de aguas puede ayudar a determinar la salida lateral o marginal de fluidos geotérmicos, que en ocasiones dan lugar a depósitos de travertino y la presencia de aguas con  $\text{NaHCO}_3$ . La tabla No. 2 presenta una lista de los tipos de agua característicos de áreas geotérmicas, y un breve comentario sobre su origen y de la información que pueden proporcionar.

### **Muestreo de Aguas de Manantiales**

Las aguas termal que emanan de un manantial están fuera de equilibrio químico, por lo cual su muestreo debe ser llevado a cabo con precaución para asegurar la calidad de la información derivable de su análisis químico. Las muestras pueden ser colectadas en botellas de plástico lavadas con ácido nítrico diluido. Antes de colectar la muestra, la botella deberá ser enjuagada con el agua que se muestreará. Además de una muestra sin

tratamiento (250 a 500 ml), se debe coleccionar una muestra (250 ml) filtrada y acidificada para el análisis de cationes, y una muestra (125 ml) diluida (1:10) con agua destilada para el análisis de sílice. El objeto de la acidificación es el de prevenir la posible precipitación de sales de calcio, magnesio y otros cationes. El agua filtrada debe pasarse a través de un filtro con poros de aproximadamente 0.5 micrones. La subsecuente acidificación deberá hacerse con ácido concentrado, nítrico o clorhídrico, hasta un pH de 1 a 2. Se debe evitar la acidificación sin previa filtración, debido a que esto podría llevar a la disolución de materia finamente dividida que se encuentre en suspensión, y esto alteraría la composición química del agua. Para la filtración se puede emplear una bomba de vacío portátil o una jeringa con un cartucho de filtración adecuado.

Tabla No. 2

RESUMEN DE TIPOS DE AGUAS NATURALES, DE SU ORIGEN Y DE LA INFORMACION OBTENIBLE

TIPO DE FUENTE	FUENTE DEL FLUIDO	TIPO DE INFORMACION OBTENIBLE
Manantiales y pozos fríos.	Aguas subterráneas someras.	Hidrogeología. Tipos de aguas subterráneas someras. Efecto del sistema hidrotermal sobre estratos suprayacentes.
Manantiales ebullentes con aguas cloruradas, con alta sílice y pH neutro.	Agua del yacimiento hidrotermal, enfriada en mayor o menor grado por procesos de ebullición, mezcla con aguas someras, y transmisión de calor a la roca.	Hidrogeología. Temperatura y condiciones químicas del fluido geotérmico en el yacimiento. Tamaño, tipo y ubicación de zonas de ascenso y descarga lateral del fluido geotérmico. Potencial para incrustación/corrosión.
Manantiales calientes/tibios.	Mezcla de agua del yacimiento con aguas subterráneas someras.	Procesos de mezcla en el subsuelo. Temperatura y condiciones químicas del fluido geotérmico en el yacimiento.
Manantiales de mediana/baja salinidad, con aguas bicarbonatadas.	Mezcla de aguas subterráneas someras con vapor (y condensado de vapor) geotérmico.	Ubicación de zonas de ebullición.
Manantiales con aguas ácidas de alta concentración de sulfatos.	Aguas subterráneas someras calentadas por vapor geotérmico.	Ubicación de zonas de ascenso de vapor.
Fumarolas.	Vapor separado del líquido del yacimiento.	Temperatura del fluido en el yacimiento. Contenido de componentes volátiles.
Pozos exploratorios.	Acuífero interceptado.	Condiciones físicas y químicas del fluido geotérmico en el yacimiento. Potencial de corrosión/incrustación.

Frecuentemente el pH de la muestra sin tratamiento es inestable debido a que las aguas pierden bióxido de carbono. Tomando en cuenta esto, es necesario medir el pH en el momento del muestreo, empleando papel de medición adecuado (con resolución de 0.1 unidades) o un potenciómetro portátil con corrector por temperatura.

Además de las muestras anteriores, deberán tomarse muestras para análisis de isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio) y tritio (125 ml y 1,000 ml, respectivamente).

#### **Muestreo de Vapor en Fumarolas**

En las áreas termales que presenten manifestaciones en forma de fumarolas, se deberán tomar muestras de vapor para el análisis de gases. Esto es particularmente importante en los casos en que no afloran en el área manantiales con aguas de tipo clorurado-sódico, puesto que estas muestras darán la única estimación de la temperatura en el subsuelo. El vapor se deberá condensar a través de un serpentín que no admita fugas de ninguna especie, colectándolo en botellas de 300 ml de capacidad, conteniendo 100 ml de hidróxido de sodio 4N. En forma previa a la expedición para el muestreo, estas botellas deberán prepararse en el laboratorio, tratándose antes y después de añadir la solución de hidróxido de sodio y evacuando el aire en una línea de vacío.

El personal encargado del muestreo deberá estar familiarizado con las técnicas adecuadas para la obtención de las muestras. Estas han sido documentadas por varios autores (consultar por ejemplo a Giggenbach y Glover, 1989). Asimismo, existen varias fuentes de información que describen las metodologías más adecuadas para la determinación de las especies químicas arriba citadas (ejemplos: Giggenbach y Glover, 1989; González et al, 1985; Watson, 1978).

#### **4.3.2.2.3 Trabajo de Laboratorio**

##### **Análisis Químicos e Isotópicos**

El laboratorio que llevará a cabo los análisis debe ser seleccionado cuidadosamente, basándose en su desempeño previo y en la calidad de su personal y equipo. El responsable de los análisis deberá trabajar en coordinación con el geoquímico que tome las muestras y ambos deberán discutir sobre las especies químicas e isotópicas que se deberán analizar, la metodología de análisis y sobre los tipos de muestras que se deberán tomar, incluyendo aspectos tales como el volumen de muestra y el tratamiento que se le deba dar a ésta en el campo. Parte del equipo de muestreo del geoquímico (potenciómetro o papel para medición de pH, botellas

para muestra, etc.) podrá ser seleccionado o proporcionado por el responsable de los análisis.

Antes de llevar a cabo los análisis, el responsable deberá ser informado por el geoquímico sobre la naturaleza de las muestras colectadas. Esta cooperación es conveniente puesto que contribuirá a la obtención de resultados de análisis más exactos y mantendrá informado al geoquímico sobre las limitaciones de estos resultados y sus repercusiones sobre la interpretación.

El conjunto óptimo de análisis se describe en la tabla No. 3, para cada uno de los tipos de agua descritos en la tabla No. 2.

La información sobre las concentraciones de sílice y de los iones sodio, potasio, calcio y magnesio, se utiliza para los cálculos geotermométricos. Esta información, más la del pH y las concentraciones de los iones cloruro, sulfato y especies carbonatadas, permitirá determinar el tipo de agua y su origen. El boro y los iones de litio, fluoruro y amonio son trazadores del agua geotérmica. En la etapa de reconocimiento podría parecer innecesario el análisis de todos los constituyentes indicados, pero en etapas subsecuentes, cuando se deseen comparar las nuevas evidencias con la información pre-existente, resultará deseable contar con análisis completos.

Las concentraciones de los iones de litio, amonio y fluoruro, además de tener utilidad como trazadores del agua geotérmica, permiten una mejor verificación de la calidad global del análisis mediante el método de balance de cargas.

El análisis de la fase gaseosa deberá incluir la determinación de las concentraciones relativas de bióxido de carbono, ácido sulfhídrico, hidrógeno, metano, nitrógeno, amoníaco, argón y helio (Tabla No. 3).

Las primeras seis se utilizan en cálculos geotermométricos, mientras que las dos últimas, más la del nitrógeno, permiten determinar el origen del fluido. Las técnicas adecuadas para muestreo de fluidos geotérmicos han sido documentadas por varios autores (por ejemplo Giggenbach y Glover, 1989).

Los análisis isotópicos de oxígeno-18, deuterio y tritio en aguas naturales, se emplean en estudios hidrológicos que buscan determinar las zonas de recarga superficial de los acuíferos y para obtener información sobre procesos de ebullición y de mezcla de agua de varios orígenes en el subsuelo. Aunque la interpretación de este tipo de evidencia en la fase de reconocimiento podría resultar limitada, la información podría ser de gran utilidad en fases subsecuentes que requieran una interpretación detallada de la hidrología de la zona donde se localice una determinada área termal.

Tabla No. 83

RESUMEN DE TIPOS DE AGUAS NATURALES

Y REQUERIMIENTOS DE OBSERVACION Y ANALISIS

TIPO DE FUENTE	ANALISIS DE LABORATORIO	OTRAS OBSERVACIONES Y MEDICIONES
Manantiales y pozos fríos.	pH, Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SiO <sub>2</sub> , 18O, 2H.	Ubicación, elevación, temperatura, flujo.
Manantiales ebullentes con aguas cloruradas, con alta sílice y pH neutro.	Análisis completo: pH, Li <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , F, AlO <sub>2</sub> , B, 18O, 2H.	Ubicación, elevación, temperatura, flujo, depósitos minerales asociados.
Manantiales calientes/tibios.	Completo en caso de alto flujo. Parcial (pH, Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SiO <sub>2</sub> ) en caso de bajo flujo.	Ubicación, elevación, temperatura, flujo, variaciones de temperatura y flujo con las épocas del año.
Manantiales de mediana/baja salinidad, con aguas bicarbonatadas.	Parcial sin SiO <sub>2</sub> .	Ubicación, elevación, temperatura, flujo, variaciones de temperatura y flujo con las épocas del año, depósitos minerales asociados.
Manantiales con aguas ácidas de alta concentración de sulfatos.	Parcial sin SiO <sub>2</sub> .	Ubicación, elevación, temperatura, flujo.
Fumarolas.	Cociente agua/gas incondensable en condensado de vapor, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , Ar, He. En el vapor condensado: 18O, 2H.	Ubicación, elevación, temperatura, flujo.
Pozos exploratorios.	Análisis completos. Información suficiente para el cálculo de concentración en la descarga total del pozo de cada una de las especies químicas e isotópicas arriba citadas.	Ubicación, elevación, temperatura, presión de cabezal, gastos de vapor y líquido (o gasto total y entalpía específica), presión de separación de agua/vapor colectados.

4.3.2.2.4 Interpretación de la Evidencia Geoquímica

La principal aportación del estudio geoquímico durante la etapa de reconocimiento, es la estimación de temperatura en el subsuelo en una determinada área termal mediante la aplicación de los llamados geotermómetros. Estos son algoritmos basados en la concentración de solutos, o en cocientes de concentración de solutos o especies

isotópicas. Los geotermómetros más frecuentemente empleados son el de sílice (Fournier y Potter, 1982), basado en la solubilidad del cuarzo, y el de sodio-potasio-calcio (Fournier y Truesdell, 1973), basado en las concentraciones de esos tres componentes iónicos; aunque se han desarrollado otros (ver la revisión de Fournier, 1989).

ST-100 30 0-17

Los geotermómetros se fundamentan en la premisa de que existen reacciones químicas entre el fluido geotérmico y los minerales constituyentes de la roca, que se encuentran en equilibrio. Puesto que las proporciones de reactivos y productos de reacción son una función de la temperatura, la determinación de sus concentraciones en solución permite estimar este parámetro. Una segunda premisa, igualmente importante, es la suposición de que estas concentraciones relativas no varían substancialmente durante el ascenso del fluido geotérmico a la superficie.

En el caso de un manantial de alto flujo, que produzca agua proveniente de un yacimiento geotérmico sin alteración substancial por re-equilibrio con la roca durante su ascenso, o por mezcla con otras aguas de la superficie o el subsuelo, la mayoría de los geotermómetros proveerían estimaciones congruentes entre sí. Sin embargo, en el caso más frecuente de un manantial que produzca agua del yacimiento parcialmente re-equilibrada o mezclada con una fracción substancial de aguas frías superficiales o someras, los diversos geotermómetros podrían dar estimaciones muy variadas. Esto se debe en parte a que las reacciones sobre las que se fundamentan estos geotermómetros tienen cinéticas distintas y son afectadas en distinto grado por los procesos de re-equilibrio.

En los casos en que no exista concordancia entre las estimaciones de temperatura aportadas por distintos geotermómetros, la interpretación de estos resultados deberá hacerse con extremo cuidado. Tanto los procesos de re-equilibrio como los de dilución con aguas frías, generalmente llevan a sub-estimaciones de las temperaturas en el subsuelo. Sin embargo, la aplicación de geotermómetros a aguas que no sean de origen geotérmico y cuya composición no sea el resultado de equilibrio químico entre el agua y los minerales de la roca, puede llevar a peligrosas sobre-estimaciones de la temperatura. Por ejemplo, las aguas de baja salinidad que han estado en contacto con rocas volcánicas con abundancia de vidrio y las aguas ácidas sulfatadas, tienden a presentar altos cocientes de concentración de potasio sobre sodio y altos contenidos de sílice, porque estos solutos han sido lixiviados fuera del equilibrio químico. La aplicación de geotermómetros a estos casos producirá estimaciones falsas de la temperatura.

El denominado geotermómetro de composición catiónica (CCG) utiliza algoritmos basados en características químicas para determinar si un agua natural es de probable origen geotérmico. Esta particularidad permite la aplicación de este geotermómetro a

cualquier agua natural, minimizando el peligro de sobreestimar su temperatura de origen (Nieva y Nieva, 1987).

Se han desarrollado algunos geotermómetros basados en la composición de la fase gaseosa (D'Amore y Panichi, 1980; Arnórsson y Gunnlaugsson, 1985). Estos son difíciles de aplicar a muestras de manifestaciones naturales (fumarolas o manantiales), debido a que la mayoría de ellos requiere el conocimiento de la relación agua/gas en el fluido geotérmico, la cual es no determinable en estos casos. Adicionalmente, los procesos de ebullición del agua geotérmica o la condensación parcial del vapor durante su ascenso a la superficie, altera las proporciones de los componentes gaseosos, tendiendo esto a falsear las estimaciones de temperatura. A pesar de estas limitaciones, la aplicación del geotermómetro de D'Amore y Panichi (1980) ha resultado de utilidad en una variedad de casos. Los geotermómetros de gases presentan su mayor utilidad al aplicarse a muestras colectadas de pozos profundos, en las fases subsecuentes de la factibilidad y desarrollo de los recursos geotérmicos.

Existe una variedad de trabajos que revisan la aplicación de geotermómetros en estudios geotérmicos (White, 1970; Truesdell, 1975; 1993; Ellis y Mahon, 1977; Ellis, 1979; Fournier, 1981; 1989; 1992; y Henley et al, 1984; Giggenbach, 1988). Estos no se transcriben en esta guía por no ser tal su propósito, pero se recomienda que los responsables de la investigación geotérmica estén familiarizados al menos con los más recientes.

Cabe mencionar que en los reconocimientos geotérmicos podrían existir algunas áreas termales donde el fluido geotérmico no se manifieste en la superficie sin sufrir una alteración substancial por mezcla con aguas someras. En estas situaciones el valor de la aplicación de las técnicas geotermométricas será limitado. En cualquier estudio geoquímico deberá evitarse la posible confusión entre un dictamen negativo sobre el valor de un recurso geotérmico, que en su caso deberá estar bien fundamentado sobre evidencias de alta calidad, y un dictamen de no aplicabilidad de las técnicas convencionales debido a la indisponibilidad de una evidencia adecuada.

Durante la etapa de reconocimiento, además de la estimación de las temperaturas en el subsuelo, la geoquímica puede permitir la obtención de otro tipo de información. Si el censo de manifestaciones termales de un área determinada y su clasificación con base en observaciones de campo y de laboratorio son lo bastante completos, la distribución geográfica de los diversos tipos de manifestaciones hidricas o gaseosas (fumarolas, manantiales con aguas ácidas, aguas de tipo bicarbonatado sódico, de tipo clorurado sódico), puede dar información sobre las zonas de ascenso de vapor, flujo lateral, ebullición y descarga, que con la información derivable del estudio geológico podría dar una idea preliminar de la estructura del sistema hidrotermal.

Tomando en cuenta las evidencias en diversos campos geotérmicos, una hipótesis de trabajo que se considera razonable es aquella que indica que el tamaño (área) de una zona sobre la cual se distribuyen varias manifestaciones hidrotermales y la magnitud de la descarga natural de calor asociada a estas manifestaciones, es indicativa del tamaño del yacimiento hidrotermal. Esto es estrictamente cierto en los casos de sistemas de líquido dominante, pero no lo es en el caso de sistemas de vapor dominante.

#### 4.3.2.3 Resultados

En la fase de reconocimiento, la investigación geoquímica proveerá una estimación de la temperatura de yacimiento para cada área termal explorada en la región bajo estudio. Para las principales áreas geotérmicas identificadas, podría también proveer una estimación cualitativa del tamaño del sistema hidrotermal y un esquema general de su estructura y del patrón general de flujo. Esta información, complementada con la provista por otras disciplinas geocientíficas aplicadas en el estudio de reconocimiento, servirá para llevar a cabo la jerarquización preliminar de las áreas termales de acuerdo a su probable potencial, para su ulterior exploración de detalle.

El estudio geoquímico deberá generar un mapa en escala regional (1:100,000 ó 1:50,000) que muestre la ubicación de las áreas termales exploradas. Para cada una de éstas, se deberá preparar un mapa de menor escala (1:25,000 ó 1:10,000) que muestre la topografía y la localización de las fuentes (termales y no termales) visitadas y muestreadas. Para cada fuente se deberá generar un mapa esquemático que señale su forma y ubicación, de tal manera que resulte posible su localización en visitas o muestreos subsecuentes. La tabla No. 4 provee un resumen de la información que deberá generarse durante el estudio geoquímico en la fase de reconocimiento.

#### 4.3.2.4 Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos

Como se menciona en la tabla No. 1 la investigación geoquímica a nivel de reconocimiento requiere como mínimo:

- Para la coordinación e interpretación:
  - 1 Geoquímico especializado en exploración geotérmica.
- Para los trabajos de campo:
  - 1 Técnico especializado en muestreo geoquímico.

En esta primera fase de la investigación se ha considerado la conveniencia de utilizar los servicios de laboratorios químicos e

Tabla No. 4

**ESTUDIO GEOQUIMICO. RESUMEN DE LA INFORMACION A GENERAR DURANTE LA ETAPA DE RECONOCIMIENTO**

**Información de Campo a Generar**

**Indispensable:** Para cada área termal: la ubicación de cada sitio visitado en un mapa de escala adecuada (1:25,000 ó 1:10,000), un dibujo esquemático de cada fuente visitada o muestreada señalando el sitio exacto de muestreo con suficiente detalle para su posterior localización y una estimación semicuantitativa del flujo. Además, para las fuentes de agua: una muestra sin tratamiento, una muestra diluida (1:10) y una muestra filtrada/acidificada. De fumarolas o fuentes burbujeantes: muestra de gas colectada en botella especial. Adicionalmente se deberá hacer una descripción de la alteración superficial asociada a las manifestaciones termales.

**Optima:** Lo anterior más muestras para análisis isotópicos. En fuentes de agua: medición de la conductividad específica.

**Análisis de Laboratorio**

Según lo indicado en la tabla No. 3.

**Interpretación de la Evidencia**

**Indispensable:** Estimación de temperatura de yacimiento para cada área termal.

**Optima:** Para cada área: lo anterior más una estimación cualitativa del tamaño del sistema hidrotermal y un esquema preliminar mostrando la ubicación de zonas de ascenso de vapor, flujo lateral, ebullición y descarga.

isotópicos establecidos en el país o en el extranjero, con amplia experiencia en trabajos sobre geotermia. De esta manera, además de reducirse el personal necesario para el laboratorio, el equipo geoquímico se simplificará al requerido para el muestreo de campo el cual consistirá esencialmente de lo expuesto en la tabla No. 1.

Por lo que respecta al tiempo necesario para la realización del estudio geoquímico, la experiencia en América Latina permite señalar que el trabajo de campo, laboratorio, interpretación e informe se puede desarrollar en un período de 3 a 7 meses, dependiendo del área por cubrir, de la información sobre la ubicación de las fuentes termales, de la dificultad de acceso a éstas y de las facilidades existentes en el país especialmente en lo referente a servicios de laboratorio. En buena medida el tiempo requerido para el estudio estará determinado por la rapidez con que se lleven a cabo los análisis químicos e isotópicos, y, por lo tanto, es importante programar oportunamente la intervención de los laboratorios que se vayan a encargar de estos trabajos.

El costo del estudio geoquímico dependerá esencialmente de la magnitud del trabajo de campo, del número de muestras por analizar y de las determinaciones por realizar. Considerando la obtención y análisis de muestras de 2 ó 3 áreas termales, los costos del estudio podrían variar US\$ 15.000 y US\$ 50,000 dólares.

#### 4.3.3 Geofísica

##### 4.3.3.1 Objetivos Específicos

La geofísica es una ciencia que se ocupa del estudio de las rocas en el interior de la Tierra, mediante la medición de algunas de sus propiedades físicas. El análisis e interpretación de esas mediciones permite obtener ciertos parámetros útiles para resolver problemas geológicos, geotérmicos, hidrogeológicos y geotécnicos.

En la investigación geotérmica la geofísica se utiliza como un recurso para determinar en forma indirecta las condiciones estructurales, estratigráficas y ciertas anomalías que reflejen la posible existencia de un yacimiento geotérmico en el subsuelo. Sin embargo, en la etapa de reconocimiento donde los estudios están enfocados a evaluar las posibilidades energéticas de regiones muy extensas, no es recomendable llevar a cabo ninguna prospección geofísica, debido al costo elevado que tendría el cubrir totalmente tales regiones. El objetivo de la geofísica en esta situación será, únicamente, contribuir a la evaluación de los recursos geotérmicos mediante el análisis o procesamiento de los datos geofísicos existentes, enfocándolos a definir, cuando sea posible:

- Condiciones geológico-estructurales regionales.

- La estratigrafía y ciertas características hidrogeológicas.
- Anomalías geotérmicas.

#### 4.3.3.2 Actividades y Alcances

##### 4.3.3.2.1 Recopilación y Evaluación de la Información Geofísica Existente

Durante la primera fase del estudio de reconocimiento se deberá recopilar la información geofísica existente de la región, sobre todo la relacionada con la gravimetría, magnetometría, los métodos eléctricos y electromagnéticos, la sismología y los registros de pozos, cuyos objetivos y alcances en la geotermia se describen a continuación:

**Gravimetría.-** Este método se emplea principalmente en la delimitación de estructuras regionales (fallas, grabens, anticlinales, sinclinales, etc.), cuerpos intrusivos y del basamento en una región dada, y se basa en el análisis de las variaciones del campo gravitacional terrestre provocadas por masas de diferente densidad. Con la interpretación de anomalías de la gravedad es posible determinar estructuras geológicas que en ocasiones no es posible observar durante los levantamientos de superficie, sin embargo existen en el subsuelo y llegan a tener alguna relación con la actividad geotérmica.

Para detectar tales estructuras, durante la recopilación de la información se buscará reunir los mapas de anomalías de Bouguer procedentes de levantamientos gravimétricos regionales, que cubran de preferencia un área mayor a la considerada en el estudio de reconocimiento. Será conveniente contar con mapas de localización de las estaciones de medición, mapas de la anomalía regional gravimétrica, mapas de la anomalía residual gravimétrica, registros de densidad y los modelados en 2 y 3 dimensiones que se hayan realizado.

La utilidad de la información gravimétrica dependerá principalmente de la extensión del área cubierta por los levantamientos y por el número y distribución de las estaciones de medición. Levantamientos de áreas muy reducidas o de perfiles aislados, aportarán muy poca información para los objetivos estructurales del área que se haya seleccionado. Estudios con baja densidad de puntos de medición o mal distribuidos en el área, darán lugar a interpretaciones geológicas que no reflejarán la completa situación del área en investigación.

**Magnetometría.-** Este método se emplea principalmente para determinar rasgos estructurales, espesores de coberturas sedimentarias o para cartografiar la estructura del basamento magnético. Se basa en el análisis de las diferencias del campo

magnético terrestre debidas a la presencia de rocas con diferente susceptibilidad magnética.

Para su utilización en reconocimientos geotérmicos se recopilarán los mapas de intensidad magnética de campo total, obtenidos en levantamientos aeromagnéticos o terrestres regionales que cubran, de preferencia, un área mayor a la involucrada en el estudio de reconocimiento. Será conveniente contar con planos de localización de las líneas de vuelo y modelos bidimensionales y tridimensionales de interpretación.

La evaluación sobre la utilidad de los datos que aporta la magnetometría es similar a la gravimetría en relación a la extensión del área prospectada y al patrón de cobertura empleado.

**Métodos Eléctricos y Electromagnéticos.-** Estos métodos se emplean en determinaciones estratigráficas y estructurales, así como en la detección de anomalías de la conductividad eléctrica que puedan estar relacionadas con yacimientos geotérmicos. Se basan en el análisis de la distribución de las propiedades eléctricas de las rocas en el subsuelo, principalmente su resistividad.

Como la resistividad de las rocas depende de la porosidad, temperatura, grado de saturación y de la salinidad del fluido que contienen, los métodos eléctricos constituyen la herramienta más adecuada para la identificación de los yacimientos geotérmicos. El análisis del subsuelo a través de la determinación de las propiedades eléctricas de las rocas mediante alguno o algunos de los métodos eléctricos o electromagnéticos, constituye la técnica más utilizada en la investigación geotérmica.

Para su aplicación en la fase de reconocimiento se recopilarán, tanto del área como de su vecindad, datos referentes a: sondeos eléctricos verticales en cualesquiera de sus modalidades (Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo, etc.), sondeos magnetoteléuticos y perfilajes o calicatas eléctricas. Deberán recopilarse los mapas de ubicación de los puntos o líneas de medición, curvas de campo de sondeos, mapas y/o secciones de resistividad y modelos de interpretación.

La utilidad de estos datos dependerá de la extensión y ubicación del área prospectada, del tipo de técnica y dispositivo empleado y de las profundidades de investigación involucradas en los levantamientos. Se puede considerar que si la información recolectada corresponde a levantamientos profundos y de gran extensión, se obtendrá información de utilidad para los objetivos de la investigación geotérmica.

**Métodos Sismológicos.-** Los métodos sismológicos se emplean para obtener información sobre las condiciones estratigráficas y estructurales del subsuelo, y se basan en el análisis de la propagación de ondas sísmicas considerando las leyes de la óptica,

sobre todo en la reflexión o refracción de las ondas elásticas en las interfases de rocas con diferentes impedancias acústicas.

La información sismológica proveniente de las técnicas de reflexión y refracción, que muy rara vez son aplicadas en regiones volcánicas no sólo por su alto costo sino también por la problemática de su interpretación, es una herramienta valiosa para el conocimiento del subsuelo especialmente en regiones donde predominan las rocas sedimentarias.

Para su uso en un reconocimiento geotérmico, se recopilarán los perfiles de levantamientos sísmicos de reflexión o refracción profunda, cuyas líneas de medición se ubiquen en el área de estudio o en su vecindad; deberán obtenerse los planos de localización de las líneas así como los mapas y/o secciones ya interpretadas.

La utilidad de la información de reflexión y refracción de un área determinada dependerá de la ubicación y extensión de las líneas levantadas y de la profundidad de la investigación involucrada. Al igual que la información eléctrica, si los datos no son muy superficiales o de poca extensión, la información que se obtiene será de gran utilidad para determinar las condiciones estratigráficas y/o estructurales del área.

En el caso de los estudios de sismicidad o de sísmica pasiva, éstos serán de gran utilidad si se detecta cierta actividad sísmica dentro del área de estudio y ésta permite definir posibles lineamientos tectónicos de interés geotérmico. Puesto que en esta etapa la información sísmica disponible es de carácter generalmente regional, su examen estará dirigido primero a caracterizar los sectores de mayor sismicidad y después a estudiar su relación con la tectónica y el vulcanismo regional y local.

Para definir lineamientos de la tectónica regional y localizar fallas activas con las cuales se podría relacionar una zona geotérmica, se recopilará la información existente sobre la sismicidad del área a evaluar, solicitándola a los institutos geofísicos nacionales o recurriendo al catálogo mundial de sismos, el cual proporciona la localización, profundidad e intensidad de los focos sísmicos.

**Registros de Pozos.**- La técnica de los registros geofísicos de pozo se emplea para obtener información de las características litológicas y de algunas propiedades físicas de las formaciones atravesadas por los pozos o barrenos de exploración. Tal información se relaciona generalmente con: la litología, porosidad, permeabilidad, densidad, fluido de saturación, temperatura, etc.

Para conocer en lo posible información del subsuelo en el área del estudio regional, se recopilará todo tipo de registros eléctricos, nucleares, acústicos, de temperatura y calibración, obtenidos en pozos de preferencia profundos, ubicados dentro y en la vecindad

del área por investigar. Se deberá obtener la ubicación de cada pozo o barreno perforado, las gráficas o datos digitalizados de cada uno de los registros corridos y la interpretación de los mismos.

La utilidad de la información dependerá principalmente de la ubicación y número de pozos con registros, así como de la profundidad, cantidad y tipo de registros obtenidos. Los registros completos de pozos profundos generalmente aportan bastante información para los objetivos geológicos y geotérmicos.

#### 4.3.3.2.2 Análisis y Procesado de la Información Geofísica

El análisis y procesado de la información recopilada se efectuará únicamente sobre la que cumpla los aspectos siguientes: a) que el área de cobertura sea significativa respecto al área involucrada en el estudio de reconocimiento, b) que la densidad y ubicación de los puntos de medición sea la adecuada para determinar condiciones representativas del área y, c) que la profundidad de investigación alcance los objetivos del reconocimiento geotérmico. La información de áreas muy reducidas, así como de perfiles y puntos aislados o dispersos no deberá ser considerada.

La secuencia de pasos a seguir en la interpretación geofísica, se presenta en este documento sin una descripción detallada de la misma, habiéndose considerado los siguientes aspectos:

- Se partió de la base de que la información recolectada es únicamente la básica para cada disciplina geofísica, por lo tanto la secuencia de pasos a seguir comienza con el tratamiento más elemental; si la información es de mayor detalle y/o más completa, se podrá eliminar uno o varios de los pasos aquí indicados.
- Cuando no sea posible obtener información debidamente procesada de alguna de las técnicas geofísicas cuyos mecanismos de interpretación sean complicados y laboriosos, de tal manera que su uso represente tiempos y costos muy elevados para esta etapa de reconocimiento, el análisis que se indica aquí es solamente cualitativo.

**Procesado e Interpretación de la Gravimetría.**- Partiendo de la información gravimétrica recopilada sobre anomalías de Bouguer regionales, se elaborará un mapa de esas anomalías a la misma escala de los levantamientos geológicos, así como mapas de anomalías de alta y baja frecuencia, para separar las anomalías debidas a estructuras profundas y de gran magnitud (anomalías gravimétricas regionales) de las anomalías superficiales y locales (anomalías gravimétricas residuales).

Se analizarán cualitativamente esos mapas generados, basándose en la forma que presentan las curvas de igual valor (isogalas), para definir y ubicar los principales rasgos tectónicos o cuerpos y estructuras geológicas de interés para la investigación geotérmica. Generalmente estas isogalas presentan máximos y mínimos gravimétricos en configuraciones del tipo circular, elongadas o irregulares, así como también zonas de gradientes pronunciados. Los máximos gravimétricos se asocian en muchas áreas con anticlinales o estructuras tipo "horst", mientras que en otras se deben a la presencia de intrusiones básicas densas. En ocasiones se ha observado que los altos gravimétricos corresponden a zonas densificadas por procesos hidrotermales en áreas geotérmicas. Los mínimos gravimétricos por lo general se asocian con depresiones sedimentarias o con intrusiones ácidas de menor densidad. Los gradientes pronunciados se producen por contactos verticales entre materiales con diferente densidad, como ocurre cuando existen fallas.

Con base en el análisis anterior, se realizará una interpretación detallada de perfiles gravimétricos que crucen estructuras de interés, por medio de un modelado bidimensional (el modelado tridimensional se considera hasta la etapa de prefactibilidad) mediante el empleo de programas de cómputo; algunos de éstos se consiguen comercialmente y son de bajo costo. El mejor ajuste del modelo se obtiene cuando se cuenta con datos directos sobre las profundidades de los estratos, para efectuar calibraciones, y cuando se conocen los valores de densidad de las formaciones involucradas, los cuales intervienen en el cálculo de las profundidades. Si no se tienen valores de densidad y se utilizan valores promedio, los modelos deberán considerarse únicamente como primera aproximación de la situación geológica estructural del área. Finalmente, se elaborarán secciones y/o mapas de interpretación a las mismas escalas de los levantamientos geológicos.

**Magnetometría.-** A diferencia de las medidas del campo gravitacional, donde las anomalías son de naturaleza monopolar, en el campo magnético las anomalías se presentan como bipolares por la posición que generalmente guarda el campo inductor. Por esta razón, un análisis cualitativo de máximos y mínimos para correlacionarlos con altos y bajos en la topografía del cuerpo o de los cuerpos que los produce, sería completamente erróneo en la mayoría de los casos.

Considerando estos aspectos, el procesamiento y análisis se iniciará a partir de la construcción del mapa magnético del área, a la misma escala de los levantamientos geológicos, posteriormente, mediante una transformación de reducción al polo, se situarán las anomalías magnéticas en su posición real y se identificarán las que se relacionen con cuerpos de interés geotérmico. Se efectuará un análisis de los alineamientos para identificar las anomalías de que se asocien con estructuras geológicas, y se realizará una

interpretación de los perfiles que crucen esas anomalías magnéticas, por medio de un modelado de 2 1/2 dimensiones (el modelado tridimensional se considerará hasta la etapa de prefactibilidad), para determinar los cuerpos o estructuras geológicas (fallas, horts, grabens, intrusiones ígneas, etc.) que las pudiesen haber originado. Al igual que en la interpretación gravimétrica, en el caso de no disponer de programas de cómputo para la interpretación magnetométrica, se recomienda el empleo de programas de bajo costo que existen en el mercado.

Para el procesado de los modelos se requerirán valores de la susceptibilidad magnética de las rocas; si se emplean valores promedios, los modelos resultantes deberán considerarse como representativos de una primera aproximación de las condiciones geológicas del área.

Con las interpretaciones se configurarán secciones y/o mapas a las escalas unificadas. En el caso de existir información tanto gravimétrica como magnetométrica, deberán correlacionarse ambas interpretaciones para limitar las posibles soluciones.

**Métodos Eléctricos y Electromagnéticos.** - En estos métodos se considerarán dos etapas en la secuencia a seguir para el análisis y procesamiento de la información recolectada. La primera involucra el procedimiento para realizar interpretaciones litológicas y estructurales, y la segunda la presentación de los datos para detectar y delinear anomalías de baja resistividad que pudiesen ser representativas de un yacimiento geotérmico.

En la primer etapa, se procesarán las curvas de sondeos eléctricos verticales o de sondeos magnetotelúricos, a partir de las gráficas de campo de resistividad contra separación eléctrica en los primeros, y de resistividad contra frecuencia en los segundos, para determinar los espesores y resistividades reales de los estratos geoeléctricos interesados, por medio del siguiente procedimiento:

- Generar el plano de ubicación de los sondeos eléctricos y/o magnetotelúricos, a idéntica escala de los levantamientos geológicos; efectuar una interpretación unidimensional de la resistividad mediante técnicas de inversión automatizadas, empleando programas de cómputo de bajo costo en el mercado, así como los datos de los registros geofísicos de los pozos que existan; graficar las secciones de interpretación eléctrica y representarlas sobre el mapa geológico del área para tratar de generar un modelo geoeléctrico tridimensional del área. Por último, si se cuenta con suficientes sondeos magnetotelúricos interpretarlos mediante modelos de 2 dimensiones, empleando programas de cómputo comerciales.

En la segunda etapa, se efectuará únicamente un tratamiento de presentación gráfica en mapas y/o secciones de configuración de la resistividad aparente, para definir zonas de mínimos relativos de

resistividad así como las áreas con los mayores gradientes eléctricos, que manifiesten contrastes de la resistividad entre distintas unidades litológicas o variaciones fisico-químicas en una misma unidad; esto se realiza de la siguiente manera:

- Se ubicará en un plano, a la misma escala de los levantamientos geológicos, los puntos de atribución de la resistividad; se generarán mapas y/o secciones de isorresistividad aparente, con los valores de resistividad y la ubicación de los puntos de atribución de esos valores; se analizará la posición y forma de las áreas de mínimos resistivos, para evaluar su relación con la columna geológica inferida y con las anomalías geotérmicas.

**Métodos Sismológicos.**- Considerando los objetivos de la geofísica en la etapa de reconocimiento geotérmico, no se recomienda realizar ningún tratamiento cuantitativo a la información sismológica (tanto activa como pasiva) recopilada, debido a lo sofisticado de los procesos de interpretación y al costo tan elevado que representa su ejecución. Con la información correspondiente a esta técnica se procederá de la siguiente manera:

- Para el caso de la información sismológica de reflexión, se ubicarán las líneas de los levantamientos de reflexión en un plano con escala unificada; se analizarán cualitativamente las secciones sísmicas cuando únicamente se hayan obtenido en su presentación en tiempo, la ubicación y forma de los reflejos principales permitirán conocer aspectos estratigráficos y estructurales del área; se unificará a la misma escala de los levantamientos geológicos la información que se obtenga ya interpretada en profundidad; se elaborarán mapas y/o secciones de interpretación, cuantitativa o cualitativa, señalando espesores y/o alineamientos para efectuar una correlación con las unidades litoestratigráficas y con la situación estructural del área, interpretada con base en los levantamientos geológicos superficiales.
- Para el caso de la información de sísmica de refracción, únicamente se generarán mapas y/o secciones de interpretación a las mismas escalas de los demás levantamientos, con los espesores y velocidades de propagación compresional determinados, para su correlación con las unidades litoestratigráficas y las estructuras identificadas en el área.
- Para el caso de la información sobre sísmica pasiva, se generará un mapa de la sismicidad de la región, ubicando los focos de sismos que hayan ocurrido en un radio del orden de 250 km, definiendo las áreas de mayor actividad sísmica y los alineamientos de los epicentros para correlacionarlos con la tectónica regional y el vulcanismo del área.

**Registros de Pozos.** - El tratamiento de los registros geofísicos de pozos o barrenos depende del número y tipo de registros corridos, ya que la determinación cuantitativa de cualquier propiedad petrofísica de los materiales atravesados por los pozos o barrenos requiere de la combinación de ciertos tipos de registros; cuando no se cuenta con ellos, el análisis es únicamente cualitativo.

La información que se obtiene de estos registros es variada y depende de las combinaciones que se tengan de ellos; así por ejemplo:

Para un objetivo litológico, es necesario contar con cualquiera de las combinaciones de registros siguientes:

- Radiación Gamma y Perfil Eléctrico
- Radiación Gamma y Potencial Espontáneo
- Potencial Espontáneo y Perfil Eléctrico.

Para obtener un índice del fracturamiento, cualquiera de las combinaciones de:

- Densidad, Calibración y Perfil Eléctrico
- Sónico, Calibración y Perfil Eléctrico.

Para obtener datos sobre la porosidad y la permeabilidad, las combinaciones de:

- Sónico y Perfil Eléctrico
- Densidad, Calibración y Perfil Eléctrico
- Neutrón y Perfil Eléctrico.

El tratamiento que se deberá dar a esta información procedente de pozos o barrenos, es ubicarlos en un plano con escala unificada; efectuar una interpretación cualitativa de los registros o cuantitativa por medio de programas de cómputo comerciales; y generar secciones de interpretación litológica para su correlación con la información procedente de los estudios geológicos.

#### **4.3.3.3 Resultados**

##### **Síntesis de Resultados Geofísicos**

Mediante los procesos de interpretación geofísica señalados en el inciso anterior, los resultados, una vez correlacionados con la geología y las anomalías termales, podrían aportar la siguiente información:

- Determinación de la forma y profundidad del basamento, así como la identificación de lineamientos tectónicos. Mediante la interpretación conjunta de la gravimetría, magnetometría y la sísmica pasiva, la identificación de estructuras regionales

podiese aportar información sobre el origen de ciertos procesos volcánicos con los cuales se podrían relacionar genéticamente las zonas termales identificadas.

- Determinación de espesores estratigráficos y mapeo de estructuras locales. Los datos de sísmica de reflexión, sísmica de refracción, sondeos eléctricos verticales, sondeos magnetotelúricos y registros de pozos, en el caso de existir en las áreas de mayor interés geotérmico, son un recurso de gran valor para el mayor conocimiento de la geología del subsuelo.
- Caracterización hidrogeológica (porosidad-permeabilidad-saturación) de los estratos litológicos. Se obtiene mediante el análisis de los registros de pozos, sondeos eléctricos verticales y sondeos magnetotelúricos.
- Delineación de posibles anomalías geotérmicas. Mediante la identificación de zonas con valores mínimos en la resistividad eléctrica.

#### 4.3.3.4 Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos

Ya que en la etapa de reconocimiento geotérmico la investigación geofísica consiste en realizar sólo una recopilación de la información existente y desarrollar el procesamiento de la misma sin invertir muchos recursos técnicos, los requerimientos humanos se reducen a uno o dos especialistas geofísicos con experiencia en el manejo, procesamiento, interpretación e integración de datos geofísicos con fines geotérmicos.

En lo que se refiere al tiempo requerido para la ejecución del trabajo, se tendrá que considerar que éste depende del volumen de información geofísica que sea posible recopilar sobre el área de interés. Sin embargo, tomando en cuenta que se pudiese obtener algún tipo de información por procesar, en promedio esta actividad se estima debe realizarse en un periodo no mayor de 4 meses.

Su costo depende principalmente del volumen de la información disponible, de la cantidad de procesos y de los programas y equipos de cómputo que se requiera adquirir para esos procesos. Tomando en cuenta estos factores, su costo podría variar entre US\$ 6,500 y US\$ 45,000 dólares.

#### 4.3.4 Hidrogeología

##### 4.3.4.1 Objetivos Específicos

Las investigaciones hidrogeológicas a realizarse en la etapa de reconocimiento simplemente deberán tratar de definir, dentro de lo posible, el esquema hidrogeológico de la región, especialmente en

las áreas termales identificadas. Otros estudios profundos y sistemáticos guiados por una metodología adecuada, se desarrollarán en las fases posteriores de la investigación geotérmica y tendrán el propósito de estimar la recarga profunda que alimenta al (los) sistema (s) geotérmico (s) y precisar su mecanismo.

Tomando en consideración esto, los objetivos de la investigación hidrogeológica estarán orientados a:

- Elaborar un esquema hidrológico regional e identificar la posible zona o zonas de recarga del o de los sistemas geotérmicos.
- Individualizar las principales unidades hidrogeológicas
- Establecer cualitativamente, cuando sea posible, el balance hídrico regional y específico en el área de la(s) anomalía(s) geotérmica(s).

#### 4.3.4.2 Alcances y Actividades

Los alcances del estudio hidrogeológico en esta fase de reconocimiento, estarán dirigidos a:

- Evaluar los parámetros hidrometeorológicos de la región. *Fluviómetro - pluviómetros - pluviómetros*
- Conocer los aforos de los ríos y fuentes importantes.
- Elaborar el mapa hidrogeológico preliminar de la región en estudio.
- Elaborar el esquema del sistema hidrogeológico preliminar de las áreas geotérmicas prioritarias.

Para ello se efectuará la evaluación de la información recopilada en la primer fase del reconocimiento y se desarrollarán algunas actividades de campo con el propósito fundamental de complementar la información recabada y proceder a la interpretación de los datos y la elaboración de un informe hidrogeológico de la región, con especial detalle de las áreas de interés geotérmico.

En algunos casos la región seleccionada para el reconocimiento podría contar con información general sobre las condiciones hidrometeorológicas del país y, eventualmente, disponer de estudios específicos orientados a la explotación de las aguas superficiales o subterráneas, ya sea para abastecimientos de agua potable, para obras de riego o para proyectos hidroeléctricos. De ser esta la situación, el conocimiento de la hidrogeología de la región podrá ser más profundo que en aquellos lugares de los cuales no existe información alguna de este tipo.

#### 4.3.4.2.1 Evaluación de la Información Existente

Con base en la información recopilada, se seleccionará la documentación referente a:

- Informes y mapas geológicos.
- Informes y mapas hidrogeológicos.
- Hidrología y meteorología.
- Fotografías aéreas a gran escala (1:50,000 o mayor).
- Mapas topográficos de detalle y regionales.
- Información sobre la presencia de las manifestaciones hidrotermales (fuentes y pozos termales, zonas de alteración hidrotermal, fumarolas, etc.).
- Datos de pozos perforados.

Esta información permitirá conocer la infraestructura meteorológica existente y definir el alcance del conocimiento hidrogeológico de la región de estudio.

**Análisis de Informes, Mapas y Secciones Geológicas.-** La utilización de este material proveerá información general de las características hidrogeológicas de las formaciones del subsuelo, revelando la naturaleza y espesor aproximados de los estratos que eventualmente podrían ser elementos del sistema geotérmico: cobertura impermeable, yacimiento y basamento.

**Interpretación de Imágenes de Satélite y Fotografías Aéreas.-** La interpretación de este material debe estar dirigida a identificar:

- Tipo de drenaje superficial.
- Morfología.
- Grado de erosión.
- Estructuras volcánicas.
- Sistemas de fracturas.
- Fallamiento reciente.
- Definición de las áreas de mayor infiltración del agua meteórica.
- Definición preliminar del esquema de circulación de fluidos.

Para no duplicar el trabajo, esta actividad deberá realizarse simultáneamente con la señalada en la parte correspondiente a los estudios de geología.

**Análisis de Datos Hidrológicos de Superficie y del Subsuelo.** - Se evaluará la información referente a escorrentía, pluviometría, evapotranspiración, infiltración, temperatura ambiente, etc. Esta información, de ser posible, posteriormente se complementará con mediciones que se realicen durante la ejecución del estudio.

Como resultado de la evaluación de la información recopilada se elaborará un informe técnico en el que se expongan las conclusiones más importantes de la evaluación de los datos existentes sobre la hidrogeología y el programa de trabajo de gabinete, de campo y de laboratorio, que será necesario efectuar para alcanzar los objetivos del estudio hidrogeológico. En dicho programa se incluirá un diagrama de barras para cada actividad, con el fin de facilitar la ejecución y el seguimiento del estudio.

#### **4.3.4.2.2 Trabajos de Campo y Laboratorio**

El trabajo de campo comprenderá actividades tales como:

##### **Inventario de Fuentes y Pozos de Agua**

Se realizará en inventario y muestreo representativo de fuentes de agua, tanto termales como frías, y de todo tipo de pozos en el área de estudio. Cuando se trate de fuentes superficiales y éstas se concentren en pequeñas áreas, el sitio del registro específico deberá seleccionarse de tal manera que sea representativo del área en que se localice, de acuerdo a su importancia en cuanto a temperatura, salinidad y/o caudal. Preferentemente esta actividad deberá desarrollarse en forma conjunta con el muestreo geoquímico de aguas.

Los datos que se recabarán de cada punto estarán relacionados con: caudal, temperatura del agua, temperatura ambiente, pH, conductividad eléctrica, etc.; adicionalmente se tomará una muestra del agua.

En el caso de pozos, sean éstos excavados a cielo abierto o perforados con equipos de perforación, se mantendrá el mismo criterio para su selección e introducción en el inventario de las fuentes de agua.

**Aforos de Ríos y Manantiales.** - Cuando sea posible se realizará el aforo de ríos seleccionados, de los cuales no se tengan datos de la escorrentía y que sean de importancia por su ubicación dentro de la cuenca en la que se encuentre una anomalía geotérmica. También se tratará de realizar el aforo de los manantiales, sobre todo de

aquellos cuyos caudales sean mayores de 5 l/s; menores que ese valor serán estimados.

La medición de la escurrentia cuando se disponga de los medios necesarios, se realizará mediante el uso de molinetes hidráulicos (micro y macromolinetes). Este tipo de medición servirá para conocer el flujo base de los escurrimientos, el cual proporciona datos iniciales sobre las características de los acuíferos subterráneos. Sirve además, junto con los datos pluviométricos y de evapotranspiración, para hacer una estimación del balance hidrogeológico de la cuenca de interés geotérmico.

**Caracterización Hidrogeológica de las Formaciones.**- En general las características hidráulicas de las rocas están dadas por la porosidad y la permeabilidad, las cuales están relacionadas entre sí, ya que sin la existencia de espacios vacíos (poros, fisuras y fracturas) en la matriz de la roca, no es posible que se acumulen o circulen fluidos en ellas, siendo condición indispensable que, para que el fluido pueda circular, los poros de las rocas estén comunicados.

La razón de caracterizar hidráulicamente las formaciones en superficie, es para:

- Diferenciar las formaciones geológicas por sus características físicas de porosidad y permeabilidad.
- Reconocer las zonas de mayor infiltración de aguas meteóricas.
- Identificar las posibles zonas de recarga meteórica.
- Tratar de definir la unidad hidrogeológica en la que se podría ubicar un yacimiento geotérmico.
- Definir cualitativamente la recarga profunda del eventual yacimiento.

La diferenciación de las unidades hidrogeológicas se hará analizando los mapas geológicos existentes y/o mediante la interpretación de fotografías aéreas, señalando claramente las unidades litoestratigráficas y sus condiciones estructurales. La diferenciación aludida será verificada mediante observaciones de campo; poniendo énfasis en los sistemas superficiales y profundos del fracturamiento. Para el caso de las formaciones granulares (piroclastos y sedimentos) será importante determinar el tamaño y la forma del grano y la presencia de material cementante en las rocas.

**Trabajo de Laboratorio.**- El trabajo de laboratorio consistirá en realizar análisis químicos de las muestras de agua colectadas en ríos, manantiales o pozos, con el objeto de determinar los siguientes constituyentes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , B,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y otros. En la interpretación geoquímica se tomarán en cuenta sus concentraciones y algunas relaciones entre ellos, para esclarecer

los tipos de aguas y sus posibles orígenes. El trabajo analítico, al igual que el muestreo, deberá ser ejecutado en forma conjunta con los estudios geoquímicos generales que se realicen en el área del reconocimiento; los análisis químicos de aguas serán comunes para ambas disciplinas.

#### 4.3.4.3 Integración de Datos e Informe

Considerando la información recopilada y la obtenida en el campo y el laboratorio (análisis de las aguas con su caracterización geoquímica), el trabajo hidrogeológico finalmente se concentrará en una evaluación, correlación e interpretación de los datos. Con los resultados de estas actividades, se procederá a:

- Elaborar un mapa hidrogeológico regional (a escala 1:100,000), en el que se señalen las unidades geológicas diferenciadas según su porosidad o permeabilidad (alta, media y baja), estimada cualitativamente. Mostrará los drenajes superficiales y, de ser posible, curvas de los niveles piezométricos, pluviosidad, etc.
- Realizar el balance cualitativo o estimativo hidrológico general. Si no hubiesen datos suficientes se indicará tal situación.
- Elaborar un esquema hidrogeológico preliminar de las áreas geotérmicas prioritarias, según los datos preliminares geovolcanológicos y geoquímicos, donde se muestre en secciones geológicas la zona de recarga principal a los acuíferos profundos y el posible patrón preferencial de circulación del flujo subterráneo.

Con estos datos se elaborará el informe hidrogeológico de reconocimiento, en el que se indicarán las distintas actividades realizadas durante el estudio, tales como: el análisis de la información inicialmente recopilada, los trabajos de campo, de laboratorio y de gabinete, y los resultados, conclusiones y recomendaciones a los que se llegaron en relación a la geohidrología de las áreas de interés geotérmico. Dicho informe deberá ir acompañado del material generado como: secciones geológicas, figuras y mapas que soporten el estudio.

#### 4.3.4.4 Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos

Siendo la etapa de reconocimiento el período de la investigación geotérmica durante el cual se busca identificar a nivel regional las áreas de mayor interés para efectuar en ellas posibles desarrollos geotérmicos, el estudio hidrogeológico en esta etapa no permite hacer grandes inversiones y por ende su ejecución requerirá de personal con amplia experiencia, capaz de obtener la mayor información posible con los datos existentes y con la menor cantidad de trabajo complementario. Sobre todo porque dependiendo del éxito del estudio

de reconocimiento, para la siguiente etapa de prefactibilidad se deberán establecer los lineamientos para una exploración hidrogeológica de detalle.

Bajo el principio de no llegar a formar un grupo de trabajo que realice un estudio completo y considerando que parte de las actividades programadas podrían ser desarrolladas con la participación del geólogo y del geoquímico, el personal técnico necesario para la investigación hidrogeológica podrá reducirse a un hidrogeólogo y a un técnico hidrólogo. Queda entendido que dicho personal adicionalmente deberá contar con apoyo de tipo secretarial y de servicios, esto es: chofer, dibujante, etc.

El tiempo para la realización de los estudios hidrogeológicos en la etapa de reconocimiento puede variar de acuerdo con el tamaño de la región a ser investigada y la cantidad de información disponible. En promedio para un área  $\geq 1000 \text{ km}^2$ , considerando condiciones de trabajo normales, se estima un tiempo mínimo de 6 meses y un máximo de 12 meses. El tiempo máximo estará dado principalmente por el interés que haya por abarcar en el estudio un ciclo hidrológico completo.

El costo del reconocimiento hidrogeológico considerando las áreas mencionadas arriba y que lo puedan realizar expertos del país, se estima en un mínimo de US\$ 40,000 y un máximo de US\$ 70,000 dólares.

#### 4.3.5 Aspectos Ambientales

La geotermia a nivel mundial se considera una fuente de energía limpia, sin embargo, ciertos impactos ambientales en la ejecución de proyectos geotérmicos han motivado la necesidad de tomar medidas desde el inicio de las investigaciones en el sentido de evaluar y prevenir sus efectos sobre la naturaleza.

En América Latina y el Caribe se han realizado diversos estudios sobre el impacto de la geotermia en el medio ambiente, y en ellos se han tratado temas específicos como: la eliminación de salmueras y del  $\text{H}_2\text{S}$  producidos por los campos, la prevención de daños en la vegetación por la apertura vertical de pozos, la restauración de suelos dañados por salmueras, etc.; sin embargo, ninguno de ellos ha sido parte de un estudio "integral" del impacto ambiental en el que se determinen las medidas de mitigación que se tendrían que tomar durante la ejecución de un proyecto geotérmico completo.

En muchos casos los informes ambientales se han realizado después de haberse iniciado las exploraciones del yacimiento geotérmico, principalmente para justificar algunas decisiones ya tomadas en cuanto a la ejecución del proyecto o para resolver (mediante medidas de mitigación) problemas ambientales que ya se estaban presentando incluso durante la exploración del campo geotérmico.

No se conocen informes que hayan previsto el impacto ambiental de la geotermia desde la fase de la exploración hasta la explotación del campo geotérmico, tratando de describir previamente los posibles efectos (negativos o positivos) que podrían ser inducidos durante tales actividades. Algunas de las razones por las cuales no se han realizado estos estudios completos del impacto ambiental, están dadas fundamentalmente por el hecho de que en un principio no se contempló la necesidad de hacerlos en forma integral con el proyecto y/o porque no existían normas o guías para su elaboración.

Actualmente, ante la necesidad de llevar a cabo la protección del medio ambiente en proyectos geotérmicos, OLADE y el BID han implementado la Guía para la Evaluación del Impacto Ambiental de Explotaciones Geotérmicas con Fines Energéticos, en la que se ha expresado la necesidad de que en la etapa de reconocimiento o de prefactibilidad se inicien los trabajos correspondientes a un Examen Ambiental Inicial (EAI), que más tarde, en la fase de factibilidad, serán la base para el desarrollo del Estudio del Impacto Ambiental propiamente dicho.

#### 4.3.5.1 - Objetivos de un Examen Inicial Ambiental

Partiendo de la premisa de que el responsable de un proyecto no tiene el derecho de utilizar los recursos naturales en forma tal que su uso signifique una pérdida mayor que lo que se gane en favor del bienestar nacional, el principal objetivo del EIA será empezar a reunir la información básica para que un proyecto pueda proceder sin causar daños irreparables al medio ambiente y al mismo tiempo promueva el desarrollo económico y social en la región.

Siendo el propósito de un estudio "completo" de impacto ambiental en un proyecto geotérmico, el:

- identificar y describir los recursos naturales que podrían ser afectados por el proyecto;
- describir los efectos que el proyecto podría ocasionar sobre los recursos naturales, incluyendo: a) los efectos positivos que realzarán el valor o importancia del recurso natural y los efectos negativos que le perjudicarán; b) los efectos directos o indirectos y c) los efectos a corto y largo plazo;
- describir alternativas al proyecto propuesto, que podrían dar los mismos resultados deseados pero con efectos ambientales distintos;

durante el reconocimiento de una región dada, el EIA se reducirá a iniciar la recopilación de la información correspondiente a los dos primeros puntos, en la medida que las investigaciones geocientíficas definan áreas de interés geotérmico.

#### 4.3.5.2 Alcances y Actividades

Considerando que los estudios de reconocimiento definen áreas de interés geotérmico, en dichas áreas se tratarán de identificar preliminarmente los posibles impactos de un proyecto geotérmico en el medio ambiente. La identificación se podrá llevar a cabo mediante la:

- Elaboración de una lista de los posibles receptores del impacto de las actividades geotérmicas, tales como: el agua, el aire, el suelo, el subsuelo, los animales, los vegetales y los seres humanos (Tabla No. 5). Como información importante, se deberá considerar la que se relaciona con la posible existencia de un parque natural o área recreacional o de "reserva humana" en el espacio a ser desarrollado como proyecto geotérmico.
- La identificación de las "posibles fuentes de impactos" del proyecto, por ejemplo: caminos, campamentos, áreas de perforación, descargas de salmueras, reducción de árboles, centros de emisión de gases, etc.); mencionando los "posibles receptores" en el medio ambiente (cultivos, bosques, comunidades que pudiesen utilizar la misma agua, etc.).

Su ejecución se llevará a cabo principalmente utilizando la documentación que se recopile durante el inicio del estudio de reconocimiento y la información que se pueda obtener fácilmente durante los trabajos de campo que realicen los diversos investigadores que intervienen en el proyecto.

#### 4.3.5.3 Resultados

Siendo el propósito del Examen Ambiental Inicial el asegurar que se prevean y manejen desde el comienzo del proyecto los potenciales problemas que el mismo pudiese ocasionar en el medio ambiente, el examen deberá presentarse en un informe que incluya como resultados:

- Una descripción del área o áreas de interés geotérmico.
- Una descripción y resumen de los resultados del EAI en tal o tales áreas, en la que se señalen en forma general los posibles efectos del o de los proyectos geotérmicos sobre el medio ambiente.

#### 4.3.5.4 Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos

Puesto que el EIA es esencialmente un análisis preliminar de los potenciales efectos de un proyecto en el medio ambiente, su ejecución se llevará a cabo con un presupuesto muy limitado, ya que estará

**Tabla No. 5**

**INFORMACION A SER CONSIDERADA EN UN EXAMEN INICIAL AMBIENTAL**

Clasificación según el Medio	Recurso Ambiental a ser Evaluado
<p><b>MEDIO FISICO (NIVEL 1)</b></p> <p>Agua</p> <p>Aire</p> <p>Tierra</p>	<p>Agua superficial:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrología</li> <li>- Calidad</li> </ul> <p>Agua subterránea:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrología</li> <li>- Calidad</li> </ul> <p>Atmósfera:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Calidad</li> <li>- Ruido</li> </ul> <p>Geología:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recursos minerales</li> <li>- Sismicidad</li> <li>- Deslizamientos</li> <li>- Asentamientos</li> </ul> <p>Suelos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosión</li> <li>- Fertilidad</li> </ul>
<p><b>MEDIO BIOTICO (NIVEL 2)</b></p> <p>Acuático</p> <p>Terrestre</p>	<p>Piscicultura</p> <p>Biología acuática</p> <p>Cubierta vegetal</p> <p>Fauna silvestre</p>
<p><b>MEDIO HUMANO (NIVEL 3)</b></p> <p>Sociodemográfico</p> <p>Económico</p> <p>Servicios e Infraestructura</p>	<p>Población</p> <p>Uso del suelo en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agricultura</li> <li>- Industria forestal</li> <li>- Ganadería</li> <li>- Recreacional y turismo</li> <li>- Minería</li> <li>- Arqueología</li> <li>- Areas Urbanas</li> </ul> <p>Abastecimientos de agua</p> <p>Vías de comunicación</p>

integrado con base en el uso de la información disponible y/o la información que obtenga fácilmente el grupo de investigadores que intervienen en el reconocimiento.

El geólogo encargado de los estudios geológicos es la persona idónea para la ejecución del EIA, ya que al desarrollar los levantamientos

de campo puede llegar a conocer con mayor amplitud los aspectos ambientales naturales en las áreas de interés geotérmico, y estimar tentativamente el efecto que podría tener en el medio ambiente el desarrollo de uno o más proyectos geotérmicos. Este profesional podrá ser el responsable de la ejecución del EIA, contando con la colaboración del geoquímico y el hidrogeólogo quienes con sus observaciones de campo y los datos que obtengan en sus investigaciones, podrán aportar información importante sobre las condiciones ambientales iniciales.

Sin tomar en cuenta la obtención de información de campo y de laboratorio por parte de los investigadores, puesto que en general es parte de la propia actividad geocientífica de cada uno de ellos, y considerando sólo la recopilación de información requerida para el EIA, su análisis y la integración del informe, el tiempo que podría necesitar el geólogo responsable de esta actividad se estima que no debe ser mayor de un mes y su costo de U.S.\$ 5 000-20.000 dólares, aproximadamente.

#### 4.4 Integración Geocientífica

Con base en el análisis conjunto de la información recopilada así como la obtenida en las investigaciones complementarias de campo y laboratorio, el grupo técnico del estudio de reconocimiento procederá a la integración de los datos aportados por la geología, geoquímica, hidrogeología y geofísica, con el fin de: evaluar las posibilidades geotérmicas de la región, definir el área o áreas de interés geotérmico, elaborar el esquema o esquemas geotérmicos preliminares de tal o tales áreas y seleccionar la (s) más atractiva (s) para desarrollar estudios de prefactibilidad.

En el proceso de síntesis se deberá prestar atención a la concordancia (o aparente discordancia) entre los esquemas propuestos por cada disciplina. En forma especial habrá que poner atención a la:

- Correlación entre la ubicación de la fuente de calor propuesta con base en criterios geológicos y vulcanológicos y la ubicación de la zona de ascenso del fluido termal propuesta con base en criterios geoquímicos.
- Concordancia entre las estimaciones de la calidad del recurso geotérmico basadas en las características de la fuente de calor (por ej. vulcanismo/magmatismo reciente o antiguo) y en las temperaturas de subsuelo estimadas con geotermómetros químicos.
- Correlación de la geología del subsuelo inferida, con las interpretaciones geofísicas en el caso de que exista esta información.

- Correlación de la ubicación de la actividad termal (manantiales calientes de aguas salinas, fumarolas, suelos calientes, etc.) con la vulcanología y la geología-estructural.
- Correlación de los posibles límites geológico-estructurales del sistema hidrotermal, con el área de distribución de las diversas manifestaciones termales.
- Correlación del esquema preliminar del sistema geotérmico propuesto con base en la geología, vulcanología e hidrogeología, con el propuesto por el estudio geoquímico.

El grado de concordancia entre los esquemas propuestos por las diversas disciplinas debe ser tomado en cuenta como un parámetro importante para la jerarquización de las áreas termales de la región bajo estudio.

#### 4.5 Resultados

Además de la formación de un banco de datos que continuamente podrá ser actualizado, los trabajos de las fases 1 y 2 del reconocimiento geotérmico darán como resultados la integración de un informe final, el cual deberá contener esencialmente: una síntesis de los estudios realizados y sus conclusiones, una lista de las áreas de interés geotérmico y las prioridades para los subsecuentes estudios de prefactibilidad, una evaluación preliminar del posible potencial energético de cada área y un programa de actividades para la etapa de prefactibilidad en cada una de ellas.

##### 4.5.1 Áreas de Interés Geotérmico y Prioridades

Como resultado de la integración geocientífica, el estudio de reconocimiento deberá permitir la identificación de la o de las provincias geotérmicas existentes en la región, diferenciando las que se relacionen genéticamente con el vulcanismo reciente o con intrusiones magmáticas, de las que pudiesen estar asociadas con el movimiento de aguas meteóricas a grandes profundidades en zonas de gradientes de temperaturas normales.

Para cada provincia geotérmica se identificarán las áreas termales de interés describiendo el marco stratigráfico, estructural e hidrogeológico, la posible fuente de calor y el probable yacimiento. Si la fuente de calor estuviese relacionada con el vulcanismo reciente, se describirá también la evolución vulcanológica del área.

Se clasificarán las áreas de interés geotérmico, indicando la probable existencia de fluidos de alta entalpía en el subsuelo cuya explotación como energético sea factible con las tecnologías aplicables actualmente. También se señalarán las áreas donde pudiesen encontrarse fluidos de baja entalpía, cuyo aprovechamiento como energético fuese factible utilizando el ciclo binario en la generación de electricidad,

o mediante plantas de uso directo del calor en la agricultura, la industria, etc.

Se establecerá una escala de prioridades en la decisión de desarrollar subsecuentes estudios de prefactibilidad, a partir de los resultados geocientíficos que presenten las condiciones más favorables para la existencia de yacimientos geotérmicos a profundidades económicamente explotables. Esta escala de prioridades deberá ser definida sobre la base de consideraciones estrictamente "técnicas".

#### 4.5.2 Estimación Preliminar del Potencial Energético

Definidas las áreas de interés geotérmico y tomando como base al esquema geotérmico de cada una de ellas, tentativamente se procederá a evaluar el potencial energético probable utilizando para ello cualquiera de los métodos señalados en la Guía para la Evaluación del Potencial Energético en Zonas Geotérmicas (1993), elaborada por OLADE y el BID. Esta evaluación tomará en consideración los aspectos relativos a la existencia de una anomalía térmica en el subsuelo y las condiciones geológicas e hidrogeológicas de cada área.

Inicialmente la magnitud del recurso se podrá inferir semicuantitativamente con base en los datos preliminares de campo. El tamaño y tipo de las manifestaciones termales, el flujo térmico medido en la superficie, las temperaturas del subsuelo calculadas con base en los geotermómetros químicos, el área de alteración hidrotermal y el tamaño de las anomalías geoquímicas, son parámetros que permiten estimar la importancia de la zona geotérmica y su posible potencial energético. En términos generales el tamaño del recurso suele ser proporcional a tales parámetros. Las fumarolas son más indicativas del tamaño del recurso que las manifestaciones de agua, ya que tienden a presentarse en las áreas de mayor temperatura del sistema, mientras que los manantiales tienden a estar asociados con las zonas de descarga.

En una forma cuantitativa preliminar, el potencial del sistema geotérmico se podrá calcular considerando las características geológicas y físicas observadas desde la superficie, utilizando para ello cualquiera de los métodos que existen para tal propósito y de los cuales los más frecuentemente aplicados son el Método de Calor Magmático o de la Cámara Magmática y el Método Volumétrico.

**Método de la Cámara Magmática**, se basa en establecer la cantidad de calor acumulado en la cámara con la cual se asocia el sistema geotérmico, y en la suposición de que la transferencia de calor hacia el sistema geotérmico es únicamente por conducción. Este método requiere de un modelo de la cámara magmática, obtenido por medio de métodos vulcanológicos que proporcionan la profundidad, volumen, edad y temperatura inicial y final de la cámara (Barberi y Marinelli, 1987). A continuación se desarrolla por medio de modelos matemáticos,

analíticos o numéricos, el cálculo de la distribución de la temperatura en la corteza, considerando sólo la conducción térmica.

Conociendo la edad y temperatura inicial de la cámara magmática, se podrán calcular las temperaturas actuales en los niveles superiores de la corteza y esto permitirá estimar la cantidad de calor que podría estar acumulado en el posible yacimiento geotérmico.

**Método Volumétrico;** se basa en el cálculo de la energía térmica contenida en un volumen de roca a considerar dentro de la zona de interés. Consiste en la determinación de lo que se denomina Recurso Base Accesible (RBA), que es el calor contenido en la parte de la corteza debajo del área estudiada y que puede ser explotado con pozos; seguido de la determinación de su Recurso Geotérmico (RG), que es el calor que puede ser extraído del RBA a costos competitivos con relación a otras fuentes de energía; y, finalmente, la determinación o cálculo de la electricidad que se podría generar con tal Recurso Geotérmico.

Tomando en cuenta los costos actuales de la perforación geotérmica, para el cálculo del Recurso Base Accesible generalmente sólo se considera la energía térmica en la roca y el fluido almacenados entre la cima del yacimiento y los 3,000 m de profundidad.

El Recurso Base Accesible se puede calcular utilizando la ecuación:

$$q_v = C_v * A * E * (T - T_r)$$

donde,

$q_v$  = Energía térmica acumulada en el yacimiento (J)

$C_v$  = Capacidad térmica por unidad de volumen, incluyendo roca y fluidos. Se calcula considerando valores característicos de porosidad y capacidad térmica volumétrica de la roca en los yacimientos geotérmicos.

$A$  = Área del yacimiento ( $m^2$ )

$E$  = Espesor del yacimiento (m)

$T$  = Temperatura del yacimiento ( $^{\circ}C$ )

$T_r$  = Temperatura de referencia, que corresponde al promedio anual de la temperatura ambiental en la superficie del área estudiada.

El área del yacimiento se "estimarà" con base en los rasgos geológicos superficiales, tales como el tamaño del área de alteración hidrotermal y la superficie en la que se presenta el flujo de calor, y a la información geoquímica (anomalías geoquímicas) y geofísica (cuando ésta exista).

Respecto al espesor del yacimiento, éste se supondrá uniforme tomando como profundidad máxima del RBA los 3 km mencionados arriba, y la cima del yacimiento la que se infiera con base en la información geológica y geofísica. En el caso de no ser posible una determinación aproximada de la cima del yacimiento, Brook et al (1979) proponen que se considere como profundidad más probable 1.5 km.

La temperatura del yacimiento se estimará con base en los geotermómetros químicos, especialmente los de aguas que, cuando no presentan mezclas de fluidos de menor temperatura procedentes de los acuíferos superficiales, resultan ser más precisos.

Conociéndose el Recurso Base Accesible de un sistema tipo líquido dominante, se podrá determinar su Recurso Geotérmico utilizando un Factor de Recuperación Geotérmica (FRG), que no es más que la razón entre la energía que se puede extraer a boca de pozo ( $q_{gp}$ ) y la energía contenida originalmente en el yacimiento ( $q_v$ ), esto es:

$$FRG = q_{gp} / q_v$$

Para sistemas de líquido dominante el valor de FRG se puede calcular con modelos de extracción térmica de tipo flujo intergranular o de barrido (Bodvarsson, 1974; Nathenson, 1975). Considerando el comportamiento no ideal del sistema, Nathenson y Muffler (1975) y Brook et al (1979) y otros, proponen como valor aceptable para el FRG la cifra 0.25.

Puesto que bajo condiciones ideales durante la conversión de energía térmica a mecánica (trabajo) parte del calor se va al medio ambiente, la cantidad de trabajo útil ( $T_u$ ) obtenible de cierta cantidad de energía térmica es factible determinarla basándose en principios de la termodinámica.

Para campos de líquido dominante el Factor de Conversión Ideal (FCI) de energía térmica a mecánica empleando un ciclo de vapor, puede obtenerse en forma aproximada mediante la relación (Paolo Liguori, com. pers., 1993):

$$FCI = (T - T_r) / (T + T_r + 546)$$

donde  $T_r$  es la temperatura de referencia.

Finalmente, la energía eléctrica ( $E$ ) que se puede obtener del trabajo útil, estará dada por el Factor de Utilización ( $FU$ ) de manera tal que:

$$E = T_u * FU$$

en el cual el valor de  $FU$  depende de la temperatura del fluido y del ciclo del trabajo utilizado. Para sistemas de líquido dominante con temperaturas mayores de 150 °C, un valor aceptable para  $FU$  es de 0.4.

Si bien el potencial energético "estimado" preliminarmente con estos métodos, en muchas ocasiones pudiese no ser representativo de la magnitud real del recurso por la falta de información confiable sobre el sistema geotérmico, cuando los resultados del cálculo son congruentes con la importancia del área definida a partir de los resultados geocientíficos, se puede inferir que sus posibilidades geotérmicas en cierta forma son ratificadas.

#### **4.5.3 Preparación de un Proyecto para la Etapa de Prefactibilidad**

Como conclusión de la etapa de reconocimiento se preparará un proyecto de estudios de prefactibilidad para las áreas de mayor interés. Se diseñará un programa de investigaciones de geología, geoquímica, geofísica, hidrogeología, ambientales y de perforaciones de gradiente o de propósito múltiple, lo suficientemente completo para definir con mayor detalle el esquema geotérmico de cada área.

El objetivo del programa será ratificar la interpretación sobre la existencia de un yacimiento geotérmico y dar la localización de sitios para perforar pozos profundos de exploración que permitan la identificación del recurso.

En el proyecto se delinearán el área de estudio reducida a unos 400 ó 500 km<sup>2</sup>, y se presentará un programa mínimo de investigaciones con recomendaciones sobre la secuencia y forma de desarrollar los trabajos, así como los períodos de análisis de resultados preliminares y de decisión respecto a continuar o detener los trabajos faltantes. Será importante precisar la información sobre el medio ambiente que tendrá que recabarse y que será fundamental más adelante en el caso de tener que presentarse una solicitud para financiamiento de estudios de factibilidad.

Como preparación de la sucesiva etapa de prefactibilidad, será importante que la información surgida de la etapa de reconocimiento se organice en forma tal que pueda ser aprovechada al máximo. En este sentido, la información técnica resultante del reconocimiento deberá estar preparada para su ratificación, complementación y/o rectificación.

En relación a los aspectos que intervienen en el éxito de las operaciones de campo, será necesario aportar datos sobre:

##### **a. El Clima**

Indicando los períodos óptimos del año para realizar operaciones de campo. Serán muy útiles los datos sobre la temperatura, la precipitación pluvial y el escurrimiento de los ríos.

**b. La Topografía.**

Mencionando las dificultades topográficas para la ejecución del trabajo así como la disponibilidad de cartas a escalas adecuadas (1:20,000 ó 1:25,000) para las actividades por realizar. Se señalarán los accesos al área de trabajo y las facilidades de alojamiento. En el caso de necesitarse la reparación de caminos, se indicará el posible costo.

**c. Condiciones de Trabajo.**

Mencionando las fuentes locales de mano de obra, de alimentos, combustible y otras provisiones necesarias para la exploración, así como los posibles problemas que podrían surgir con los residentes del área de estudio debido al ingreso en la región de gente no local.

**d. Seguridad del Personal.**

Manifestando los problemas que podrían existir por disturbios políticos o sociales.

**e. Desastres Naturales.**

Indicando los riesgos de terremotos, inundaciones, erupciones volcánicas y freáticas, deslizamientos, etc.

**f. Salud.**

Expresando los riesgos de enfermedades y la localización de centros de salud.

Respecto a los estudios técnicos por realizar, se elaborarán programas de cada una de las actividades geocientíficas por intervenir en la prefectibilidad. Se definirá para cada disciplina el área mínima que deberá cubrir así como las actividades de campo, laboratorio y gabinete que estarán involucradas en el estudio. Se precisará que a la conclusión de cada una de las disciplinas programadas se presente un informe describiendo las actividades realizadas, la información que se obtuvo, los procedimientos analíticos empleados y los resultados con los que concluye el trabajo. Se indicará que el informe final será una síntesis de estos trabajos, con un resumen de los datos colectados, los procesos y las interpretaciones realizadas para la definición del modelo geotérmico del área de interés, los sitios de perforación de pozos exploratorios profundos y de un programa para el estudio de factibilidad.

En la programación de los trabajos se buscará la interrelación y ejecución secuencial de las actividades, de tal manera que la

información proporcionada por una o más disciplinas permita la preparación y realización conveniente de las actividades restantes. Al ser la exploración geofísica de costo elevado, será de suma importancia que su ejecución esté debidamente coordinada e integrada al programa completo de exploración, y no se inicie ninguna prospección geofísica sin contar con un esquema geológico preliminar del sistema geotérmico y una clara definición del objetivo que se persigue con cada método programado.

En el documento de proyecto se presentará un cronograma de las actividades programadas, señalando aquellas que podrían ser realizadas por elementos que pertenecen a la propia empresa responsable del estudio y las que tendrán que ser contratadas en el país o en el extranjero. Se deberá especificar si habrá que recurrir a firmas consultoras, instituciones especializadas o consultores individuales, así como la manera en que el personal extranjero o nacional formará equipo con el de la empresa contratante.

Finalmente, al tener una estimación de las actividades por realizar en el proyecto y los elementos (compañías, consultores, etc.) que deberán intervenir en el mismo, se preparará un presupuesto del estudio de prefactibilidad. Puesto que este presupuesto podrá ser la base para la consecución de financiamiento por parte de instituciones externas, será necesario que se presente en la forma más completa posible, detallando los trabajos y los elementos que intervendrán en el estudio así como el costo estimado para cada uno de ellos.

#### **4.6 Infraestructura Requerida**

##### **Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos**

La fase inicial de la exploración geotérmica a nivel de reconocimiento (Fase 1), requiere personal altamente experimentado ya que es durante este periodo que se establecen los lineamientos de la exploración futura. La recolección de información deberá ser realizada preferentemente por personal técnico especializado en geotermia, aunque también podría ser ejecutada por personal especializado en alguna de las disciplinas geocientíficas que intervienen en el reconocimiento.

La evaluación de la documentación recopilada y la ejecución de las investigaciones complementarias de campo (Fase 2), deberá ser realizada por técnicos altamente calificados y experimentados en exploración geotérmica. Este personal, de acuerdo a lo expresado en párrafos anteriores, estará integrado al menos por un geólogo estructural, un vulcanólogo, un petrógrafo-petrólogo, un geoquímico, un técnico especializado en muestreo geoquímico, un geofísico, un hidrogeólogo y un técnico especializado en hidrología.

El tiempo que se requiere para llevar a cabo el estudio de reconocimiento 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 un área  $\geq 1.000 \text{ Km}^2$ , 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 existente; 2 a 3 meses para reconocimiento 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.

El costo del estudio puede variar ampliamente de acuerdo a la superficie por investigar, el volumen de información útil recopilada, las características topográficas y geológicas de la región, la existencia de laboratorios y equipos necesarios para realizar los estudio y la disponibilidad de personal especializado en geotermia en el país. Considerando que los trabajos de reconocimiento se pudiesen realizar en condiciones normales, para cubrir la superficie arriba mencionada el costo puede variar entre un mínimo de US \$ 350,000 dólares y un máximo de US \$ 650.000 dólares, según sea que las investigaciones se contraten con una compañía nacional o del extranjero.

## 5. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

En la etapa de reconocimiento fue esquematizado el modelo preliminar del sistema geotérmico de un área prioritaria. Prácticamente en dicha etapa se obtuvo, mediante la aplicación de métodos de exploración superficial de bajo costo, el soporte científico para establecer la posible existencia de un yacimiento geotérmico y los elementos que configuran la fuente de calor, la cobertura impermeable o sello y el yacimiento propiamente dicho. Ahora, en la etapa de prefactibilidad, se describirá la forma de continuar la investigación con el fin de detallar la información que permita inferir con mayor certeza la existencia del yacimiento en el área de interés y preparar su verificación con pozos profundos.

La exploración de prefactibilidad continuará con el uso de métodos geocientíficos de prospección geotérmica desde la superficie y, cuando sea conveniente, se pondrá en práctica el método de exploración directa mediante la ejecución de perforaciones de gradiente o de propósito múltiple, el cual una vez refinado el modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, tendrá como objetivo medir directamente algunos parámetros del subsuelo y comprobar en lo posible los resultados de la investigación.

El área catalogada como prioritaria en la etapa de reconocimiento llenará los requerimientos geocientíficos para ser sometida a estudios de prefactibilidad, y la decisión de que se investigue dependerá de su relevancia geocientífica y de la situación socio-política de la zona donde se encuentre. El factor económico que justifique el desarrollo geotérmico del área aludida, dependerá de la estrategia energética prevalenciente al momento de la estructuración del proyecto.

### 5.1a. Objetivos Generales

Los objetivos generales de un estudio de prefactibilidad están dirigidos a:

- a. Optimizar el esquema preliminar del área geotérmica investigada, el cual deberá aportar información sobre los siguientes aspectos:
  - Presencia de una anomalía térmica a niveles superficiales de la corteza.
  - Extensión y profundidad del posible yacimiento.
  - Presencia y características de la cobertura o capa sello.
  - Sistema de circulación hídrica, el cual incluirá la definición del acuífero subterráneo, la identificación de las zonas de recarga y, en lo posible, un balance hidrológico preliminar.
  - Caracterización del eventual yacimiento. En el caso que se localizara a una profundidad alcanzable con perforaciones de propósito múltiple, se tratará de obtener información de algunos de sus parámetros, tales como: temperatura, presión, litología, calidad del fluido, etc.
- b. Determinar sitios alternos para la perforación de pozos exploratorios profundos. Esta localización estará basada en criterios técnico-científicos y deberá estar dirigida a:
  - Explorar dentro del área geotérmica las anomalías determinadas por los estudios superficiales, con el fin de comprobar la existencia del yacimiento.
  - Satisfacer equilibradamente los objetivos de la exploración del subsuelo, explorando zonas de producción y zonas de reinyección.
  - Perforar al menos un pozo a una profundidad tal que, dentro de los límites económicos, atraviese la totalidad del yacimiento.

La distribución de los pozos deberá ser estratégica, de tal manera que éstos tengan espaciamientos adecuados a partir del centro de la anomalía principal y cubran satisfactoriamente el área de la anomalía geotérmica interpretada con los métodos de superficie.

En caso de que las investigaciones indiquen la presencia de un segundo yacimiento a una profundidad comercial, se programará cuando menos un pozo para alcanzarlo.

## 5.2. Metodología

Las características geotérmicas del área de interés identificada en la etapa precedente de reconocimiento, fueron determinadas con investigaciones geocientíficas regionales y locales con un grado de detalle tal, que durante la exploración de prefactibilidad será necesario verificar con estudios de mayor precisión y costo.

La exploración en esta etapa se desarrollará básicamente mediante trabajos geocientíficos y, en ciertos casos, como se mencionó en párrafos anteriores, con perforaciones exploratorias de diámetro pequeño. Su ejecución deberá seguir la secuencia lógica establecida en la presente metodología y enmarcarse, dentro de lo posible, en los tiempos previstos y los costos estimados.

Es de esperar que la información proporcionada por la etapa de reconocimiento aportará un plan de actividades a seguir en la prefactibilidad, sin embargo, en el caso de que esto no ocurra, la misma información resultante de los estudios previos permitirá planificar tales actividades.

El estudio de prefactibilidad deberá prever para su ejecución básicamente seis fases: 1) revisión, evaluación y síntesis de la información existente, 2) investigación geocientífica de campo y laboratorio, 3) integración de la información y elaboración de un modelo geotérmico del posible yacimiento, 4) perforación de pozos de gradiente y/o de propósito múltiple, 5) integración de la información geocientífica de superficie y la aportada por los pozos en un modelo refinado del yacimiento y 6) evaluación preliminar del potencial energético y preparación de un documento de proyecto para la etapa de factibilidad. Sin embargo, podrán darse casos en los que al término de la fase 3 llegue a ser tan evidente la existencia del yacimiento, que las fases 4 y 5 se suspendan y finalice el estudio desarrollándose directamente la fase 6.

El inicio de las investigaciones mediante la recopilación y evaluación del estudio de reconocimiento previo, o de la información existente, permitirá preparar una síntesis de los trabajos realizados y programar adecuadamente los siguientes correspondientes a la prefactibilidad.

A tal actividad le seguirán las mismas disciplinas geocientíficas de geología, geoquímica, geofísica e hidrogeología desarrolladas durante el reconocimiento, pero ahora con un nivel de detalle que permita, en lo posible, conocer cualitativa y cuantitativamente los elementos que integran al yacimiento geotérmico.

Los estudios de geología y geoquímica comenzarán por ratificar o determinar en forma más precisa el modelo preliminar del sistema geotérmico, especialmente para la parte que se relaciona con la ubicación del yacimiento inferido, para seleccionar el área y objetivos de las investigaciones geofísicas.

Siendo los métodos eléctricos y electromagnéticos las herramientas de superficie más efectivas para configurar en forma indirecta la posición del yacimiento, una vez definida con geología y geoquímica el área de mayor interés, se iniciarán los estudios geofísicos con el levantamiento de dos o tres líneas regionales de resistividad que permitan detectar el yacimiento. La ubicación precisa de una anomalía eléctrica que sea significativa de la presencia del yacimiento en el subsuelo, deberá ser la base para ratificar o rectificar el área por cubrir con el resto de los estudios geofísicos.

Las investigaciones de campo y laboratorio correspondientes a los estudios de superficie, llevarán en principio a la optimización del modelo preliminar del sistema geotérmico. En el caso de ser necesario continuar el proyecto con perforaciones de gradiente y/o pozos de propósito múltiple, al término de esta actividad se elaborará un informe final que contendrá: una síntesis de los resultados obtenidos en todas y cada una de las disciplinas que intervinieron en el estudio de prefactibilidad, el modelo detallado del yacimiento, la evaluación preliminar del potencial energético y un documento de proyecto para la etapa de factibilidad.

El documento de proyecto deberá tener una evaluación técnico-económica del mismo e incluirá un programa preliminar de estudios con investigaciones geocientíficas específicas, la perforación exploratoria profunda de diámetro comercial, estudios de ingeniería de yacimientos, un estudio ambiental y otros tópicos especiales.

50

#### 5.5.1 Planificación, Organización y Supervisión

Todo proyecto geotérmico debe seguir los lineamientos típicos para su ejecución. Se iniciará con la elaboración del perfil del proyecto, continuará con la estructuración del mismo y finalizará con su ejecución.

La planificación de las actividades tendrá como punto de partida los resultados y recomendaciones del reconocimiento, especialmente lo referente al programa de estudios por realizar en la prefactibilidad. Deberá tomar en cuenta aspectos logísticos tales como: facilidades para obtener servicios de expertos y equipos en el país, condiciones topográficas y climáticas del área de trabajo, posibilidades de procesamiento de la información, etc.

En el caso de que no esté preestablecido un programa de actividades para esta etapa, la información aportada por el reconocimiento será la base para delinear el estudio de prefactibilidad. Inicialmente se seleccionará un área de 400 a 500 km<sup>2</sup> y se elaborará el programa idóneo de investigaciones, poniendo especial atención en la secuencia de los trabajos por realizar así como en los periodos de análisis de resultados preliminares, particularmente de aquellos en los que se podría tomar la decisión de continuar o suspender los trabajos según los resultados obtenidos.

Se definirá para cada disciplina el área que deberá cubrir así como las actividades de campo, laboratorio y gabinete que se tendrán que realizar. Quedará establecido que al término de cada disciplina se presente un informe describiendo los trabajos ejecutados, la información que se obtuvo, los procedimientos analíticos y de interpretación empleados y los resultados alcanzados. El informe final será una síntesis de todos los trabajos, con un resumen de los datos colectados, sus interpretaciones y los resultados finales sobre el estudio de prefactibilidad.

En la planificación de los trabajos se buscará la interrelación y ejecución secuencial de las actividades, de tal manera que la información proporcionada por una o más disciplinas permita la realización más conveniente de las actividades restantes. Para este fin será indispensable la elaboración de un cronograma detallado de actividades.

Al ser la exploración geofísica de costo elevado, será de suma importancia que su ejecución esté debidamente coordinada e integrada al programa completo de exploración, y no se inicie ninguna prospección geofísica sin contar con un modelo geológico preliminar del sistema geotérmico y una clara definición del objetivo que se persigue.

Para la correcta ejecución del estudio de prefactibilidad será necesario definir la organización del proyecto y designar un ente responsable de la ejecución y supervisión de los trabajos.

Teniendo en cuenta las actividades por realizar y los recursos humanos, técnicos y físicos disponibles por la entidad ejecutora del proyecto, se determinarán las actividades que podrá llevar a cabo con o sin la participación de asesores, y las que deberán ejecutar compañías consultoras, instituciones especializadas o consultores individuales.

Se especificará la manera en que el personal extranjero formará equipo con el personal local así como las características generales que tendrá el equipo de trabajo, señalando si estará integrado por expertos nacionales e internacionales, como será la interrelación entre expertos, la persona que ejercerá el liderazgo del grupo, etc. Adicionalmente se definirá la forma como se llevará a cabo la supervisión del trabajo y se designará el área responsable de esta labor.

La actividad de los contratistas estará claramente definida en los contratos y en los términos de referencia que se les presenten, y con base en éstos la entidad responsable del proyecto deberá realizar la supervisión de los trabajos.

Las empresas, instituciones o consultores individuales nacionales o extranjeros que participen en el proyecto, deberán contar con reconocida experiencia en geotermia para que mediante la aplicación de los últimos adelantos de la tecnología garanticen los resultados del estudio de prefactibilidad.

Cualquiera que sea la complejidad del estudio y el tipo de organización establecida, la entidad ejecutora del proyecto siempre deberá tener el control del mismo.

### 5.2.2 Revisión de Resultados del Reconocimiento

Al inicio de la prefactibilidad será fundamental efectuar una revisión cuidadosa de los datos de la etapa de reconocimiento, a fin de dar el enfoque adecuado a las técnicas de exploración que se programen para detectar el yacimiento geotérmico.

Como primera actividad técnica se tendrá que hacer el análisis de la información generada durante el reconocimiento, así como de cualquier otra información geocientífica adicional disponible sobre el sistema geotérmico, para ratificar las conclusiones y recomendaciones del estudio y/o elaborar cambios en las investigaciones programadas.

El esquema geotérmico generado en la etapa anterior deberá utilizarse como una hipótesis de trabajo para la planificación detallada de los estudios subsiguientes. A medida que la información adicional, de mayor detalle y calidad, se vaya generando, los datos analíticos de base almacenados en el banco de datos serán actualizados y el esquema del sistema geotérmico se irá reforzando, complementando o modificando.

### 5.2.3 Aspectos Logísticos

Con base en la información proporcionada por el reconocimiento y tomando en cuenta el programa de actividades para el desarrollo del estudio de prefactibilidad, será necesario considerar los aspectos logísticos que permitan realizar los trabajos con mayor agilidad; algunos de ellos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Cuando en el país no existan técnicos ni equipos necesarios para las investigaciones, habrá que traerlos del exterior. Ante esta situación, personal local experimentado en este tipo de trabajo deberá tramitar con suficiente anticipación los documentos de inmigración, visas, aduanas y operaciones especiales requeridos.
- Transporte. En apoyo a las operaciones de campo se necesitarán vehículos adecuados (de doble tracción o tracción sencilla) para cada una de las actividades de la exploración así como un servicio de mantenimiento y reparación local para los mismos. En caso de ser necesario, para mantener en constante operación tales vehículos, se tendrá que prever la compra de repuestos. Para trabajos en áreas remotas se requerirán tanques de almacenamiento de combustibles y lubricantes.

- Aeropuerto. Se necesitará identificar un aeropuerto local con todos los servicios, para el caso de que se requiera el uso de aeronaves en prospecciones aéreas.
- Apoyo de campo. Mediante alquiler o construcción, se necesitará contar con una oficina local, campamento (s) y demás requerimientos para el personal de campo; así como bodegas para los equipos y las muestras de sondeos una vez que comience la perforación.
- Deberá preverse que en algunas áreas remotas no es posible conseguir personal local de apoyo, y éste tendrá que ser movilizado de otras partes con el consecuente incremento del costo de los trabajos..

Durante la planificación de las actividades se tendrá que prever que los diversos grupos de trabajo se apoyen entre sí, ya que esto llevará a importantes ahorros de tiempo y recursos. Será conveniente por ejemplo, que:

- El grupo de geología inicie los trabajos de campo y proporcione información a los grupos de geoquímica e hidrogeología para el desarrollo de sus actividades (marcando en un mapa la ubicación de manifestaciones termales, colectando muestras de roca para análisis petrofísicos, aportando información sobre las características hidrogeológicas de las formaciones, etc.).
- Los grupos de geoquímica e hidrogeología combinen sus esfuerzos para el muestreo de aguas.
- Las actividades de campo del grupo de geofísica se programen con base en los resultados preliminares del estudio geológico-estructural.
- El programa de actividades de cada disciplina se presente en un diagrama de barras y en un diagrama de ruta crítica, elaborados en tal forma que los resultados preliminares o finales de una o varias disciplinas puedan ser usados oportunamente por las demás.

#### **5.2.4 Definición de Puntos de Revisión y Toma de Decisiones**

En la elaboración del programa de estudios de prefactibilidad, es conveniente considerar ciertos periodos entre las actividades en los cuales se analicen los resultados preliminares de los trabajos realizados, con el fin de ratificar el desarrollo de las investigaciones, modificar o suspender alguna actividad, e incluso tomar la decisión de detener el estudio por no ser técnicamente sustentable la existencia de un yacimiento geotérmico en el área del proyecto.

La decisión de avanzar a la etapa de prefactibilidad en la exploración de una área termal, se basa en un dictamen favorable derivado de la etapa de reconocimiento. Sin embargo, al iniciarse la prefactibilidad y generarse información adicional de mayor calidad y detalle, es posible que ésta obligue a hacer un cambio sustancial en el modelo original del sistema hidrotermal. Incluso es factible que, en una fase relativamente temprana del estudio, esa nueva evidencia arroje dudas razonables sobre la posible existencia del recurso. En estos casos, es importante estar preparados para modificar el plan de trabajo con el fin de esclarecer en un primer término esas dudas, e incluso para tomar la decisión de no continuar las investigaciones.

En la metodología propuesta en esta guía, los puntos obvios para la toma de decisiones se sitúan: al final de la síntesis geocientífica preliminar de la fase 3, al término de la perforación de uno o más pozos de propósito múltiple en la fase 4 y al final del estudio de prefactibilidad. Sin embargo, dependiendo de las circunstancias pueden considerarse puntos de decisión intermedios; un ejemplo sería el caso en el cual el modelo geológico conceptual y el modelo geoquímico coincidieran en indicar que la temperatura y las características geológicas del yacimiento no son adecuadas para explotarlo con el esquema deseado. En este caso se podría evitar el gasto adicional asociado con el estudio geofísico y con la perforación exploratoria.

Lo mismo podría suceder al término de las investigaciones geoelectricas, cuyos resultados al no mostrar una anomalía que pudiese estar relacionada con la existencia de un yacimiento geotérmico, podrían ser determinantes para suspender la ejecución de las investigaciones geofísicas complementarias y la perforación de pozos.

### 5.3 Estudios Específicos

#### 5.3.1 Geología

##### 5.3.1.1 Objetivos

El objetivo principal de la geología es el de definir con mayor detalle las características litológicas, vulcanológicas y estructurales del área estudiada en la etapa de reconocimiento, que fue escogida para continuar las investigaciones por haberse encontrado en ella condiciones favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico.

El estudio geológico tendrá como propósito elaborar un modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, con el fin de realizar una evaluación técnica más detallada y disminuir el riesgo económico en la perforación de pozos exploratorios profundos.

Para la elaboración del modelo del yacimiento será necesario determinar con mayor detalle los elementos geológicos que forman parte de éste. Para éste propósito se deberá:

- Definir la naturaleza de la fuente de calor, su posible extensión, profundidad y edad.
- Definir el gradiente de temperatura en el subsuelo.
- Definir la posible geometría de las formaciones en el subsuelo, determinando su extensión, los espesores presumibles y sus permeabilidades.
- Definir las características litológicas del posible yacimiento y de la cobertura.
- Evaluar la posibilidad de recarga hidráulica del sistema geotérmico.

La mayor parte de los campos geotérmicos en Latinoamérica se localizan en zonas de alta actividad volcánica y/o sísmica, por tal motivo, será necesario desde el inicio del proyecto el tener en claro el riesgo volcánico y/o sísmico. Además, las experiencias en geotermia han revelado que es importante evaluar los riesgos de deslizamientos de masas, relacionados con la desestabilización de terrenos por la construcción de obras civiles.

Finalmente, será necesario empezar a evaluar el posible impacto ambiental de un proyecto geotérmico en el área de estudio y las implicaciones que éste tendría de acuerdo a la legislación nacional vigente en el país. Los aspectos más importantes que se tendrán que prever al respecto, son los que se relacionan con la contaminación química y térmica provocada por los productos del proceso de la explotación geotérmica (vapor y fluidos residuales).

Las actividades de geología en la etapa de prefactibilidad comprenderán trabajos de gabinete, de campo y de laboratorio, y éstos se ilustran en los incisos que se presentan a continuación.

### 5.3.1.2 Trabajo de Gabinete

Durante esta etapa se analizará la información existente tanto de trabajos geológicos ajenos a la geotermia como de los trabajos realizados en el reconocimiento, recurriendo al banco de datos ya elaborado.

Algunas áreas geotérmicas estarán ubicadas en regiones donde existen exploraciones para agua, hidrocarburos o minerales, de las cuales se podría obtener información sobre la geología de superficie y del subsuelo, y por ello habrá que realizar el estudio de estos datos ya sea recurriendo a los bancos de información o visitando las obras.

La herramienta más importante para caracterizar el subsuelo durante esta etapa será la información geofísica y de pozos acumulada en el banco de datos, por lo cual se tendrá que revisar y reinterpretar,

en el caso de no haberse realizado esta actividad durante el reconocimiento, para obtener un modelo geológico más coherente a los objetivos geotérmicos.

Se actualizará el estudio de teledetección desarrollado en la etapa de reconocimiento, con el fin de profundizar el conocimiento de los rasgos litológicos y estructurales del área. El trabajo de teledetección se realizará principalmente mediante el análisis de imágenes de satélite y de fotografías aéreas, para reconocer y elaborar los principales parámetros morfológicos, hidrográficos y estructurales. Inicialmente se estudiarán las imágenes de satélite y fotografías aéreas de vuelo alto (1:50,000), para tener un marco general; después se pasará al estudio de las fotografías de vuelo bajo con escalas de trabajo de 1:20,000 a 1:5,000, para alcanzar el máximo detalle. En el caso de existir, también se aprovecharán las fotografías aéreas en la banda del infrarrojo para detectar anomalías termales.

Con el estudio fotogeológico se puede llegar a elaborar entre un 30% a 60% de la carta geológica, dependiendo del tipo de vegetación de la zona de estudio. La interpretación debe hacerse sobre papel transparente y los trazos correspondientes a contactos, fallas, etc., tendrán que ser realizados con gran detalle y con una simbología clara para que sea legible a cualquier geólogo. En casos especiales se podrá aprovechar la ampliación de imágenes del satélite SPOT y también de imágenes en el infrarrojo, para medir el flujo de calor (superior a 3 HFU).

Adicionalmente se realizará el análisis morfológico del área por medio de mapas topográficos y fotografías aéreas a escalas grandes (1:10,000 ó 1:20,000). En particular se efectuará una diferenciación de la morfología, analizando la inclinación del talud, los fenómenos de inestabilidad, las formas volcánicas recientes y los rasgos de la red hidrográfica (intersección de arroyos, profundidad, etc.). Para esta actividad será muy útil digitalizar las cartas topográficas y procesar los datos a través de programas computacionales tipo CAD, para efectuar estudios cuantitativos de las inclinaciones del talud, perfiles topográficos y representaciones tridimensionales, que son importantes en la planeación de la infraestructura de los campos geotérmicos.

En relación con la evaluación del riesgo sísmico será importante estudiar, desde el punto de vista geológico, la sismicidad en el área del proyecto. Para este fin se utilizarán datos de la sismicidad histórica y la registrada recientemente con instrumentos sismológicos. La distribución espacial de la sismicidad y los mecanismos focales deben ser analizados para conocer las posibles estructuras sismogénicas y cuantificar en forma preliminar su probable longitud de rotura y la recurrencia de los sismos. La microsismicidad registrada por redes locales podría ayudar a detectar la presencia de una cámara magmática activa.

Una vez analizada la información de gabinete se realizará un informe en el cual se indicará el estado del conocimiento, se ratificará o elaborará un programa de actividades de campo y se iniciarán los trabajos correspondientes.

### 5.3.1.3 Trabajo de Campo

#### 5.3.1.3.1 Estudio Geológico de Detalle

##### Estudio Estratigráfico

La primera tarea a realizar en los levantamientos de campo es la de reconocer con mayor detalle la estratigrafía de las principales unidades geológicas regionales identificadas en la etapa de reconocimiento. Comunmente estas unidades están íntimamente relacionadas con la evolución geodinámica de la región, y tienen peculiaridades genéticas y evolutivas propias que les confieren gran importancia para la investigación geotérmica. Como consecuencia de la evolución geológica, estas unidades comunmente están separadas por discordancias mayores debidas a deformaciones tectónicas, a la falta de depositación, a la erosión, etc.

Una vez individualizadas las unidades y sus límites en el área de estudio, se procederá a investigar en detalle la litología de aquellas que tienen importancia geotérmica por estar relacionadas con el posible yacimiento, la capa sello o la fuente de calor.

Este estudio se realizará midiendo secciones en los lugares donde las unidades afloren claramente, definiendo siempre su litología, textura, espesor y tipo de contactos con las unidades que se encuentren en su base y en la cima; estos últimos deberán ser descritos con el mayor cuidado, sobretodo cuando sean parte de discordancias mayores. En cada sección la descripción siempre se hará de la base a la cima.

Puesto que la mayor parte de la exploración geotérmica generalmente se desarrolla en zonas volcánicas donde el trabajo de estratigrafía es más delicado y costoso, el grado de detalle del estudio estratigráfico debe ser proporcional a la importancia geotérmica de cada unidad. Para las unidades volcánicas más recientes que podrían estar relacionadas con la fuente de calor, la estratigrafía deberá ser especialmente reconstruida para ser utilizada en la elaboración del modelo vulcanológico de la región.

En el área de estudio se harán correlaciones teniendo en cuenta los principios de la continuidad y sobreposición de las unidades estratigráficas. En ambientes volcánicos es muy importante definir la continuidad ya que para los derrames lávicos generalmente es limitada, mientras que para los depósitos piroclásticos y las rocas sedimentarias su extensión es mayor; en estas condiciones estas rocas se podrían utilizar como unidades guía o de referencia en la correlación. En este último caso, debido a las variaciones en la

distribución espacial de las unidades, será importante considerar para este propósito a toda la sucesión litológica que compone un evento eruptivo, más que un tipo de roca único.

A falta de unidades guías la correlación podrá basarse sobre las edades obtenidas con dataciones radiométricas o paleontológicas. Si las edades son desconocidas, las unidades se correlacionarán tomando en cuenta principalmente su posición estratigráfica y la presencia de discordancias importantes entre ellas, y adicionalmente la petrografía, la geoquímica y el grado de deformación y erosión que presenten.

### Estudio Vulcanológico

La mayoría de los campos geotérmicos de Latinoamérica se encuentran en regiones de vulcanismo reciente y activo, y en la etapa de prefactibilidad los productos de esta actividad volcánica merecen un estudio vulcanológico de mayor detalle, con el fin de obtener información más precisa sobre la fuente del calor geotérmico y sobre el riesgo volcánico.

El estudio deberá reconstruir los principales rasgos de la historia volcánica del área de interés, y para alcanzar este objetivo se utilizará la información de las unidades regionales estudiadas en la fase correspondiente a la estratigrafía. Para las unidades más antiguas el estudio estará limitado a la caracterización de la litología, mientras que para las unidades recientes se deberá efectuar un análisis más detallado.

Inicialmente se reconocerá la tipología de los edificios volcánicos y la actividad eruptiva relacionada, particularmente la que involucre una posible interacción con aguas subterráneas. Posteriormente se individualizarán los eventos vulcano-tectónicos (colapsos caldéricos, colapsos laterales, actividad fisural, etc.) que caracterizan a la región, y, finalmente, se reconstruirá la evolución volcánica reciente.

El consecuente estudio estratigráfico de detalle estará enfocado a reconocer la composición y la geometría de los principales centros eruptivos involucrados en la historia volcánica del área y a la caracterización de sus productos a través del análisis de las facies. Esta caracterización se centrará en los productos piroclásticos, los cuales se describirán separando los productos de caída de los del tipo flujo o de "surge". La identificación y caracterización de cada depósito debe basarse sobre el análisis estadístico de la composición y de la cantidad relativa de los componentes juveniles (pómez y cristales) y de líticos.

El estudio estratigráfico será apoyado por un muestreo de las principales unidades, para sus análisis geoquímico y dataciones radiométricas. Para los eventos eruptivos más importantes se elaborarán mapas de isopacas del depósito, para evaluar el volumen de los productos que, junto a su composición, permitirán la preparación de un modelo evolutivo del sistema volcánico.

Particularmente se pondrá atención a los productos provenientes de eventos volcánicos explosivos, desarrollando el muestreo y análisis de los xenolitos para la reconstrucción e identificación de la geología del subsuelo y de los procesos hidrotermales profundos.

El conjunto de estos estudios permitirá determinar si el sistema volcánico tiene una alimentación profunda sin estacionamiento en la corteza, o si existe una cámara magmática somera. La definición de esta cámara magmática tendrá que involucrar, sobre todo, su geometría y profundidad. Otros parámetros que podrían determinarse se consideran de interés científico y no de utilidad práctica.

### **Levantamiento de la Carta Geológica**

Establecida la estratigrafía se levantará la carta geológica de detalle a escala 1:10,000 ó 1:20,000. Esta será una representación fiel de la distribución de las unidades estratigráficas reconocidas y caracterizadas en la etapa precedente. En este trabajo es muy importante separar los datos reales de los inferidos (hipotéticos).

En primer lugar se elaborará una carta geológica de afloramientos, es decir, una representación convencional sobre una base topográfica de las unidades que afloren o que se encuentren a una profundidad menor a 50 cm del suelo o bajo depósitos superficiales de distinta naturaleza. Estos últimos también serán cartografiados.

Sobre la base de este documento se realizará la carta geológica interpretada, donde no se considerará la cubierta reciente y se efectuarán interpretaciones de la geometría de los contactos y de las estructuras.

En ambas cartas cada unidad será representada por un color y una sigla que dependerá de la composición litológica y de la edad geológica. En la leyenda las distintas unidades locales se agruparán dentro de unidades mayores regionales, a fin de facilitar la lectura y la interpretación del mapa geológico.

Sobre las cartas geológicas también se representarán los principales rasgos estructurales, tales como fallas, fracturas, pliegues, rumbos y echados de los estratos, etc. Las partes que correspondan a terrenos volcánicos, deberán contener las estructuras volcánicas más importantes como cráteres, calderas (indicando los tipos de colapso), fracturas eruptivas, puntos de erupción y diques. También serán simbolizadas las principales zonas de alteración y las manifestaciones termales.

### **Muestreo**

Durante la elaboración de los estudios estratigráficos, vulcanológicos y cartográficos se tomarán muestras de roca para análisis petrográficos, geoquímicos y para dataciones radiométricas. En general

las dataciones se realizarán sobre rocas volcánicas y deberán permitir la reconstrucción cronológica de las etapas principales del desarrollo de la actividad volcánica y la edad de las erupciones más recientes en el área. Para cada muestra se anotará la posición en la columna estratigráfica local y se reportará el sitio de muestreo en un mapa.

Las muestras deberán tener características que dependerán del tipo de análisis que se desee efectuar; sin embargo, para cualquier análisis la muestra tiene que estar lo menos alterada posible. Si el análisis se efectuará sobre los minerales de la roca, entonces se debe procurar obtener muestras en las que los cristales estén bien conservados y sean abundantes.

Los estudios petrográficos serán orientados a definir los tipos de roca, los minerales de alteración, la mineralogía y las inclusiones fluidas; por lo tanto, la cantidad de roca necesaria para tales determinaciones será mínima (aproximadamente 0.5 a 1.0 kg). Para el análisis geoquímico la cantidad de muestra variará en función del estado de la roca; pero si ésta no está alterada, 5 kg serán suficientes incluso para elaborar láminas delgadas.

La datación de rocas puede ser sobre toda la muestra o sobre los minerales constituyentes. Los métodos más comunmente utilizados son los siguientes:

- El método  $C^{14}$  que se utiliza para edades menores a 35.000 años y se efectúa sobre carbones fósiles.
- El de isótopos de Uranio (U/Th, etc.), que puede ser utilizado para determinar edades entre 10,000 y centenas de miles de años en rocas volcánicas y restos fósiles carbonatados.
- El método de K/Ar que es el más usado sobre rocas volcánicas que contienen potasio y que se aplica para determinar edades desde algunas décimas de miles de años (método adaptado recientemente) hasta 100 millones de años.
- Los métodos de Rb/Sr, U/Pb y Th/Pb, que utilizan el mismo tipo de rocas y sirven para determinar edades mayores de 100 millones de años.
- Finalmente, el método de las trazas de fisión que se aplica a rocas ígneas, especialmente vidrio volcánico, con edades mayores de 10,000 años.

La cantidad de muestra para una datación radiométrica en roca total varía según el estado de los cristales; en una muestra bien conservada la cantidad puede ser de 1 a 1.5 kg, y para una roca no bien conservada la cantidad es de 2 a 4 kg. Si la datación se efectúa sobre minerales separados se necesitará de un mínimo de 5 g de minerales no alterados.

### 5.3.1.3.2 Estudio Estructural de Detalle

El estudio tectónico de una región juega un papel importante en la identificación de las condiciones favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico, determinando el fracturamiento de las rocas, su arreglo en las diferentes unidades y la relación que tiene con el movimiento de los fluidos termales. La tectónica define también el arreglo geométrico de las unidades geológicas en el subsuelo, lo que determina la existencia, la posición y la volumetría del eventual yacimiento geotérmico.

De hecho las fases tectónicas que han sucedido con el tiempo en la región, han perturbado el marco estratigráfico original produciendo unidades estructurales que se caracterizan por el tipo y el grado de deformación sufrida. La geología estructural, por lo tanto, tendrá el objetivo de describir estas unidades y las relaciones mutuas producidas por las diversas fases tectónicas. Adicionalmente, el estudio estructural y microtectónico deberán caracterizar los principales sistemas de fallas y fracturas que permiten la alimentación de fluidos al yacimiento o bien que forman parte de sus límites laterales.

El estudio del fracturamiento puede brindar información importante sobre la permeabilidad del yacimiento, así que durante estos trabajos se elaborará una carta estructural de detalle que apoyada en la carta geológica y los datos de la microtectónica y sismicidad, definan un modelo cinemático tridimensional del área del posible yacimiento.

De acuerdo a lo expuesto en los párrafos superiores, las actividades a realizar en el estudio geológico estructural serán las siguientes:

- Reconocimiento de las principales unidades estructurales regionales, definiendo sus límites y el tipo de fallas existentes. Más adelante se elaborará un zoneamiento estructural en bloques o áreas, caracterizado por un comportamiento tectónico diferente que será ilustrado en un esquema tectónico distinto al de la carta estructural.
- Estudio de las megaestructuras indicando su geometría, tipo de desplazamiento y edad. Con este estudio se reconocerán primero las diferentes sistemas de fallas con base a su geometría y comportamiento cinemático. La edad de las rocas afectadas por cada sistema y las relaciones de corte entre ellas, permitirán establecer la actividad cronológica de los diferentes sistemas.

En general se conoce que las estructuras al pasar del tiempo tienden a sellarse y, por tal razón, es evidente que las fallas más recientes son las que tienen más posibilidades de permitir el ascenso de fluidos termales. Por lo que toca a la geometría de estas estructuras, se recuerda que el buzamiento depende del tipo de falla (inversa =  $0^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ; normal =  $60^{\circ}$ ; de rumbo =  $90^{\circ}$ ), pero por los fenómenos de la refracción, tal comportamiento puede

cambiar al variar la litología. Cualquiera que sea el caso, la profundidad de las fallas será una función directamente proporcional de la extensión que tenga su traza superficial.

- Estudio meso y microestructural de las fallas. Este se realizará efectuando una serie de estaciones estructurales en donde se midan los elementos geométricos de las fallas (dirección, inclinación, pitch y sentido del movimiento relativo). En rocas no carbonatadas, para la identificación del sentido de movimiento deberán considerarse los criterios de Petit y otros (1983). Los datos pueden ser procesados con programas de computo (Marrett y Allmendinger, 1990) para determinar el campo de esfuerzos y elaborar un modelo cinemático de la zona.
- Estudio de detalle de las fracturas para obtener datos relativos a la densidad de fracturamiento, frecuencia y geometría de las fracturas (tipo de pared, abertura, tamaño, tipo de material de relleno, separación e intersección entre fracturas). Los datos se analizarán con métodos estadísticos y serán ilustrados con gráficos, histogramas y diagramas de rosas para cada uno de los diferentes bloques. Además, con los valores medios de la geometría de las fracturas y la densidad del fracturamiento, se podrá estimar en forma preliminar la permeabilidad de cada unidad.

Una vez ejecutado el levantamiento geológico y estructural de detalle, se realizarán secciones geológicas y bloques diagramáticos que reflejen la geometría de las rocas en el subsuelo.

#### 5.3.1.4 Trabajo de Laboratorio

En laboratorio se analizarán las rocas colectadas en el campo para determinar su edad y las características petrográficas, geoquímicas y mecánicas. Para tal propósito las muestras se seleccionarán con base a los diferentes estudios a realizar. Primero se elaborarán láminas delgadas y se realizarán estudios petrográficos, los cuales servirán de apoyo para los demás análisis.

El análisis geoquímico tendrá como objetivo la definición del tipo de roca para el estudio estratigráfico y eventualmente el estudio geotermométrico y geobarométrico de los magmas. Sobre las muestras seleccionadas se efectuarán determinaciones de elementos mayores tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , L.O.I., elementos menores y traza. Sobre los xenolitos provenientes de la cámara magmática se realizarán análisis de inclusiones fluidas para determinaciones geotermométricas.

La determinación de edades radiométricas ayudará a establecer la estratigrafía del área y los sitios donde se encuentran las rocas volcánicas más recientes.

Sobre muestras de las formaciones que se supone forman parte del yacimiento, se podrán efectuar algunas determinaciones de las características físicas de las rocas (porosidad y permeabilidad), útiles para estimar las posibilidades de recarga y producción del yacimiento geotérmico.

#### 5.3.1.5 Resultados e Interpretaciones

Con base en los resultados de los estudios de campo y de laboratorio se integrará la información correspondiente a la tectónica, geología regional, geología local, vulcanología, petrografía, petrología, etc., y se desarrollarán interpretaciones para obtener evidencias sobre la:

- Existencia y probable ubicación de una fuente de calor, señalando su naturaleza, posible extensión, profundidad y edad.
- Existencia de condiciones estratigráficas y estructurales favorables para la acumulación de fluidos termales en el subsuelo, esto es, la existencia de un yacimiento geotérmico y su relación con la fuente de calor.
- Existencia de condiciones estratigráficas y estructurales favorables para la recarga hidráulica del yacimiento geotérmico.

La información resultante de las interpretaciones deberá concluir con la elaboración de un modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, el cual será la base para el desarrollo de las subsecuentes investigaciones.

#### Elaboración del Modelo Geológico Conceptual

La parte esencial de un estudio de geología de detalle indudablemente consiste en la elaboración del modelo conceptual del sistema geotérmico y la determinación de un posible yacimiento en el área, con el objetivo inmediato de orientar la exploración geofísica en la etapa de prefactibilidad y, más tarde, ser la base de un modelo de mayor detalle que integrará la información que proporcionen las demás disciplinas que intervienen en el estudio. De ser positivos los resultados de las investigaciones de prefactibilidad, el modelo detallado será la base para conducir las exploraciones de factibilidad.

El modelo conceptual preliminar tratará de describir los aspectos reelevantes que determinan la existencia del sistema geotérmico, particularmente aquellos que sean útiles para la evaluación técnica del posible yacimiento. Tales aspectos son:

- El origen, extensión y profundidad de la fuente de calor.
- Las estructuras que permiten el ascenso de fluido termal al posible yacimiento.

- Las características litológicas del posible yacimiento, de la cobertura y del basamento.
- La profundidad y extensión de la unidad (es) litológica (s) en la (s) que se infiere el yacimiento.
- Unidad (es) litológica (s) o formación (es) que favorece (n) la circulación de hidrica en el subsuelo.

El conocimiento de estos aspectos permitirá determinar con mayor efectividad las áreas de investigación geofísica, cuyos resultados probarán la validez del modelo preliminar y, más tarde, al término de los estudios de prefactibilidad, permitirán la elaboración de un modelo detallado que defina con mayor seguridad las posibilidades geotérmicas del área explorada.

#### 5.3.1.6 Evaluación del Riesgo Geológico

Algunos eventos naturales se consideran de riesgo para el Hombre, porque éste con sus obras ha interferido la evolución propia de la naturaleza o porque ha invadido áreas donde la Tierra eventualmente manifiesta fenómenos intempestivos generalmente de gran violencia. Por tal motivo, la posible ocurrencia de dichos fenómenos tendrá que ser evaluada para prevenirlos.

En todo el mundo la mayor parte de los campos geotérmicos de alta entalpia se encuentran en zonas donde el riesgo de sismos y eventos volcánicos está potencialmente presente. El caso más sobresaliente en la historia de tales campos es el de Pinatubo, en Filipinas, donde un evento volcánico destruyó la infraestructura del campo.

En México y Guatemala también se han dado casos de pérdidas en la infraestructura de algunos campos, debido a fenómenos de deslizamiento de masas. Por lo tanto, paralelo al estudio geológico de detalle, es necesario efectuar estudios de evaluación del riesgo sísmico, volcánico, de deslizamiento de masas, de hundimientos, de explosiones freáticas, etc.

Tomando en cuenta que la mayoría de los datos necesarios para el desarrollo de estas evaluaciones formán parte de las investigaciones geológicas, vulcanológicas y geofísicas desarrolladas en el estudio geotérmico, esencialmente sólo se deberán elaborar las interpretaciones necesarias para tales fines.

Para el riesgo sísmico, se analizará el banco de datos de la sismicidad y la neotectónica para definir las principales fallas activas. En el caso que existan fallas importantes, será útil efectuar trincheras cruzando la estructura sismogenética para medir los desplazamientos de los estratos índice de edad conocida, y así calcular el tiempo de recurrencia de los sismos. Además, será importante cuantificar la longitud de máxima rotura a lo largo de una falla, para estimar

la magnitud y la aceleración máxima que pudiese esperarse. Esto permitirá realizar una clasificación sísmica del área y prever los posibles escenarios en caso de un sismo o terremoto.

Desde el punto de vista del riesgo volcánico será necesario identificar los principales eventos, determinar las características de los más recientes y estimar la recurrencia de cada tipo de erupción. La cronología eruptiva, el modelo de evolución de la cámara magmática y la distribución de los depósitos piroclásticos (ya estudiados en los trabajos de vulcanología), serán utilizados para elaborar mapas de peligrosidad.

Tomando en cuenta los datos climatológicos, topográficos y vulcanotectónicos del área de estudio, se podrán establecer las vías preferenciales de escurrimiento de los flujos piroclásticos, de los debris-flow y de los derrames lávicos. Mediante los datos climatológicos y el uso de modelos de dispersión aérea, se podrán elaborar mapas en los que se señalen las áreas que podrían ser afectadas por los productos de caída en el caso de un probable evento eruptivo de tipo explosivo.

Los datos vulcano-tectónicos serán utilizados para inferir la ubicación de futuros centros de erupciones y de posibles colapsos y/o deslizamientos.

En relación a la evaluación del riesgo de deslizamientos, se tomarán en cuenta tanto las situaciones de posible inestabilidad gravitacional como las relacionadas con la actividad volcánica. Para el primer tipo de riesgo, el estudio se enfocará sobre las rocas con características geomecánicas pobres (depósitos superficiales, depósitos de talud, depósitos piroclásticos, rocas alteradas y rocas tectonizadas) en áreas de fuerte pendiente. Respecto al segundo tipo de riesgo, el estudio considerará la posibilidad de colapsos laterales de edificios volcánicos (conos y domos) inducidos por la propia actividad volcánica y/o la actividad sísmica.

Las explosiones freáticas generalmente se presentan en áreas con manifestaciones termales y ocasionalmente en sus alrededores a unas decenas de metros de distancia. También se presentan en áreas de vulcanismo reciente aunque no activo, es decir, en la etapa de enfriamiento del sistema magmático profundo. En algunos casos dichas explosiones se presentan a lo largo de estructuras que controlan el flujo térmico cerca de la superficie, y en otros en áreas donde ciertos depósitos o formaciones superficiales favorecen el flujo y la presurización de fluidos termales.

Considerando las principales formas de ocurrencia de este tipo de fenómenos, en la etapa de prefactibilidad la evaluación de los riesgos por explosiones freática se podrá realizar identificando en un mapa las áreas termales y los sitios donde las estructuras y las formaciones geológicas presentan condiciones favorables para la ocurrencia de este tipo de eventos. Tales sitios generalmente son el cruce de fallas

con evidencias termales, las fallas conductoras de fluidos termales en rocas alteradas y las áreas de manifestaciones termales en depósitos aluviales o lacustres.

El estudio de los riesgos naturales deberá ser de utilidad en la misma etapa de prefactibilidad, en el momento que como resultado de los estudios geocientíficos se decida realizar algunas perforaciones y haya que localizar caminos, campamentos y sitios de perforación.

#### 5.3.1.7 Informes

La secuencia de investigaciones geológicas y sus resultados parciales y finales serán objeto de varios tipos de informes, tales como: informe final, avance de actividades, técnico de avance, de laboratorios y el de síntesis geovulcanológica, cuyos contenidos en términos generales se indican a continuación.

**Informe Final.** - El resultado del estudio geológico se presentará en un informe completo en el que además de describir con detalle los trabajos e interpretaciones sobre la tectónica, la estratigrafía y la vulcanología regionales, la geología de detalle y los riesgos naturales del área de interés, integre una síntesis del modelo conceptual del sistema geotérmico, con recomendaciones sobre el desarrollo de las investigaciones subsecuentes.

Este informe reunirá y correlacionará los resultados de las investigaciones de gabinete, campo y laboratorio, y, en el caso de disponerse, de la información aportada por pozos exploratorios.

El informe contendrá la descripción de las condiciones geológicas regionales y detallará las características estratigráficas, estructurales y volcánicas del área, y describirá el modelo preliminar del sistema geovulcanológico.

El texto estará acompañado de la información gráfica elaborada, consistente en los mapas con la interpretación fotogeológica y de imágenes de satélite, mapas geovulcanológicos de detalle, mapas estructurales regionales y del área de interés geotérmico, las cartas con la geología levantada e interpretada, los mapas de ubicación de muestras y otras de aspectos específicos como los riesgos naturales, etc. Adicionalmente se anexarán secciones geológico-estructurales, esquemas de la evolución estructural de los aparatos volcánicos y un diagrama del modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico.

En el caso de existir pozos, se presentarán las columnas litológicas en los cuales se individualizarán las formaciones litoestratigráficas interceptadas, y se presentarán las correspondientes correlaciones entre pozos y las formaciones aflorantes.

De existir información de otras disciplinas geocientíficas que hayan intervenido en la prefectibilidad, se establecerá la correlación de los resultados de tales investigaciones con la geología.

El informe se complementará con diagramas y tablas de las determinaciones petrográfico-mineralógicas y de los análisis químicos, los resultados de las dataciones absolutas, memorias de cálculo, etc.

Será importante que el informe incluya también las columnas estratigráficas, estereogramas de estaciones estructurales y los resultados de la determinación del campo de esfuerzos, y cualquier otro dato que haga lo más completo.

**Informe de Avance de Actividades.** - Su objetivo es describir en forma porcentual el volumen de trabajo cubierto en un periodo de tiempo determinado (mensual, bimensual o trimestral); describiendo en forma preliminar los resultados y la actualización del plan de operaciones para el periodo siguiente.

**Informe Técnico de Avance.** - Este documento se elabora normalmente al final de cada actividad (gabinete, campo y laboratorio). Sin embargo, eventualmente podría necesitarse la elaboración de reportes técnicos sobre aspectos específicos.

**Informes de Laboratorio.** - Según sea el tipo de análisis los laboratorios presentarán los informes correspondientes. Estos informes podrán ser petrográficos, químicos de rocas, químicos a la microsonda electrónica, de difracción de rayos x, de dataciones, etc.

**Síntesis Geovulcanológica.** - Este informe se preparará con base a una síntesis de la vulcanología y contendrá los aspectos fundamentales del estudio, incluyendo la información gráfica. Esta síntesis a su vez formará parte del informe final del estudio de prefectibilidad.

#### **5.3.1.8 Recursos Humanos, Tiempo y Costo**

Los estudios de geología en la etapa de prefectibilidad deberán ser ejecutados preferentemente por el personal especializado que realizó la etapa de reconocimiento, por tratarse de estudios secuenciales. Los recursos humanos requeridos para llevar a cabo el estudio geológico se detallan en continuación.

Para los trabajos de gabinete y campo se necesitarán:

- 1 Vulcanólogo
- 1 Geólogo-estructural

Para los trabajos de laboratorio:

1 Petrógrafo-Petrólogo

Para la coordinación del estudio:

1 Geólogo especialista en geotermia

Dependiendo de la extensión del área de proyecto y de las facilidades operativas, el tiempo de ejecución del estudio geológico superficial puede variar ampliamente, sin embargo puede decirse que un tiempo razonable para su realización es de 8 a 10 meses

Por lo que se refiere al costo del estudio, éste se ha estimado entre U.S. \$ 200.000 y U.S. \$ 300.000 dólares, incluyendo los servicios de asesoría y/o consultoría externa y de laboratorios.

Por lo que se refiere al equipo que se requieren para su realización, éste normalmente se reducen al equipo de campo consistente en brújula, martillo, lupa, altímetro, termómetro, estereoscopio de bolsillo, etc. Para los trabajos de gabinete lo más usual es disponer de un estereoscopio de oficina, equipo de dibujo y, de no darse a contrato los estudios petrográficos, un equipo de laminación de rocas y un microscopio.

### 5.3.2 Geoquímica

#### 5.3.2.1 Objetivos

El objetivo específico del estudio geoquímico durante la etapa de prefactibilidad es aportar, para la formulación del modelo conceptual preliminar del sistema hidrotermal, información sobre la temperatura y salinidad del fluido en el posible yacimiento, sobre su dirección general de flujo y sobre la ubicación de las zonas de recarga termal y no termal, de ascenso de vapor, de ebullición y de descarga natural.

El estudio deberá incluir una interpretación exhaustiva de la información disponible, con el fin de identificar todos los tipos de fluidos (agua y vapor) naturales de la zona, y determinar su relación genética con el sistema hidrotermal y sus procesos de mezcla en el subsuelo.

#### 5.3.2.2 Actividades y Alcances

Una vez asegurado el apoyo de laboratorio para los análisis químicos e isotópicos, el estudio geoquímico puede ser llevado a cabo por un geoquímico y un asistente, de acuerdo al esquema señalado como óptimo en la tabla No. 1 referente a la etapa de reconocimiento. Los requerimiento de equipo son los señalados en dicha tabla.

#### **5.3.2.2.1 Selección de Sitios para Toma de Muestras**

Para alcanzar el objetivo arriba descrito, es menester identificar y tomar un número representativo de muestras de todos los tipos de fluidos termales que afloren de manera natural en el área bajo estudio, y determinar de manera clara su distribución geográfica. Con este fin deberá complementarse la información generada durante la etapa de reconocimiento y completarse el levantamiento del censo de fuentes y cuerpos de agua naturales en la zona. Con el fin de evitar duplicación de esfuerzos, esta actividad se deberá planear y ejecutar en coordinación con el estudio hidrogeológico.

Las recomendaciones presentadas para la etapa de Reconocimiento sobre metodologías y precauciones a observar durante el muestreo de aguas naturales (manantiales, cuerpos de agua superficiales, vapor de fumarolas) son aplicables en la etapa de prefactibilidad (ver el inciso 4.3.2.2.2 referente a la etapa de reconocimiento).

#### **5.3.2.2.2 Análisis Químicos e Isotópicos**

El laboratorio que llevará a cabo los análisis debe ser seleccionado cuidadosamente, basándose en su desempeño previo y en la calidad de su personal y equipo. El geoquímico debe trabajar en coordinación con el responsable de los análisis; entre ambos deben discutir sobre las especies químicas e isotópicas que se deberán analizar, sobre la metodología de análisis a seguir y sobre los tipos de muestras que se deberán tomar, incluyendo aspectos tales como el volumen de muestra y el tratamiento que se le deba dar a ésta en el campo.

Parte del equipo de muestreo geoquímico (potenciómetro o papel para medición de pH, botellas para muestra, etc.) puede ser seleccionado o proporcionado por el responsable de los análisis. Antes de llevar a cabo los análisis, el responsable deberá ser informado por el geoquímico sobre la naturaleza de las muestras colectadas. Esta cooperación es conveniente, puesto que contribuirá a la obtención de resultados de análisis más exactos y mantendrá informado al geoquímico sobre las limitaciones de estos resultados y su repercusión sobre la interpretación.

El conjunto óptimo de análisis de aguas naturales se describe en la tabla No. 3 de la guía para la etapa de reconocimiento. La naturaleza de la información a obtener del análisis de cada tipo de agua se describe en el inciso 4.3.2.2.3 así como en la tabla No. 2., referentes a la misma etapa de reconocimiento.

#### **5.3.2.2.3 Clasificación Hidrogeoquímica de las Aguas Naturales**

En estudios hidrológicos regionales es un procedimiento común el llevar a cabo la clasificación hidrogeoquímica de las aguas según la naturaleza de sus cationes y aniones principales. Los niveles de

concentración y las proporciones entre los diversos cationes y aniones de las aguas naturales pueden ser indicativos de la naturaleza del estrato geológico en que han sido almacenadas.

Para facilitar el proceso de clasificación y para ilustrar gráficamente las diferencias químicas entre los distintos grupos, o entre aguas del mismo grupo, se han propuesto una variedad de diagramas. Entre éstos se cuentan diagramas columnares como el de Collins, triangulares/rómbicos como el de Piper, logarítmicos como el de Schoeller, poligonales como el de Stiff, etc. Una revisión de estos diagramas puede ser consultada en el libro de Custodio y Llamas (1976).

Típicamente el agua de un yacimiento hidrotermal tiene un alto contenido de cloruro de sodio, obtenido de la lixiviación de la roca, con una posible aportación de una fuente magmática. En su trayectoria, que puede ser desde ascendente hasta cuasi-horizontal, este líquido hidrotermal transporta calor convectivamente hacia la zona de descarga. Tanto la temperatura como la salinidad del líquido hidrotermal pueden variar ampliamente entre un punto y otro dentro del sistema.

En sistemas de alta temperatura ( $> 200^{\circ}\text{C}$ ), el líquido hidrotermal tiende a sufrir la separación de vapor a profundidad; este vapor arrastra consigo una alta proporción de componentes volátiles, principalmente bióxido de carbono y ácido sulfhídrico. Parte del vapor se condensa en su trayecto y en ocasiones una fracción puede alcanzar la superficie y escapar en lo que se conoce como una fumarola.

El vapor puede ser absorbido por agua de estratos suprayacentes; si esto ocurre a suficiente profundidad, se dará lugar a la formación de aguas de tipo bicarbonatado debido a la absorción del bióxido de carbono. Por otro lado, si esto ocurre en un estrato cercano a la superficie, la oxidación del ácido sulfhídrico por el oxígeno presente en el agua somera da lugar a la formación de aguas ácidas con alto contenido de ion sulfato; si esto ocurre en la superficie se forman lagunas con alta temperatura.

En la exploración geotérmica el principal objetivo de un examen preliminar de las características hidrogeoquímicas de las aguas de la zona, es la identificación de los tipos de agua mencionados arriba, los cuales se manifiestan en la superficie mezclados en mayor o menor grado con aguas de estratos someros. La tabla No. 2 presenta una descripción resumida del tipo de manifestación asociado con cada tipo de agua.

Durante la revisión preliminar de la evidencia geoquímica, es particularmente importante identificar los patrones de dilución de aguas del yacimiento (clorurado sódicas) con agua de estratos someros (normalmente de mucha menor salinidad). Es decir, se debe tratar de reconocer grupos de aguas emanantes en la superficie, que representen mezclas en variadas proporciones de un componente de agua del yacimiento con agua no termal.

En un diagrama típico que relacione dos componentes iónicos principales (o tres en un diagrama triangular), estas aguas darán lugar a puntos que formarán una progresión lineal. En una misma zona pueden manifestarse en la superficie dos o más aguas geotérmicas de distinta salinidad y temperatura, cada una dando origen a su propio patrón de dilución; el no distinguir entre estos patrones llevaría a confusiones o inexactitudes al momento de aplicar los modelos de mezcla que se describen más adelante.

#### 5.3.2.2.4 Geotermometría

Tanto en la etapa de reconocimiento como en la etapa de prefactibilidad, una de las principales aportaciones del estudio geoquímico es la estimación de temperaturas en el subsuelo. En la etapa de prefactibilidad esta estimación deberá ser uno de los varios elementos de un modelo conceptual preliminar del sistema hidrotermal, y la solidez de esta estimación estará validada en parte por la consistencia interna de dicho modelo.

En el inciso 4.3.2.2.4 referente a la etapa de reconocimiento se presenta una breve discusión sobre los geotermómetros más frecuentemente empleados para exploración geotérmica, así como de las precauciones a observar para su aplicación.

#### 5.3.2.2.5 Modelado de Mezclas

En su ascenso a la superficie el fluido hidrotermal tiende a enfriarse hasta una temperatura igual o menor que la temperatura de ebullición. Básicamente existen tres mecanismos que pueden permitir este enfriamiento, a saber: enfriamiento adiabático (separación de vapor), mezcla con aguas de menor temperatura y enfriamiento conductivo (pérdida de calor hacia la roca).

Normalmente los tres mecanismos intervienen en el enfriamiento en mayor o menor grado. Sin embargo, si los dos primeros intervienen de manera exclusiva o preponderante, es posible hacer un balance simultáneo de materia y entalpía que permita dilucidar los eventos ocurridos durante el ascenso del fluido. A este procedimiento interpretativo se le ha denominado modelado de mezclas.

El modelado de mezclas se basa en el carácter conservativo del contenido de calor (entalpía) del fluido, dado que se parte de la suposición de que la pérdida de calor a la roca es despreciable. Asimismo, se toma en consideración el carácter conservativo del contenido (concentración) de especies químicas, como el ion cloruro, que permanecen en la fase líquida mostrando una escasa tendencia a intercambiarse por otros iones de los minerales de la roca.

Bajo ciertas circunstancias el contenido de sílice en el fluido se puede considerar como un parámetro conservativo. Esto sucede si después

de sufrir un enfriamiento adiabático, la fase líquida asciende a la superficie o se mezcla con agua fría con suficiente rapidez, de tal forma que la solución no permanezca por un tiempo prolongado con una sobresaturación de sílice que lleve a su precipitación. La inclusión de este parámetro en el proceso de modelado de mezclas es sumamente útil, debido a que la concentración de sílice en el líquido hidrotermal es predecible con base en la temperatura estimada del yacimiento. Varios autores han descrito métodos gráficos y analíticos para modelar los procesos de enfriamiento y de mezcla del líquido hidrotermal con aguas de menor temperatura (Fournier y Potter, 1982; Fournier et al, 1979).

Normalmente el modelado de mezclas parte de un valor estimado de la temperatura en el yacimiento, y el resultado es un modelo que estima la salinidad (y composición isotópica, como se verá más adelante) del líquido del yacimiento y explica los procesos que dan lugar a la formación de las aguas de tipo clorurado sódico de la zona.

#### 5.3.2.2.6 Hidrología Isotópica

El contenido de los isótopos estables pesados de oxígeno e hidrógeno ( $^{18}\text{O}$  y deuterio), es decir la proporción de especies moleculares  $\text{DHO}$  y  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , no es uniforme entre las aguas naturales. El ciclo meteorológico se inicia con la separación de vapor del agua del océano, sigue con la precipitación de este en forma de lluvia en los continentes, y termina con el escurrimiento y retorno de parte de esta agua al océano. Este ciclo genera aguas con una variedad de contenidos isotópicos.

Los contenidos de  $^{18}\text{O}$  y deuterio pueden variar ampliamente entre las aguas de lluvia de un sitio y de otro, o inclusive en un mismo sitio en distintos eventos de precipitación; sin embargo, las concentraciones de estos dos isótopos en las aguas de lluvia satisfacen una relación lineal entre sí, denominada la "línea meteórica".

Una vez ocurrida la precipitación, la composición isotópica del agua puede variar sólo como resultado de un número limitado de procesos naturales, y de una manera más o menos predecible. La rama de la hidrología basada en la interpretación de la composición isotópica de aguas naturales, con el fin de dilucidar su origen y los procesos físicos y químicos en que ha intervenido en la superficie o en el subsuelo, se denomina hidrología isotópica. Para una introducción general en el tema de hidrología isotópica se puede consultar, por ejemplo, a Gat y Gonfiantini (1981) y Sheppard (1986).

En exploración geotérmica la hidrología isotópica es particularmente útil, porque permite formular una hipótesis sobre el origen del agua del yacimiento y permite modelar los procesos de separación líquido-vapor en el subsuelo. El agua subterránea intercambia el isótopo  $^{18}\text{O}$  con los minerales de la roca, pero su contenido de deuterio permanece casi inalterado. Este hecho permite identificar, al menos

tentativamente, la zona de recarga en superficie de un yacimiento hidrotermal, basándose en el contenido de deuterio del agua geotérmica.

Los coeficientes de partición entre fases vapor-líquido de las especies isotópicas del agua son conocidos (Truesdell et al, 1977). Esto ha permitido desarrollar metodologías para dilucidar la relación genética con el líquido del yacimiento de aguas termales emanantes en la superficie (Truesdell et al, 1977), y del vapor de fumarolas (Giggenbach y Stewart, 1982).

#### 5.3.2.3 Resultados

El estudio geoquímico debe dar como resultado un modelo conceptual preliminar que describa la estimación de las características principales del líquido del yacimiento (salinidad, temperatura y composición isotópica), las heterogeneidades detectables en el yacimiento (en cuanto a esas características), el inventario de los diversos tipos de manifestaciones termales en superficie (mostrando su localización geográfica e ilustrando sus patrones de distribución) y una interpretación global de los procesos que, partiendo del líquido del yacimiento, dan lugar a la formación de todos los tipos de manifestaciones termales.

El contenido de deuterio del líquido del yacimiento permitirá identificar, al menos tentativamente, la zona de recarga superficial del yacimiento. La distribución de fumarolas y fuentes de líquido afectadas por vapor geotérmico, será indicativa de la zona de ascenso de vapor, que deberá aproximarse a la localización de la fuente de calor determinada por el estudio geovolcanológico. La ubicación de las zonas de recarga, de ascenso de vapor y de descarga de líquido con alta salinidad, definirá la dirección general de flujo del líquido geotérmico.

#### 5.3.2.4 Recursos Humanos y Materiales

Los recursos humanos requeridos para llevar a cabo el estudio geoquímico en la etapa de prefactibilidad, son esencialmente los mismos señalados como óptimos para la etapa de reconocimiento (Tabla No. 1), esto es:

- Para la coordinación e interpretación:
  - 1 Geoquímico especializado en geotermia.
- Para los trabajos de campo:

En el caso óptimo, un Geoquímico y un Técnico especializado en muestreo geoquímico. La actividad de campo podría ser cubierta por el técnico, si éste cuenta con suficiente experiencia.

En cuanto a los recursos materiales éstos también son los mismos del reconocimiento (Tabla No. 1). Al igual que en dicha etapa, es necesario contar con un equipo muestreador portátil y el apoyo de laboratorios especializados en el análisis químico de aguas naturales (incluyendo agua y vapor geotérmicos), así como en el análisis de isótopos estables (oxígeno-18 y deuterio) y de tritio. En caso de disponer el país de un laboratorio adecuado para el análisis de muestras de aguas y gases, éste debe contar al menos con un equipo de absorción atómica y un cromatógrafo de gases.

### 5.3.2.5 Tiempos y Costos

La duración y el costo del estudio geoquímico dependerán de la complejidad y tamaño del sistema hidrotermal, y de la abundancia y variedad de fluidos termales aflorantes.

En lo referente a costos, en términos generales se estima que éstos pueden variar entre un mínimo de U.S. \$ 30,000 y un máximo de U.S. \$ 75,000 dólares, distribuidos de la siguiente manera:

	(Costo en dólares americanos)	
	Mínimo	Máximo
Personal	\$ 12,000	\$ 23,000
Análisis Químicos	\$ 5,000	\$ 21,000
Análisis Isotópicos	\$ 5,000	\$ 12,000
Materiales y Consumibles	\$ 2,000	\$ 4,000
Viajes y Viáticos	\$ 3,000	\$ 11,000
Transporte Local	\$ 3,000	\$ 4,000
<b>Total</b>	<b>\$ 30,000</b>	<b>\$ 75,000</b>

El estudio geoquímico tomará un tiempo mínimo de 6 meses y un máximo de 8 meses. El tiempo requerido para este estudio estará determinado en buena medida por la rapidez con que se lleven a cabo los análisis químicos e isotópicos. Es importante programar oportunamente la intervención de los laboratorios que se vayan a encargar de éstos trabajos.

### 5.3.3 Geofísica

#### 5.3.3.1 Objetivos Específicos

En la etapa de prefactibilidad los estudios geofísicos se realizan para complementar el modelo del sistema geotérmico, por medio de información indirecta sobre las características de las rocas que constituyen el posible yacimiento y el sistema de recarga hidráulica al mismo.

La investigación geofísica tiene el propósito de proveer información indirecta sobre el tridimensionamiento geológico del subsuelo, de suma importancia para la identificación del yacimiento geotérmico, la estimación de su posible potencial energético y para la planificación de perforaciones exploratorias.

### 5.3.3.2 Actividades y Alcances

#### 5.3.3.2.1 Diseño y Planificación de las Exploraciones

La exploración geofísica en esta etapa es un elemento esencial y de alto costo dentro del proceso de la investigación geotérmica. La selección de métodos adecuados para la identificación del yacimiento geotérmico, depende de las condiciones geológicas del área por investigar y es, por lo tanto, de suma importancia considerar cuidadosamente el diseño y la planificación de los estudios, de tal manera que su ejecución:

- Este coordinada e integrada al programa completo de estudios de prefactibilidad.
- Aborde los aspectos geológicos e hidrológicos apropiados.
- Pueda realizarse bajo las restricciones impuestas por las condiciones locales (clima, altitud, condiciones topográficas, mano de obra, acceso, etc.) que podrían obstaculizar el trabajo de campo.

Puesto que los objetivos de la geofísica en esta etapa son los de determinar los aspectos estratigráficos y estructurales del área de interés, y adicionalmente identificar anomalías que de manera indirecta manifiesten la existencia de un yacimiento geotérmico en el subsuelo, los métodos más frecuentemente utilizados para alcanzar tal propósito son: el eléctrico (con sus variantes eléctrica, electromagnética, magnetotelúrica, audiomagnetotelúrica, etc.), el gravimétrico y el magnético, y, eventualmente, el potencial natural (SP), la sísmica activa (reflexión y refracción), la sísmica pasiva (microsísmicidad y ruido sísmico), el infrarrojo en la banda termal y el de gradiente de temperatura.

La selección de los métodos geofísicos a utilizar en la investigación geotérmica de una área, normalmente depende de los objetivos geológicos por alcanzar, de las características topográficas del área de trabajo y de los recursos económicos disponibles para la ejecución del estudio. Sin embargo, cabe mencionar que comunmente para investigar las posibilidades geotérmicas en una zona volcánica, la técnica que ha dado mejores resultados por la calidad de la información aportada y por la relación costo/beneficio del estudio, ha sido una combinación de los métodos eléctricos con la gravimetría y la magnetometría. En áreas en las cuales las rocas en el subsuelo son sedimentarias, la sísmica de reflexión/refracción ha sido un método complementario a

los anteriores, de gran utilidad para resolver problemas estructurales y estratigráficos aunque con un costo demasiado alto.

#### **5.3.3.2 Consideraciones en las Operaciones de Campo y en la Adquisición de Datos**

En esta sección se presentan los métodos geofísicos más frecuentemente usados en la investigación de prefactibilidad, indicando en una forma resumida como han sido aplicados. La intención al presentarlos en este documento es dar una orientación en la selección de los métodos más efectivos en la investigación geotérmica, y no debe ser interpretada como un procedimiento de aplicación rígido. Adicionalmente da más detalles sobre las técnicas mencionadas en el numeral 4.3.3. de la guía para estudios de reconocimiento. Ejemplos descriptivos de estas técnicas se encuentran en la literatura en general (Wright y otros, 1985 y Goldstein, 1988).

#### **Prospección Aérea**

Debido a economías de escala los reconocimientos aéreos son más efectivos en términos de costos si el área de interés geotérmico es grande, o si un mismo levantamiento involucra dos o más áreas geotérmicas cercanas y se programa efectuar más de un tipo de reconocimientos aéreos (por ej., magnético e imágenes de infrarrojo térmico) que puedan realizarse consecutivamente con la misma aeronave y el mismo equipo humano.

Existen varias compañías de servicio con experiencia en operaciones en América Latina que pueden proveer las aeronaves, equipos y tripulaciones necesarias para recolectar los datos. Cuando se contrata un servicio de este tipo, resulta mejor si el contratista transporta sus propias aeronaves de reconocimiento al país, debido a que ya están preparadas con los equipos necesarios para la prospección y, si se trata de un reconocimiento aeromagnético, generalmente la nave se presenta limpia y compensada magnéticamente para poder obtener datos con alta resolución y libres de ruido.

Los levantamientos aeromagnéticos en vuelos a baja altura sobre el terreno (150-200 m) y en líneas con separaciones relativamente pequeñas (500-600 m), resultan ser útiles para el mapeo de unidades geológicas, particularmente en áreas de rocas volcánicas y sus equivalentes plutónicos, ya que con frecuencia algunas de estas rocas presentan una señal magnética significativa.

Para obtener la máxima resolución en los datos aeromagnéticos, es preferible recurrir a los vuelos de reconocimiento de bajo nivel, volando a una altura constante sobre el terreno (denominados "drape"), que con frecuencia se complementan con reconocimientos a una altitud constante (controlada barométricamente) sobre toda la zona de interés. Juntos, ambos estudios proveen datos de múltiples niveles que pueden ayudar en el análisis magnetométrico del área (Hanna, 1987); sin

embargo, se deberá tomar en cuenta que en ocasiones los reconocimientos barométricos de alto nivel, son los únicos que permiten obtener datos en terrenos montañosos o donde las condiciones climáticas no son seguras para realizar reconocimientos de bajo nivel.

La magnetometría aérea junto con la interpretación de imágenes Landsat de falso color y/o de fotografías aéreas, algunas veces puede ser útil para mapear zonas de alteración hidrotérmal de alta temperatura. En las fotografías estas zonas se manifiestan como anomalías que se caracterizan por su color, debido a la destrucción/oxidación de la magnetita, hematita o minerales de hidróxido férrico, y algunas veces pueden distinguirse por la presencia de bajos magnéticos en el mapa, después que los datos iniciales se han procesado para remover el campo principal terrestre y la deriva diurna.

Si en la zona del reconocimiento se conoce o se sospecha que existen numerosas áreas de descarga térmica, sería aconsejable incluir un estudio térmico de exploración en la banda del infrarrojo. Los barredores infrarrojos operan en las escalas de longitud de onda de 3 a 5 micrones y de 8 a 14 micrones, y las anomalías termales resultantes generalmente detectadas durante vuelos previos al amanecer, frecuentemente se pueden relacionar con las áreas de mayor temperatura que la promedio del terreno.

Ya que la técnica del infrarrojo detecta anomalías debidas al tipo de roca, a la vegetación y a la humedad y temperatura del suelo, por mencionar algunos factores que influyen en las mediciones, el infrarrojo térmico como método de exploración resulta útil sólo para detectar las anomalías de mayor flujo de calor. La misma aeronave puede ser utilizada tanto para los reconocimientos magnéticos como para los infrarrojos, sin embargo los vuelos de reconocimiento tendrán que realizarse en distintos momentos.

### **Prospección Terrestre**

Un estudio de prefactibilidad incluye levantamientos sobre el terreno que involucran una combinación de sondeos eléctricos y electromagnéticos con levantamientos gravimétricos y magnetométricos. Los estudios de gradientes de temperatura o de flujo de calor así como el monitoreo sísmico son menos utilizados, sin embargo también en ciertas ocasiones es conveniente tomarlos en cuenta.

La gravimetría y magnetometría terrestres generalmente se realizan con suficiente detalle en toda una área de interés, con el fin de contar con una base confiable de datos para la interpretación estructural. Lo más conveniente es obtener los datos de campo en una cuadrícula regular de estaciones; sin embargo, debido a que los accesos y las condiciones del terreno no siempre son favorables, las líneas de medición, espaciadas preferentemente cada 200-500 metros, se localizan a lo largo de caminos, senderos, crestas, trazas de drenaje o a lo largo de cualquier ruta de acceso, no importa cuán tortuosa sea ésta. En las zonas donde se requiere un mayor detalle, las

estaciones de medición se ubican con intervalos del orden de 100 m en los levantamientos de gravimetría, y del orden de los 250 m en los de magnetometría, incrementando la separación de las estaciones hasta un máximo de 500 m a medida que se alejan de la zona de mayor detalle, a fin de cubrir el área de interés hasta sus fronteras. La precisión típica para estas mediciones de magnetometría y gravimetría son de 1 nT y 0.1 mgal, respectivamente.

Las exploraciones de gravimetría y magnetometría deben ser diseñadas para complementar los datos geofísicos preexistentes, cubriendo una área lo suficientemente grande para poder interpretarla. La ubicación de las estaciones debe registrarse cuidadosamente en mapas topográficos o fotografías aéreas; siendo aconsejable obtener también datos de la ubicación de estaciones utilizando un sistema receptor portátil de localización por satélite de tipo GPS (Global Position System). El GPS provee la posición tridimensional de un punto, con una aproximación de hasta 1 metro con respecto a una estación base.

Los sondeos eléctricos y/o electromagnéticos deben realizarse a lo largo de las mismas líneas en las que se efectúe la gravimetría y magnetometría, aún cuando la densidad de las estaciones sea distinta. Las mediciones eléctricas y/o electromagnéticas proveen estimaciones de la conductividad eléctrica promedio de las rocas dentro de un volumen grande debajo de la estación.

La conductividad eléctrica de las rocas depende principalmente del fluido contenido en los poros, y se incrementa considerablemente con la salinidad del fluido y con la temperatura. Por esta razón, muchas áreas con recursos geotérmicos poseen claras y grandes zonas de alta conductividad. Sin embargo, una conductividad alta no siempre es indicativa de condiciones de alta temperatura, ya que puede haber altas conductividades a poca profundidad debido a la presencia de arcilla esmectita y zeolitas, minerales que se forman como resultado de la diagénesis y la precipitación hidrotérmica a temperaturas menores de 150 °C, o a la presencia de depósitos lacustres de arcilla con alta salinidad, que dan lugar a indicaciones erróneas de las condiciones térmicas del subsuelo.

Los sondeos eléctricos profundos se realizan con mayor frecuencia mediante la técnica Schlumberger de resistividad con corriente directa (cd), utilizando separaciones de electrodos de corriente lo suficientemente grandes para proveer profundidades de investigación hasta dos km. Ya que esto exige la utilización de cables largos y pesados, los sondeos eléctricos verticales (SEV) de resistividad no son muy adecuados para operaciones en terrenos muy inclinados, irregulares, con vegetación espesa o con pocos caminos de acceso.

Para lograr una gran profundidad de exploración sin usar un transmisor y sin los problemas logísticos de los SEV, los sondeos magnetoteléuticos (MT) se han convertido en un método frecuentemente utilizado, sobre todo a partir del desarrollo de equipos portátiles de relativamente poco peso.

Los sondeos MT utilizan los campos electromagnéticos naturales y requieren de la medición de dos componentes horizontales del campo eléctrico, además de tres componentes ortogonales del campo magnético. Para obtener estimaciones estadísticas confiables de la impedancia de la tierra, los datos deben abarcar un espectro amplio de frecuencias, por ejemplo de cuatro ciclos logarítmicos (0.005 a 100 Hz), y deben registrarse de manera continua durante 6 a 8 horas en cada estación.

Algunos investigadores modernos utilizan la técnica de referencia remota, en la cual se efectúan también mediciones en una estación secundaria o de referencia cercana, para ayudar a eliminar ruidos instrumentales o culturales.

El número y la densidad de las estaciones de SEV o MT, puede variar dependiendo del tamaño y la geología de cada área de investigación. En la etapa de prefactibilidad pueden requerirse de 40 a 100 estaciones, para las cuales se deberán considerar dos patrones de distribución en el área; el primero, correspondiente a un levantamiento regional de semidetalle, incluirá alrededor de la mitad de las estaciones y se ubicarán empleando grandes separaciones entre ellas (de 2 a 10 Km) a fin de tener una cobertura total del área. El segundo, considerará el resto de las estaciones para detallar la(s) zona(s) de interés de acuerdo con los resultados del primero. Lo ideal sería tener para la(s) zona(s) de detalle una densidad mínima de un sondeo por kilómetro cuadrado. El número de sondeos que generalmente se efectúan por día, es de 1 SEV ó 2 MT en promedio.

Por lo general una prospección con el método MT exige la contratación de compañías extranjeras, ya que no existe este tipo de equipos en la mayoría de los países de América Latina y del Caribe.

Otra técnica que se utiliza en la investigación geotérmica es el método Audio-Magnetoteléurico de Fuente Controlada (CSAMT). Siendo similar al MT en muchos sentidos, el CSAMT utiliza los campos artificiales creados por un dipolo eléctrico muy largo y a gran distancia del punto de medición, el cual se energiza mediante un transmisor de corriente alterna (ca), con frecuencias de 10 Hz a 20 kHz, de ahí la denominación de frecuencia de audio. Los datos de CSAMT se procesan e interpretan de la misma forma que los datos MT, siempre y cuando el dipolo se encuentre a una distancia de entre 5 a 7 longitudes de onda, ya que de esta manera el campo principal se aproxima a una onda plana. Si la fuente está demasiado cerca, el efecto es similar al de una fuente 3-D interactuando en un medio geológico tridimensional, el cual aportará datos que virtualmente son imposibles de interpretar.

Dado que el CSAMT opera a frecuencias más altas que el MT, el tiempo de obtención de los datos es más corto, pero la profundidad de exploración es menor. Por ejemplo, la profundidad de efecto pelicular (Skin) de una onda EM de 100 Hz en el ambiente cerca a la superficie es de sólo 200 a 500 m. Esta limitación de profundidad tiene que

evaluarse en función de las consideraciones geológicas, objetivos y costos.

Atendiendo factores económicos y aspectos logísticos, para un mapeo eléctrico regional superficial podría ser conveniente el uso de la técnica de sondeos con el Electromagnético de Transitorios en el Dominio del Tiempo (TEM), cuyos resultados son similares a los logrados con sondeos eléctricos verticales, pero a un costo menor según experiencias en U.S.A. Estos sondeos podrían programarse para alcanzar profundidades de 1000 a 1500 metros, con un espaciamiento entre sondeos del orden de 1000 a 1500 metros. Definida la distribución espacial regional de las resistividades a tales profundidades, se podría estudiar el comportamiento eléctrico del subsuelo a mayor profundidad, mediante una campaña de sondeos MT.

A diferencia de las técnicas eléctricas y electromagnéticas (E/EM) que son sensibles a la conductividad subsuperficial, el método de auto-potencial (SP) es con frecuencia útil para obtener información sobre las condiciones del flujo de fluidos. En el SP, el potencial eléctrico natural del terreno se mide en relación a una estación de referencia.

Aunque existen varias causas de las anomalías de SP, la principal se debe al gradiente de potencial electrocinético relacionado con el flujo de fluidos; esto es, el que se origina cuando las aguas subterráneas ionizadas fluyen a través de superficies minerales cargadas eléctricamente.

Tanto las aguas frías como las termales contienen suficientes componentes iónicos capaces de producir dichas anomalías SP. Pueden existir flujos de agua fría en áreas de alta precipitación pluvial y relieve escarpado, sin embargo, teóricamente es posible diferenciar entre el agua subterránea fría que desciende a través de acuíferos de poca profundidad y las aguas termales con corrientes de ascenso, con base en las anomalías de SP. Por lo tanto, el SP puede ser de particular utilidad para ubicar conductos ocultos de flujos térmicos ascendentes, distantes de las áreas donde es obvia la alteración superficial y/o la descarga.

Aunque las anomalías de SP son difíciles de interpretar de forma cuantitativa, esta limitación se ve contrarrestada por el bajo costo y la sencillez del método, además que pueden ser realizadas simultáneamente con los levantamientos magnetométricos terrestres.

Existen experiencias del uso de la sísmica de refracción y reflexión (México, Japón, U.S.A., etc.) en la adquisición de datos, especialmente estructurales, en la investigación geotérmica. Su aplicación en terrenos sedimentarios (Cerro Prieto, México) ha sido de gran utilidad, sin embargo, en regiones volcánicas donde se localizan la mayor parte de los campos geotérmicos, los resultados no han sido muy convincentes debido principalmente a lo complejo de la geología del subsuelo.

La topografía irregular que generalmente presentan las áreas geotérmicas en regiones volcánicas, la escasa calidad de los resultados y el alto costo de la sísmica de refracción y de reflexión, hacen que estos métodos no sean de frecuente aplicación en la exploración geotérmica. Existen otros métodos, como los eléctricos, que sin tanto costo pueden proporcionar mayor información que la que comunmente se obtiene con ellos.

Dado que en algunas zonas geotérmicas se ha detectado cierta actividad microsísmica y ruido sísmico anormales, algunos investigadores han considerado conveniente utilizar estas técnicas para localizar zonas de interés geotérmico.

La técnica de la microsismicidad se basa en una hipótesis que considera que el movimiento de fluidos geotérmicos a través de fracturas y zonas de falla, provoca cierta actividad sísmica como consecuencia de la debilidad de la roca y su alteración termal. Por lo tanto, registrando los epicentros de tales sismos con una red de estaciones portátiles que registran la sísmicidad en varios sitios durante periodos cortos de 1 a 2 meses, se estima que es posible localizar zonas geotérmicas donde el fluido termal está en movimiento.

La técnica del ruido sísmico se basa en el alto nivel de ruido observado en algunos campos geotérmicos, con frecuencias de 0 a 10 Hz, el cual decrece conforme se incrementa la distancia a la fuente del mismo.

Puesto que tanto la microsismicidad como el ruido sísmico no siempre han dado buenos resultados en la exploración geotérmica, su aplicación en la etapa de prefactibilidad es poco recomendable.

Por otra parte, la investigación sísmica utilizando el retardo de los tiempos de propagación (geotomografía) de las ondas sísmicas generadas por terremotos locales o distantes que pasen por una zona geotérmica, no ha sido desarrollada aún al punto en el que pueda ser utilizada fácilmente como método de exploración.

En ocasiones podrá ser necesario y deseable un monitoreo de sísmica pasiva en varias estaciones, si existe alguna preocupación con respecto a fallas activas y peligros volcánicos. La identificación de epicentros localizados a lo largo de una o varias trazas de fallas, o en el subsuelo de estructuras volcánicas recientes, podrá proveer información valiosa en la investigación de la actividad sísmica de la zona y del riesgo volcánico en el área en estudio.

#### **Pozos de Gradiente de Temperatura**

Ya que el objetivo buscado en la exploración es térmico, uno de los indicadores geofísicos usados para determinar el potencial geotérmico son las mediciones del flujo de calor y/o del gradiente de temperatura.

En algunos casos ha sido posible definir áreas en las que se podría encontrar un yacimiento geotérmico, mediante mediciones efectuadas en una serie de pozos poco profundos, ampliamente espaciados unos de otros y, por lo general, de unos 40 m de profundidad o lo suficientemente profundos para evitar las correcciones en las lecturas por la onda térmica anual debida al calentamiento solar. Los pozos se terminan dejándoles una tubería de PVC de 50 o 60 mm de diámetro, llena de agua y tapada en ambos extremos. El espacio anular se rellena con material impermeable y después de permitir el reequilibrio del régimen térmico, se mide el perfil de temperatura utilizando una sonda de temperatura para pozo, como un electrodo de resistencia de platino. El gradiente normal en áreas no termales puede variar entre 25 y 35 °C/km, y en las áreas termales ser superior a 100 °C/km.

Para propósitos científicos el flujo de calor conductivo del terreno expresado en unidades de miliwatts por metro cuadrado ( $\text{mW/m}^2$ ), constituye un parámetro térmico de mayor interés que el gradiente de temperatura. El flujo de calor se obtiene multiplicando el gradiente vertical de temperatura por la conductividad térmica de la roca dentro de la porción lineal de la curva del perfil de temperatura. En áreas continentales no termales el flujo de calor terrestre es de alrededor de  $60 \text{ mW/m}^2$ , y en áreas termales el flujo puede ser varias veces mayor.

Ya que la conductividad térmica en el subsuelo depende del tipo de roca, de su porosidad y de la presión y composición de los fluidos que contiene, tal conductividad puede variar hasta el doble entre rocas no consolidadas y ciertos tipos de rocas ígneas cristalinas. Puesto que no es fácil medir la conductividad de las rocas en el terreno, se pueden determinar sus valores utilizando datos de un manual. Si se decide utilizar únicamente los gradientes de temperatura como parámetro de exploración, entonces deberá tenerse cuidado de no confundir las variaciones laterales en la conductividad térmica debido a cambios en la geología, con anomalías en el flujo de calor.

El tema sobre la perforación de estos pozos de gradiente se presenta con mayor detalle en la sección 5.5

#### 5.3.3.2.3 Interpretaciones y Correlaciones Geofísicas

En la investigación geotérmica los resultados geofísicos deben ser revisados a diario al avanzar el trabajo. Los datos deben ser graficados y verificados para prever cualquier posible error humano o falla de los instrumentos. En el caso de encontrarse algún dato dudoso se deberá repetir la lectura o si es necesario el sondeo. En el caso de los métodos que así lo requieran, diariamente se deberá realizar la lectura de una estación base para comprobar que no existen errores debidos al funcionamiento de los instrumentos, como por ejemplo los ocasionados por bajos voltajes en las baterías.

Conforme el trabajo vaya avanzando, será necesario realizar directamente en el campo la interpretación de los datos geofísicos

y su correlación preliminar con los datos geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos, para guiar de la mejor forma el levantamiento en proceso y ayudar a planificar los siguientes estudios.

Procediendo de esta forma, al irse conociendo los resultados de los estudios y mientras el equipo se encuentre en el campo, en caso de ser necesario se podrán añadir nuevas líneas geofísicas o estaciones de relleno, o modificarse parcial o totalmente el levantamiento inicialmente programado.

En el caso de la magnetometría terrestre, por ejemplo, los magnetómetros modernos son capaces de almacenar en memoria digital los valores de cada medición y la ubicación de la estación. Los valores de cada lectura pueden ser cargados en una computadora para ser corregidos por la deriva diurna, trazar el contorno magnético y llegar a una interpretación preliminar.

Los datos de la gravedad deberán ser corregidos por la deriva del instrumento y ser procesados para obtener un mapa de anomalías de Bouguer; estos datos tendrán sus valores referidos a un plano específico del terreno (por ejemplo el nivel del mar). Una interpretación tridimensional completa de los datos de gravedad, podría ser deseable durante el levantamiento pero esto significaría costos y tiempos considerables. Por esta razón, la mayoría de las interpretaciones preliminares se realizan mediante secciones en dos dimensiones escogidas, utilizando para ello los software disponibles que se han diseñado para ser corridos en computadoras de tipo personal (PC).

Los receptores modernos que se usan en los sondeos eléctricos verticales y magnetotelúricos, también tienen capacidad para almacenar y procesar datos de campo, de modo que las interpretaciones preliminares de la estratificación de la conductividad eléctrica, en el estricto sentido unidimensional, pueden realizarse en el mismo sitio del sondeo mediante una computadora portátil.

La interpretación inmediata de los sondeos eléctricos verticales y magnetotelúricos deberá ser de especial interés, no sólo por la importancia que tiene su correlación con el modelo geológico preliminar para definir con mayor seguridad la geología del subsuelo, sino por el sentido que puede dar a la exploración el identificar de inmediato una anomalía que se pueda correlacionar con un yacimiento geotérmico y de esta forma orientar de la mejor manera posible el resto de las exploraciones geofísicas.

#### 5.3.3.3 Resultados

Los estudios de geofísica deben dar como resultados un modelo geológico del sistema geotérmico elaborado con mayor detalle y la identificación, por medio de las anomalías, del posible yacimiento.

La información geofísica correlacionada con la geología, hidrogeología y geoquímica, deberá detallar y complementar el conocimiento sobre los aspectos estratigráficos, estructurales y vulcanológicos del área en exploración, y aportar detalles específicos sobre la existencia del yacimiento, su posible ubicación y extensión, las características de la cobertura y la posibilidades de recarga hidráulica del sistema geotérmico.

El estudio geofísico se integrará en un informe lo más completo posible, en el que se describan los trabajos realizados, se presenten los métodos aplicados, los resultados obtenidos, el procesamiento de los datos, las interpretaciones y las conclusiones de cada uno de ellos. El informe deberá estar acompañado de los datos de campo y las respectivas memorias de cálculo, así como con mapas, secciones y esquemas geofísicos que reflejen los resultados de las interpretaciones y su correlación con la geología.

El informe deberá presentar un mapa que integre los resultados de la geología y geofísica, señalando las áreas anómalas que podrían recomendarse para continuar en ellas exploraciones específicas con perforaciones de gradiente o de propósito múltiple, o directamente con perforaciones profundas.

#### **5.3.3.4 Infraestructura Requerida**

##### **5.3.3.4.1 Recursos Humanos**

Independientemente que los trabajos geofísicos se realicen por administración directa o por contrato, es conveniente que el grupo técnico de la institución responsable del estudio de prefactibilidad, esté integrado por un coordinador geofísico con más de 5 años de experiencia en métodos eléctricos o electromagnéticos en la exploración geotérmica, encargado de la planificación, dirección y supervisión de los trabajos, y un geofísico auxiliar con experiencia de más de dos años en gravimetría, magnetometría y modelaje numérico,

En caso de que los estudios geofísicos sean por administración, se requerirá, además del personal mencionado en el párrafo anterior, de diversos asistentes para los levantamientos y su número variará en función de las técnicas de campo utilizadas y de las condiciones del terreno. Por ejemplo, en el caso de utilizarse el método Schlumberger en la ejecución de sondeos eléctricos verticales, el personal de apoyo se incrementará considerablemente pudiendo llegar a requerirse alrededor de 30 personas cuando el espaciado eléctrico sea grande ( $AB/2 = 4$  a  $5$  km).

##### **5.3.3.4.2 Recursos Físicos**

Los recursos físicos necesarios para llevar a cabo las actividades geofísicas dependerán de la cantidad de trabajo y si éste se realiza

por administración directa o se da a contrato. Si se efectúa mediante contrato sólo se requerirá de un vehículo para la supervisión. De llevarse a cabo los trabajos por administración, se requerirá contar al menos con un magnetómetro de campo total, un gravímetro, un receptor de SP; un receptor posicionador GSP, un sistema E/EM de bajo costo con dos pares de radioreceptores portátiles, cables y el soporte informático necesario para los procesos geofísicos.

También será conveniente disponer de equipos de topografía, altímetros de precisión, medidor de susceptibilidad magnética, vehículos de doble tracción, etc. para los trabajos de campo. En el caso de pretender adquirir los artículos de geofísica arriba indicados, cabe mencionar que su costo no debe ser superior a US\$ 200.000 dólares. Desde luego esta cantidad podrá reducirse significativamente en el caso de existir en disponibilidad equipos para los levantamientos eléctricos o magnetotéluricos.

El costo de los estudios considerando la ejecución de levantamientos eléctricos, magnetotéluricos, gravimétricos y magnetométricos con suficiente cobertura para definir las posibilidades geotérmicas de un área, se estima que debe ser del orden de los US \$ 400.000 a US \$ 500.000 dólares. Cabe mencionar que el mayor costo corresponde a los trabajos de campo, ya que el costo del procesado e interpretación de los datos generalmente varía entre el 30% y el 50% del total.

El tiempo de realización de los estudios geofísicos en la etapa de prefactibilidad, dependerá del área por prospectar, las condiciones de trabajo y los métodos por aplicar; sin embargo, considerando una investigación normal utilizando los métodos mencionados en el párrafo anterior, dicha investigación podría fluctuar entre los 8 y 10 meses.

La siguiente información es un ejemplo de los costos, en U.S. dólares, de algunos métodos geofísicos asignados a contrato, que incluyen movilización, recolección de datos e interpretación preliminar.

METODO	ESPECIFICACION	TOTAL
Aereomagnético	5,000 km lineales a \$30/km	\$ 150,000
Infrarojo	600 km lineales a \$20/km	\$ 12,000
Sondeos Electromagnéticos (MT)	60 sondeos a \$3000/sondeo	\$ 180,000
Sondeos Eléctricos Verticales	60 sondeos a \$ 1000/sondeo	\$ 60,000
Sísmica Pasiva	Dos meses monitoreo \$50,000/mes	\$ 100,000

### **5.3.4 Hidrogeología**

#### **5.3.4.1 Objetivos**

Este estudio está orientado a definir el modelo hidrogeológico del sistema geotérmico y, de ser posible, a estimar la recarga natural que podría recibir el sistema, mediante un cálculo del balance hídrico de la cuenca o cuencas incidentes en el mismo.

Puesto que generalmente en las áreas donde se realizan los estudios de prefactibilidad no siempre existe la información básica ni la infraestructura necesaria para el cálculo de un balance hídrico, el estudio, además de precisar las condiciones hidrológicas de las formaciones en el subsuelo, tendrá como objetivo preparar la infraestructura necesaria para desarrollar las mediciones que lleven a determinar los parámetros que intervienen en el cálculo de dicho balance en el área en exploración.

La etapa previa de reconocimiento habrá puesto de manifiesto las características hidrogeológicas generales del área a investigar en la presente etapa, de tal manera que la información que se disponga permitirá planificar con mayor criterio el alcance de los estudios a realizar.

#### **5.3.4.2 Alcances y Actividades**

La ejecución de un estudio hidrogeológico aplicado a la geotermia no difiere en los aspectos generales de la metodología tradicional aplicada a la investigación de los recursos hídricos. Si existe una variante, ésta únicamente se refiere al hecho de que la geotermia investiga los acuíferos termales tanto libres como confinados.

Bajo este principio, el estudio deberá dirigirse a desarrollar el inventario de fuentes y pozos de agua, preparar el mapa hidrogeológico, caracterizar los acuíferos, establecer dentro de lo posible la cuenca hidrogeológica subterránea del sistema geotérmico, elaborar el modelo preliminar hidrogeológico y, de ser factible, cuantificar la precipitación, la escurriencia, la infiltración, la evapotranspiración, elaborar el balance hídrico preliminar del área y estimar la recarga hídrica profunda del sistema geotérmico.

Con los datos aportados por las eventuales estaciones hidrométricas preexistentes, se planificará la instalación de una red hidrometeorológica que satisfaga las necesidades mínimas del estudio y se preparará una red hidrométrica que en una etapa de factibilidad cumpla con las exigencias del caso.

Los estudios se realizarán en forma coordinada con las investigaciones geológicas, geofísicas, geoquímicas e isotópicas, y comprenderán esencialmente las siguientes actividades.

#### 5.3.4.2.1 Trabajo de Gabinete

Tomando en cuenta la información preparada en la etapa de reconocimiento, las actividades de gabinete consistirán en la:

- Evaluación y síntesis de la información preexistente, tanto geológica como hidrogeológica, hidrológica, meteorológica y de pozos, con el fin de preparar el programa hidrogeológico a desarrollar.
- Delimitación preliminar de la cuenca hidrogeológica del área de estudio, con base a la geología, morfología, hidrología, hidrogeoquímica, etc.
- Elaboración de mapas hidrogeológicos e hidrológicos con base a la información existente.
- Análisis del sistema de fracturamiento e identificación de posibles áreas de recarga hídrica del subsuelo, con base a la información tectónica-estructural y estratigráfica existente y al análisis fotogeológico.
- Planificación del establecimiento de una red básica hidrométrica y meteorológica en el área del proyecto.

#### 5.3.4.2.2 Trabajo de Campo

Esta fase de la hidrogeología comprenderá la:

- Comprobación y optimización del mapa hidrogeológico.
- Determinación de la secuencia litoestratigráfica en el área y de las características hidrogeológicas de las unidades, incluyendo la toma de especímenes de roca para realizar determinaciones de la porosidad y permeabilidad.
- Comprobación y delimitación preliminar de la cuenca hidrogeológica incidente en el área de estudio.
- Estudio de los sistemas de fracturas y fallas identificados mediante la fotointerpretación, con el fin de determinar las zonas con más alta probabilidad de permeabilidad a profundidad.
- Elaboración del inventario de las fuentes y pozos de agua, interaccionando con las investigaciones hidrogeoquímicas. Los datos de las fuentes y pozos de agua deberán contener: localización, caudal, naturaleza y origen, temperatura, pH, características hidrogeológicas, muestreo, etc. El caudal, de ser posible, deberá ser medido mediante aforo con molinete o aforo volumétrico, según sea el caso.

- Recabación de información hidrogeológica aportada por los pozos existentes, consistente en: características hidrogeológicas de las formaciones interceptadas, niveles hidrostáticos, zonas de fracturamiento, identificación de las diferentes formaciones acuíferas, temperaturas de los acuíferos, muestreo, porosidad y permeabilidad de las formaciones, etc.
- Establecimiento de una red de monitoreo hídrico para control de la evolución de los acuíferos.
- Estudio hidrológico mediante isótopos ambientales tales como  $^{18}\text{O}$ , deuterio y tritio contenidos en el agua meteórica, fuentes y pozos.
- Implementación de una red mínima hidrométrica y meteorológica en el área de estudio, con la construcción de estaciones meteorológicas, construcción de estaciones limnográficas en los cauces principales (5-10 estaciones) y colocación de vertederos y reglas para medir el escurrimiento de agua en puntos estratégicos.
- Obtención de información meteorológica para el cálculo tentativo de los parámetros que intervienen en el balance hídrico.

#### 5.3.4.2.3 Trabajo de Laboratorio

Las actividades de laboratorio consistirán en:

- Análisis químicos de las fuentes y pozos de agua inventariados. Puesto que tales sitios generalmente son los mismos del estudio hidrogeoquímico, los análisis serán útiles para ambas investigaciones. Únicamente se practicarán análisis químicos adicionales a las muestras de agua proveniente de las fuentes y pozos no muestreados durante la prospección geoquímica.
- Determinaciones de propiedades físicas (porosidad y permeabilidad) en especímenes de rocas de las formaciones aflorantes que pudiesen ser acuíferos.
- Determinaciones de porosidad y permeabilidad en muestras de rocas provenientes de núcleos de perforación de los pozos exploratorios someros o de propósito múltiple que se realicen.
- Análisis isotópicos.

Estos análisis podrán ser ejecutados localmente cuando se cuente con la existencia de un laboratorio especializado; en caso contrario tales determinaciones se realizarán en laboratorios fuera del país.

#### 5.3.4.2.4 Procesado de la Información

Esta actividad tiene como objetivo evaluar la información existente de la red hidrológica regional y la recabada en el área de estudio, y con esta información tratar de realizar el balance hidrológico del área mediante la cuantificación de los siguientes parámetros:

- Precipitación, con base a los datos de la red pluviométrica.
- Escorrentía, con base a los datos de la red hidrométrica y los aforos realizados en forma periódica.
- Infiltración, tomando en cuenta la precipitación - (la escorrentía + evapotranspiración).

Con estos datos se podrá determinar la retención de agua en el subsuelo y mediante los análisis fisico-químicos su calidad.

La confiabilidad de la información sobre el ciclo hidrológico en el área de estudio, dependerá de la representatividad de los datos sobre las condiciones reales del área y del número de años de observación que tenga la red hidrológica. Tomando en cuenta esto, será fundamental continuar con las observaciones hidrometeorológicas en las siguientes etapas de factibilidad, desarrollo y explotación geotérmicos.

Mediante el balance hidrogeológico de la cuenca incidente en el área, se cuantificará en forma preliminar la recarga subterránea. Con la información geocientífica existente y la información obtenida en el estudio de campo y laboratorio, se elaborará el mapa hidrogeológico del área que, mediante el análisis de las condiciones estructurales y tectónicas, permitirá inferir el sistema de circulación de fluido de recarga a los acuíferos profundos y la posible alimentación hídrica al eventual yacimiento geotérmico.

#### 5.3.4.2.5 Interpretación

La correlación de la información de campo y de laboratorio llevará a una serie de interpretaciones, cuyo objetivo principal será el llegar a definir las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del área en estudio.

Mediante el análisis de los datos de la geología y su correlación con el estudio del ciclo hidrológico, el estudio isotópico y el cálculo del balance hidrológico, se podrá elaborar el modelo hidrogeológico preliminar de circulación hídrica en el subsuelo.

La correlación de la información aportada por el estudio hidrogeológico con el resultado del análisis de los xenolitos hidrotermalizados, permitirá determinar, a priori, algunas características hídricas del eventual yacimiento geotérmico y su cobertura.

Con el estudio estructural y litoestratigráfico se definirá en forma preliminar la cuenca hidrogeológica incidente en la zona geotérmica y se identificarán las zonas de infiltración profunda que podrían permitir la recarga del sistema geotérmico.

#### 5.3.4.3 Resultados

Los resultados del estudio estarán dados por la definición de diversos parámetros que llevarán a un mayor conocimiento de las posibilidades geotérmicas del área en estudio. Tal definición se relaciona con la:

- Identificación de las principales unidades hidrogeológicas y del control estratigráfico y estructural de circulación hídrica en el subsuelo.
- Identificación de las unidades permeables e impermeables, especialmente aquellas que tienen relación con el posible yacimiento geotérmico y su cobertura.
- Identificación de los acuíferos someros y profundos.
- Identificación de las zonas de recarga hídrica a los diferentes acuíferos.
- Conocimiento de la climatología y estimación preliminar del balance hidrológico.
- Estimación de la posible recarga hídrica del sistema geotérmico.
- Elaboración de un modelo hidrogeológico.

Toda esta información tendrá que presentarse en un informe final, cuyo contenido se describe a continuación.

##### 5.3.4.3.1 Informes

**Informe Hidrogeológico Final.**- Este informe contendrá una descripción completa de las investigaciones realizadas, sus resultados y sus correlaciones, así como también el resultado de las correlaciones con otras disciplinas geocientíficas que hayan intervenido en el estudio de prefactibilidad.

El informe describirá las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del campo. Contendrá todos los criterios técnicos y el soporte científico de los objetivos definidos. Será complementado con todo el cálculo matemático requerido para establecer el balance hidrogeológico del área e incluirá los mapas hidrogeológicos, hidrológicos y el tectónico-estructural. Los mapas deberán estar elaborados a diferentes escalas, preferentemente a las mismas que tengan los planos de geología, tales como: 1:100,000, 1:50,000 y

1:25,000. Presentará además un mapa del inventario hidrológico. Se presentará en forma esquematizada el sistema conceptual de la circulación hídrica profunda. Los datos meteorológicos serán aportados igualmente en forma gráfica.

**Síntesis Hidrogeológica.** - Con el fin de ser integrado al informe final del estudio de prefactibilidad, del reporte final hidrogeológico se sustraerán los aspectos fundamentales de la investigación realizada, presentando los resultados obtenidos técnicamente sustentados e ilustrados con toda la información gráfica pertinente. Se incorporarán además las correlaciones con las otras disciplinas participantes en el estudio.

**Informe de Avance.** - Durante el proceso del estudio hidrogeológico es común preparar un informe de avance, en él se describe en forma porcentual el avance de las actividades con base a lo programado; su presentación puede ser en forma mensual, bimensual o trimestral.

**Informe Técnico de Avance.** - Adicionalmente al informe mencionado en el párrafo anterior, se elaborará al final de cada actividad tanto de gabinete como de campo y laboratorio, un informe técnico de avance. En él se incluirán los aspectos técnicos que se obtengan con el progreso de las investigaciones, con recomendaciones de los cambios que sea pertinente realizar al programa de actividades.

#### 5.3.4.3.2 Programa Hidrogeológico para la Etapa de Prefactibilidad

De resultar positivo el estudio de prefactibilidad, se elaborará un programa de estudios hidrogeológicos complementario para las etapas subsiguientes de factibilidad y desarrollo, con el objeto de ampliar el conocimiento hidrogeológico del proyecto, optimizar el modelo hidrogeológico y programar adecuadamente la posible explotación del yacimiento. Entre otras, este programa deberá contener las siguientes actividades:

- Programa de monitoreo hidrogeológico de los cursos de agua, fuentes y pozos.
- Programa de estudios de detalle de la hidrogeología isotópica del posible campo geotérmico.
- Estudio del movimiento de fluidos mediante el uso de trazadores isotópicos y químicos.
- Programa de adecuación de la red hidrometeorológica.
- Evaluación de los recursos humanos y físicos y estimación del costo total de las actividades programadas.
- Diagramas CPM y GANT para el seguimiento de dicho programa.

#### 5.3.4.4 Recursos Humanos, Tiempo y Costos

Los estudios hidrogeológicos de prefactibilidad requieren de personal experimentado, ya que durante esta etapa se establecerán lineamientos estratégicos para la explotación racional del recurso. Es recomendable que este estudio sea planificado en forma definitiva, estimando que continúe durante las siguientes etapas del proyecto.

La evaluación de la documentación recolectada deberá ser realizada por personal calificado y experimentado en hidrogeología aplicada a la geotermia; el personal responsable de este trabajo deberá ser un hidrogeólogo con el apoyo técnico suficiente. En términos generales para desarrollar la hidrogeología de una zona geotérmica se requerirá del siguiente personal técnico:

- 1 Hidrogeólogo
- 1 Auxiliar o técnico hidrogeólogo

El tiempo estimado para la realización de los estudios puede variar de acuerdo con el nivel de los estudios precedentes y el tamaño del área a cubrir con trabajo de campo. Si bien la información necesaria para el estudio debe abarcar al menos un ciclo hidrológico, las actividades del hidrogeólogo y las del personal responsable de la recolección de los datos de campo, no necesariamente tienen que ser continuas. Tomando en cuenta esto, se estima que el trabajo de hidrogeología se puede realizar durante 4 a 6 meses de trabajo efectivo en un periodo de 12 meses.

El costo del estudio considerando lo antes expuesto, se estima podría fluctuar entre un mínimo de US \$ 20.000 y un máximo de US \$ 60.000 dólares.

#### 5.4 Integración Geocientífica Preliminar

En el proceso de optimización del modelo del sistema geotérmico bajo estudio, cada disciplina habrá provisto evidencias directas sobre algunos de sus rasgos principales, y evidencias indirectas sobre otros, que seguramente habrán enriquecido el modelo. Sin embargo, para obtener el máximo provecho de tal información, será necesario llevar a cabo una integración geocientífica preliminar en la cual, además de revisar las implicaciones de los resultados de cada disciplina, se haga un análisis crítico y detallado de sus concordancias y aparentes incongruencias. Es conveniente, aunque no indispensable, que este análisis sea hecho por un grupo colegiado integrado por los responsables de cada estudio.

La integración e interpretación conjunta de la información geológica, hidrogeológica, geoquímica y geofísica, deberá concluir con la elaboración de un informe técnico en el que se presente una síntesis de los estudios realizados, sus resultados, el modelo del sistema geotérmico y una evaluación de las posibilidades geotérmicas del área

en estudio. El informe deberá ser determinante respecto a la posible existencia del yacimiento geotérmico y los riesgos naturales a los que esté expuesto el proyecto.

En el caso de ser ampliamente positiva la evidencia del posible yacimiento, el informe deberá incluir una estimación del posible potencial energético y un documento de proyecto para el desarrollo de la siguiente etapa de factibilidad. Dicho documento de proyecto deberá mostrar la ubicación de 3 a 6 pozos profundos de exploración, con indicaciones sobre los objetivos por alcanzar, la columna litológica por atravesar, el muestreo de rocas y fluidos por realizar, los registros de temperatura, presión, eléctricos, etc. que correr y la profundidad total prevista para cada pozo. A tal información se tendrán que adicionar algunas consideraciones respecto al medio ambiente, orientadas al estudio, prevención y mitigación del impacto ambiental.

En el caso que la integración geocientífica no permita definir las posibilidades del proyecto y resulte conveniente continuar el estudio de prefactibilidad con la ejecución de un programa de perforaciones de pozos de gradiente o de propósito múltiple, el informe deberá presentar con toda claridad la ubicación, profundidad y objetivos de dichas exploraciones y, por supuesto, las consideraciones relativas al medio ambiente. Al término de estas exploraciones, la integración de la información geocientífica con el resultado de las investigaciones del subsuelo, deberá dar lugar a una revisión, reinterpretación y ampliación del informe final preparado previamente con base a los resultados de los estudios geocientíficos.

#### **Desarrollo del Modelo Conceptual Preliminar**

Siendo el objetivo de la etapa de prefactibilidad la definición de un posible yacimiento geotérmico en el subsuelo y, de ser esto positivo, la localización de pozos exploratorios que lleven a la identificación y evaluación del recurso, la información que se obtenga durante la investigación geocientífica deberá ser integrada en un modelo conceptual preliminar del área, como soporte a tales objetivos.

Un yacimiento geotérmico representa la ocurrencia conjunta de diferentes elementos geológicos. Algunos de éstos comúnmente son parte de la constitución geológica de una región dada, y otros son anómalos. La naturaleza y combinación de estos elementos han sido investigados en las etapas de reconocimiento y ahora en la de prefactibilidad, utilizando métodos directos e indirectos de carácter geológico, geofísico y geoquímico.

Una vez que todos los datos geocientíficos hayan sido colectados e interpretados independientemente, por lo menos en forma preliminar, los resultados tendrán que ser analizados y discutidos conjuntamente por un equipo de geólogos, geoquímicos, geofísicos e hidrogeólogos responsables de los trabajos. En este punto se desarrollará un modelo

conceptual del sistema geotérmico, el cual tendrá que ser congruente con todos los datos.

El modelo conceptual preliminar tratará de describir los aspectos relevantes que determinan la existencia del sistema geotérmico, en particular aquellos que son útiles para la evaluación técnica del posible yacimiento. Tales aspectos son:

- El origen, extensión y profundidad de la fuente de calor.
- La posición, profundidad, extensión y temperatura del yacimiento.
- La litología y permeabilidad de la formación o unidad geológica en la que se podría encontrar el yacimiento.
- Los caminos de alimentación del fluido termal al posible yacimiento.
- Las características de los límites del yacimiento, entre ellas las de la cobertura o sello y las del basamento relativo.
- El modelo de circulación hidrica en el subsuelo y las posibilidades de recarga del yacimiento.

De ser positivos los resultados de los estudios geocientíficos, especialmente en lo que se refiere a la existencia del yacimiento, el modelo será la base para conducir exploraciones de factibilidad mediante perforaciones exploratorias, cuyo objetivo será comprobar las condiciones geológicas y térmicas del subsuelo representadas en el modelo, más que las simples anomalías de carácter geofísico o geoquímico.

### 5.5 Perforación Exploratoria de Diámetro Reducido

En la fase final del estudio de prefactibilidad, antes de la perforación exploratoria profunda de factibilidad, en algunos casos será aconsejable la ejecución de pozos someros de gradiente para ampliar la información del subsuelo y disminuir el riesgo económico de una perforación profunda. La ejecución de pozos de gradiente es un método directo de exploración, el cual mediante mediciones del gradiente térmico y la conductividad térmica de las rocas, correlacionadas con la información proporcionada por los estudios de geología y geofísica, puede proporcionar información adicional que ratifique, refuerce o rectifique la hipótesis de la presencia de una anomalía geotérmica de importancia en el subsuelo.

En otros casos, para obtener información que permita confirmar o modificar el modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, se podrá tomar la decisión de perforar pozos exploratorios de diámetro reducido de propósito múltiple, que tienen la ventaja de determinar las condiciones reales del subsuelo a mayor profundidad que la de

los pozos de gradiente. La secuencia litológica, algunos aspectos estructurales y ciertos parámetros físicos del subsuelo inferidos preliminarmente con los estudios de superficie, podrán ser confirmados o modificados de acuerdo a los resultados de los pozos de propósito múltiple. Entre más profundas sean estas perforaciones (500 a 1500 m) existirá la posibilidad de definir la composición de las rocas de la capa sello y, en su caso, las del yacimiento geotérmico, sus temperaturas y las posibilidades de producción.

#### 5.5.1 Pozos de Gradiente

##### 5.5.1.1 Objetivo

En términos generales el objetivo de estos pozos es el de definir en tres dimensiones las variaciones de temperatura en la parte superior de una anomalía termal, con el propósito de coadyuvar a determinar la posible existencia de un yacimiento y delinear la zonas más someras del mismo.

Los datos adquiridos durante la perforación de pozos de gradiente, además de permitir el cálculo del flujo de calor, deberán ayudar a complementar, evaluar y detallar los estudios geocientíficos realizados durante la primera fase de la exploración de prefactibilidad, de tal manera que con los nuevos conocimientos se pueda precisar la importancia geotérmica de la zona.

El resultado de los pozos de gradiente en algunos casos podría ayudar a determinar la ubicación, profundidad y número de pozos exploratorios profundos que tendrán que perforarse en la etapa de factibilidad, para definir el potencial y las características de producción del yacimiento geotérmico.

##### 5.5.1.2 Alcances y Actividades

Los sistemas hidrotermales, debido a la conductividad térmica de las rocas y a procesos convectivos, en ocasiones dan lugar a elevadas anomalías de flujo de calor cerca de la superficie terrestre, que llegan a alcanzar valores desde los 300  $\text{mw/m}^2$  hasta algunos  $\text{watts/m}^2$  térmicos.

Normalmente los flujos de calor mayores de 160  $\text{mw/m}^2$  suelen presentar componentes convectivos, que aumentan la importancia de las anomalías conforme el flujo es mayor en fallas, fracturas y algunos estratos con mayor permeabilidad, configurando de esta manera áreas anómalas de centenas de miles de metros cuadrados en las zonas geotérmicas. Dependiendo del tamaño del área afectada por el flujo de calor, la descarga total puede ser de algunos MW térmicos hasta cientos de ellos, sobre todo cuando esta descarga se presenta en varias zonas de hidrotermalismo.

Los pozos de gradiente cuando penetran la formación impermeable que sobreyace al yacimiento geotérmico permiten determinar las variaciones de temperatura en la parte superior del mismo, y mediante la extrapolación de las temperaturas registradas y el cálculo del flujo térmico es factible estimar la temperatura a profundidad y el posible potencial energético del área en estudio. Tomando en cuenta esto, la perforación de estos pozos se ha convertido en una herramienta adicional en la exploración geotérmica. La profundidad de estos pozos varía normalmente entre 50 m y poco más de 100 m, dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas inferidas para el subsuelo, así como de las temperaturas que se deseen registrar.

Cerca de la superficie terrestre existen los efectos de la radiación solar, topografía, precipitación pluvial y movimientos de aguas superficiales, que distorsionan las mediciones de temperatura en el subsuelo. Debido a lo anterior, resulta poco recomendable hacer exploración de flujo de calor en pozos con profundidades menores de 40 m. Generalmente se recomienda que las profundidades mínimas de los pozos sean mayores de tal cifra, tratando de alcanzar de ser posible las rocas impermeables que sobreyacen al yacimiento geotérmico y obtener información confiable sobre su existencia en el subsuelo, especialmente en regiones donde se presenta una gran diversidad de rocas cerca de la superficie y el hidrotermalismo no es tan importante como para arriesgar la perforación de un pozo profundo sin tener más evidencias de la existencia del yacimiento.

La localización de los pozos no tendrá necesariamente en cuenta la distribución de las manifestaciones termales, puesto que éstas no siempre están directamente relacionadas con el área de la máxima anomalía térmica en el subsuelo. A priori, en este documento es imposible esquematizar la profundidad y distanciamiento óptimo entre los pozos de gradiente, debido a que las situaciones y los casos posibles son numerosos.

El diámetro de la perforación en estos casos siempre será menor que el de un pozo exploratorio profundo. La propia dimensión del área de interés en la cual se realice este tipo de perforaciones, dependerá del resultado de las investigaciones geológicas, vulcanológicas, geofísicas, geoquímicas e hidrogeológicas. El área puede ser de dimensiones variables, oscilando entre 10 y 100 km<sup>2</sup>.

La perforación de pozos de gradiente generalmente se realiza con equipo rotatorio y a veces se emplea un equipo con el sistema wireline de muestreo de núcleos. El sistema permite recuperar núcleos continuos de la roca, mediante el uso de un barril muestreador especial y de una barrena de diamantes.

Durante la perforación de los pozos de gradiente y al finalizar éstos, será necesario registrar las temperaturas a diferentes profundidades tratando de que éstas sean representativas de las temperaturas reales en el subsuelo para cada profundidad. Al terminar la perforación del agujero, el pozo deberá ser entubado con tubería PVC o galvanizada,

rellenando el espacio anular con un material impermeable (arcilla o cemento) para evitar el movimiento de fluidos. Las temperaturas se toman por el interior del pozo a dos o tres niveles situados a profundidades donde se encuentra la formación impermeable.

Algunos investigadores sugieren no entubar el pozo e introducir sensores de temperatura a diferentes profundidades y rellenar el pozo con material impermeable; las mediciones de temperatura se realizan mediante cables que desde la superficie se conectan con los sensores.

El registro de la temperatura se lleva a cabo varias veces al día desde el momento en que se instala el sistema hasta que las temperaturas se estabilizan en el pozo, situación que se puede presentar en el lapso de 8 a 15 días, aproximadamente.

Durante la ejecución de las primeras perforaciones de gradiente térmico, será necesario correlacionar los estudios superficiales con los datos que aporten los pozos, para actualizar la interpretación de la geología de subsuelo y ratificar o cambiar oportunamente la localización, profundidad y los objetivos de las nuevas perforaciones de gradiente.

Después de la perforación de los pozos será necesario correlacionar los resultados con los datos obtenidos en los estudios previos, para:

- Definir la estratigrafía en cada una de las perforaciones mediante el estudio petrográfico de los recortes de la barrena y de los núcleos cortados.
- Medir en el laboratorio la conductividad térmica y otras propiedades petrofísicas de las muestras colectadas.
- Correlacionar la geología del subsuelo con la superficial.
- Determinar los valores del gradiente de temperatura y flujo de calor y representarlos en mapas.
- Determinar el nivel freático o los niveles estáticos en los pozos y compararlos con los del modelo hidrológico.
- Correlacionar los mapas de gradiente de temperatura y flujo de calor con las anomalías de resistividad.
- Definir la profundidad y la composición de las rocas que constituyen las capas que sobreyacen al yacimiento.
- Determinar la extensión de la anomalía térmica.
- Estimar las temperaturas a la profundidad estimada del yacimiento.

### **5.5.1.3 Resultados**

Los resultados de los pozos de gradiente se circunscribirán esencialmente a la elaboración de las columnas litológicas de los pozos, perfiles de temperaturas estabilizadas, mapas de isogradientes de temperatura y mapas de flujo térmico. La correlación de esta información con la interpretada del subsuelo por medio de los levantamientos geológicos y la geofísica, deberá ampliar el conocimiento de las condiciones térmicas del subsuelo a las profundidades de las perforaciones y a estimar las posibles temperaturas a mayores profundidades, especialmente a los niveles inferidos para el yacimiento geotérmico.

Es conveniente mencionar que la perforación de estos pozos sólo es un recurso más en la investigación de las características del subsuelo en un área de interés geotérmico, y sus resultados de ninguna manera deberán ser determinantes en la definición de las posibilidades energéticas del área, sobre todo cuando no llegan a penetrar el yacimiento. La confiabilidad de las estimaciones de las temperaturas a mayores profundidades que las alcanzadas por los pozos de gradiente, dependerá de la presencia de una columna litológica impermeable sobre la cima del supuesto yacimiento geotérmico y de la homogeneidad en la conductividad térmica de las rocas que constituyan dicha columna.

## **5.5.2 Perforación Profunda de Diámetro Reducido**

### **5.5.2.1 Objetivos de la Perforación**

El modelo conceptual preliminar desarrollado para una área determinada con base en los estudios geocientíficos, servirá, como ya se mencionó en párrafos anteriores, para definir sus posibilidades geotérmicas y de guía para la recomendación de perforaciones exploratorias de factibilidad, en el caso que se decida continuar con su estudio. Sin embargo, cuando con la información de superficie e incluso con los datos de gradiente de temperatura no sea factible interpretar con cierto grado de confiabilidad la existencia de un yacimiento geotérmico, antes de tomar la decisión de recomendar la continuación del proyecto con perforaciones profundas en diámetros comerciales, podría ser necesaria o conveniente la perforación de pozos de propósito múltiple, que aporten información del subsuelo y de ser posible del yacimiento que ratifique, refuerce o modifique el modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, y que permita decidir con mayor seguridad el continuar el proyecto, o pararlo sin realizar las perforaciones de factibilidad de mayor costo.

### **5.5.2.2 Alcances y Actividades**

Los pozos de propósito múltiple sirven para determinar las condiciones del subsuelo a mayor profundidad que la de los pozos de gradiente.

La secuencia litológica, algunos aspectos estructurales y ciertos parámetros físicos del subsuelo inferidos preliminarmente con los estudios de superficie, podrán ser ratificados o cambiados de acuerdo a los resultados. Entre más profundas sean estas perforaciones (500 a 1500 m) existirá la posibilidad de definir la composición litológica de las rocas de la capa sello y, en su caso, las del yacimiento geotérmico, así como las temperaturas y las posibilidades de producción.

El objetivo de cada pozo de propósito múltiple tendrá que ser definido previamente para probar aspectos tales como: responder ciertas interrogantes geológicas e hidrogeológica relacionadas con la litología, permeabilidad y temperaturas subsuperficiales, especialmente de la cobertura y del yacimiento, cuando esto sea posible; o incluso determinar la existencia del yacimiento y si éste es de alta temperatura; y si las rocas del yacimiento y las rocas que lo cubren se encuentran correctamente señaladas por las anomalías geofísicas.

Ya que en la etapa de prefactibilidad en ciertas ocasiones se perforan pozos someros de diámetro pequeño, cabe mencionar que, por lo general, no se podrá lograr que dichos pozos produzcan fluidos; sin embargo, mediante pruebas de inyección de agua se podrá estimar la permeabilidad de la roca en el yacimiento y su posible capacidad de producción.

#### 5.5.2.3 Selección de Sitios para la Perforación

Puesto que el presupuesto para la perforación exploratoria generalmente es limitado, será de suma importancia desarrollar una selección cuidadosa de los sitios de perforación con el fin de obtener resultados determinantes en la etapa de prefactibilidad, especialmente en lo que se refiere a la conveniencia o no de proceder con la etapa de factibilidad.

Con frecuencia las perforaciones se ubican en más de un "área objetivo" seleccionadas con base en los estudios geocientíficos. Los criterios para seleccionar los sitios de perforación serán fundamentalmente geológico-estructurales, estratigráficos, geofísicos, geoquímicos y topográficos.

Para cada zona geotérmica se deberá realizar un plan para perforar uno, dos o más pozos, especificando las ubicaciones, profundidades de perforación y los objetivos. El plan deberá ser flexible de modo que puedan cambiarse las ubicaciones, profundidades y objetivos de algunos pozos, con base en los resultados de los primeros. Deben incluirse también sitios alternos de perforación, para el caso de que en algunos no sea factible la perforación debido a las condiciones geológico superficiales o a la topografía del terreno. En la selección de los sitios de perforación se tendrán que tomar en cuenta los riesgos de deslizamientos, sobre todo en áreas con antecedentes de deslaves.

#### 5.5.2.4 Preparativos

Con base en el plan desarrollado para el área de estudio, el personal de perforación debe preparar el programa y un presupuesto para la perforación de propósito múltiple, incluyendo los costos de construcción de caminos a los sitios de perforación, la preparación de la plataforma de perforación y el mantenimiento de caminos. Para las perforaciones en zonas montañosas sin accesos, deben diseñarse caminos sobre los que puedan pasar camiones plataforma en los que será necesario transportar el equipo de perforación.

En cuanto se decida la construcción de los pozos tendrán que ser elaborados el diseño básico de los pozos y el programa de obtención de recortes de la barrena, de núcleos y de registros de temperatura, y los estudios petrográficos, mineralógicos y petrofísicos de las formaciones perforadas.

Puesto que generalmente se requiere un preventor de reventones para los pozos en los que puedan existir condiciones de ebullición, la preparación de la plataforma de perforación incluye la excavación y construcción de un contrapozo con paredes de concreto, lo suficientemente grande para acomodar el preventor de reventones (Armstead, 1978; Kelsey y Carson, 1987).

Los costos de perforación y preparación del sitio pueden calcularse utilizándose los costos relacionados con actividades comparables en otros proyectos similares. Entre los principales parámetros de costos están el número de pozos, el total de metros a ser perforados, la profundidad máxima de pozo programada, el diámetro requerido para el pozo, los requerimientos de tubería de revestimiento (largo, diámetro, etc.) cantidad de núcleos por obtener y la cantidad y tipo de registros que se planean.

En general en esta etapa no se justifica un pozo con características especiales para la producción comercial de fluidos geotérmicos, por lo que es suficiente con perforar pozos de diámetro pequeño, de menor costo, utilizando equipos de perforación portátiles para profundidades de 1.0 a 1.5 km. De no existir agua superficial cerca del área, podría ser necesario transportar el agua con camiones tanque o utilizar el agua de un pozo, y esto debe ser tomado en cuenta en los costos y planes de perforación.

Después de aprobarse el presupuesto para la construcción de los pozos, se llevarán a cabo licitaciones para la perforación, la construcción de caminos y los registros de pozo. Los contratistas preferentemente deberán ser seleccionados entre los que tienen experiencia en perforación geotérmica. Los costos de perforación dependen de muchos factores, pero un pozo de exploración de diámetro pequeño con frecuencia puede costar entre US \$200,000 y \$500,000 dólares, incluyendo el trabajo de preparación del sitio de la perforación.

Durante la etapa preparatoria tendrá que establecerse un cronograma de perforación. Con base en este cronograma y a la mano de obra requerida en el campo, deben hacerse planes en cuanto a cómo y dónde alojar y alimentar a los trabajadores, y como proveer suficiente espacio para oficinas, áreas de trabajo y el almacenamiento de muestras resultantes de la perforación. Puede también ser necesario disponer de un área de almacenamiento seguro para los equipos y materiales de perforación.

Si se va a realizar cualquiera de las actividades de perforación en una propiedad privada o se requiere cruzar por una propiedad de este tipo, será necesario tramitar los permisos correspondientes de los propietarios, incluyendo un acuerdo por escrito para indemnizarles por las pérdidas incurridas como consecuencia de tales actividades. Deben estudiarse también las leyes y costumbres locales respecto a la protección del medio ambiente.

#### 5.5.2.5 Perforación

La perforación se puede realizar con un equipo rotatorio de perforación tricónica, con un equipo que use el sistema wireline de muestreo de núcleos o con una combinación de ambos.

La perforación tricónica aplica presión y rotación a una barrena para fragmentar la roca y estos recortes son extraídos a la superficie mediante la circulación de un fluido de perforación. Este fluido consiste de agua a la que se le añade una cantidad variable de lodos especiales para arrastrar los fragmentos de roca, para controlar las pérdidas de circulación, evitar derrumbes e impedir reventones cuando existen condiciones de artesianismo. En ocasiones se extraen núcleos de roca a intervalos seleccionados y esto exige sacar todas las herramientas del pozo para introducir un muestreador.

La perforación con un equipo rotatorio que utiliza el sistema wireline es semejante a la descrita en la parte correspondiente a la perforación de pozos de gradiente, salvo que la profundidad es mayor. Aunque la perforación con este sistema es más costosa que la perforación tricónica y su avance es más lento, provee al geólogo de mejores muestras para un registro estratigráfico más completo. También permite la perforación con menos dificultad cuando se encuentran zonas de pérdida de circulación y no se recupera el fluido de perforación, como sucede con frecuencia en rocas volcánicas.

En ocasiones se utiliza una combinación de perforación con barrena tricónica y el equipo que utiliza el sistema wireline. En estos casos los primeros 100 a 500 metros se perforan con barrena tricónica para atravesar la roca superficial a veces menos consolidada, después de colocar y cementar una tubería de revestimiento y acoplar un preventor de reventones, se continúa la perforación con el sistema wireline hasta llegar a la profundidad objetivo.

En los pozos de propósito múltiple la parte más profunda se alcanza generalmente con un diámetro del orden de las 3.5 a 4.5 pulgadas. Durante la perforación se acostumbra tomar registros de temperatura a intervalos no mayores de 200 m, con el pozo en reposo, esto es sin circular fluido de perforación, en series de 5 a 6 registros a intervalos de 4 a 6 horas a partir del momento que se detuvo la circulación. Después de las 36 horas la toma de registros de temperatura se podrá espaciar entre 12 ó 24 horas. Esto con el objeto de calcular las temperaturas estabilizadas en el subsuelo. Lo mismo se realizará al llegar a la profundidad objetivo.

Al alcanzar la profundidad total es práctica común lavar el pozo con agua limpia y, de ser necesario, cementar una tubería de ademe y llenar el pozo con agua. A continuación se realizarán nuevamente registros de temperatura a los intervalos indicados en el párrafo anterior, durante una o más semanas o hasta que el pozo restablezca sus condiciones de equilibrio termal.

#### **5.5.2.6. Estudios Geocientíficos Durante la Perforación**

##### **5.5.2.6.1 Estudios Geológicos**

Antes de la ejecución de los pozos se deberá elaborar una columna estratigráfica tentativa de las unidades que se espera encontrar durante la perforación, señalando las posibles profundidades a las que se podrían cortar estructuras geológicas (fallas y fracturas), contactos geológicos y zonas de alteración hidrotermal.

Durante la construcción del pozo un supervisor de perforación y un geólogo deben permanecer en el sitio para dirigir las operaciones y para recolectar, describir, inventariar y almacenar los recortes y núcleos de rocas. También deberán llevar un control de las temperaturas de entrada y salida del fluido de perforación, así como del volumen del fluido que se pierde en las zonas permeables.

Conforme avance la perforación el geólogo deberá reconstruir la columna litológica perforada y estudiar las características del fracturamiento, alteración, porosidad y permeabilidad de las rocas, tratando de reconocer directamente en el campo la correspondencia o discrepancia con las condiciones geológicas inferidas con los estudios de superficie, evidenciando sobre todo las discrepancias que afecten al modelo conceptual preliminar.

Si con base en los datos de la perforación el modelo geológico conceptual varia de manera relevante, se tendrá que revisar el programa de los pozos por perforar y, de ser necesario, reprogramar su ubicación y secuencia de construcción, conforme sea la nueva situación establecida.

Un aspecto importante en la definición de una zona geotérmica, es el de reconocer las características mecánicas y geométricas de las

unidades geológicas que forman el yacimiento y su cobertura. Por esta razón, durante la perforación se deberá dar especial atención a las unidades que se supone constituyen la cobertura y el yacimiento. En el caso de que las unidades que forman el yacimiento se alcancen con el pozo, se tomarán núcleos para su clasificación petrográfica y determinación del fracturamiento, presencia de minerales de alteración, porcentaje de alteración, etc., y para medir algunos parámetros petrofísicos tales como la porosidad, permeabilidad, conductividad, densidad, etc.

Es importante estudiar las condiciones de temperatura de las rocas en el subsuelo por medio de registros de temperatura, así como la identificación de minerales de alteración e inclusiones fluidas. La presencia de ciertos minerales hidrotermales e inclusiones pueden dar información sobre las temperaturas prevalecientes durante su formación, y consecuentemente del estado térmico actual o pasado de la roca perforada.

La síntesis del conocimiento geológico del subsuelo obtenido con las perforaciones representa la parte más importante de la exploración del área, ya que con ella se definirá con mayor detalle el modelo conceptual preliminar y sobre todo las posibilidades geotérmicas.

#### 5.5.2.6.2 Estudios Geoquímicos

Durante la perforación de pozos de propósito múltiple, si existen los medios, es conveniente llevar a cabo un muestreo de los fluidos de perforación a fin de determinar el ingreso de fluidos termales de la formación al pozo, o la incorporación en el fluido de perforación de algunos elementos o compuestos químicos característicos de las zonas de cobertura o del mismo yacimiento geotérmico. La correlación de esta información con la obtenida con los registros de temperatura, de pérdidas de circulación y la columna litológica, llevará a precisar la posición del pozo dentro del sistema geotérmico.

Los pozos exploratorios de pequeño diámetro rara vez se logran inducir para producción de fluido. En estas circunstancias, los estudios geoquímicos que se pueden realizar son muy limitados, puesto que resulta muy difícil obtener muestras de fluido del subsuelo sin alteración, por su mezcla con lodo de perforación o con el agua empleada para lavar el pozo.

En el caso de pozos que produzcan fluido geotérmico, el muestreo y análisis de éste permite determinar las condiciones fisicoquímicas en el yacimiento, y hacer un dictamen sobre sus posibilidades de producción y los probables problemas de corrosión o de incrustación del pozo y las tuberías superficiales que pudieran presentarse durante la etapa de explotación. Este tema se discute con mayor detalle en la Guía para Estudios de Factibilidad de OLADE/BID, (1993).

### 5.5.2.6.3 Estudios Geofísicos

Durante la perforación en la etapa de prefactibilidad rara vez se obtienen registros geofísicos del pozo, a no ser el registro de temperatura como se menciona en el inciso 5.5.2.5 (Perforación). Cuando se está en la fase de perforación de un pozo exploratorio, es necesario realizar registros de temperatura y presión vs profundidad cada cierto intervalo de profundidad, especialmente a partir de los niveles en los que se estima que el fondo del pozo se aproxima a una posible zona productora de fluidos geotérmicos. Un indicador de la proximidad de la zona productora estará dado por las temperaturas alcanzadas por el fluido de perforación y por la diferencia detectada entre las temperaturas de entrada y salida del fluido.

Los registros de temperatura es conveniente realizarlos en series de cuatro o más registros para cada profundidad seleccionada, transcurriendo entre ellos un lapso de 4 a 6 horas, con el objetivo de permitir que la temperatura por registrarse se incremente entre corridas. Una vez que se hayan completado estos registros y disponiendo de los tiempos de perforación y de reposo del fluido de perforación en el momento de correrse cada registro, se podrá determinar, en forma aproximada, la temperatura estabilizada de la formación. Se entiende por temperatura estabilizada de la formación, aquella que existía en el punto de medición antes de la perforación del pozo.

Una forma simple de calcular la temperatura estabilizada se presenta en la figura No. 2.

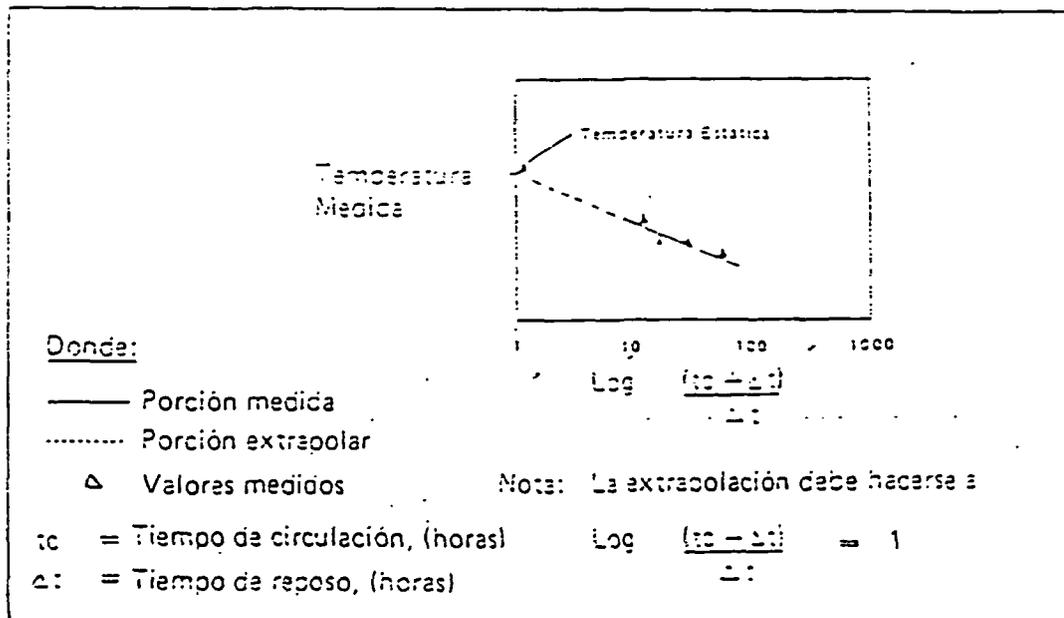


Figura No. 2 Determinación de la temperatura estabilizada en un pozo

Conociéndose las temperaturas estabilizadas a diferentes profundidades, se podrá reconstruir el perfil de temperaturas a lo largo del pozo y en una forma aproximada, contando con los datos de varios pozos, la configuración de las temperaturas en el subsuelo.

Por otra parte, los registros de presión permitirán determinar la profundidad a la que se encuentra el nivel estático del fluido en el pozo durante la perforación, y al alcanzar la posible zona del yacimiento, podrían llegar a ayudar a determinar la permeabilidad y las posibilidades de producción de la formación, mediante pruebas de inyección-recuperación de presión. Estas pruebas consisten en inyectar agua en la zona de interés, a un volumen determinado y durante un tiempo dado, midiendo los cambios de presión por debajo del nivel estático durante y después de haber terminado la inyección.

De ser posible, cuando se pueda disponer de los equipos adecuados para correr registros en pozos con altas temperaturas, también será conveniente tomar registros eléctricos (SP, resistividad) y calibrador del diámetro de la perforación. La combinación de registros de SP, resistividad, radiación gamma, de calibración y de temperatura, junto con la geoquímica del fluido de perforación, la columna litológica y las muestras de roca, estos registros deberán proveer información sobre la litología, ubicación de zonas permeables o de fracturamiento intersectadas por el pozo, salinidad del fluido de la formación y la temperatura que tiene la formación. La interpretación se podrá desarrollar mediante programas de cómputo para el análisis de diversos registros.

Cabe mencionar que normalmente la disponibilidad de los registros geofísicos de pozos, se ve obstaculizada por la dificultad de conseguir cerca del proyecto compañías que presten el servicio, y por el alto costo que tienen los registros. También es conveniente hacer notar que la información que aportan los registros no siempre compensa el alto costo pagado por ellos y que en ocasiones no se justifica su uso, ya que mucha de la información del subsuelo se puede obtener mediante el análisis cuidadoso de las muestras de canal, los núcleos y los registros de temperatura.

Las propiedades magnéticas así como los valores de densidad de las rocas tomadas de núcleos representativos del subsuelo, de ser posible deben determinarse para ayudar a la interpretación de las investigaciones gravimétricas y magnéticas, así como para identificar y correlacionar las unidades geológicas entre pozos.

La conductividad eléctrica de las rocas también debe ser medida en los núcleos, sin embargo, se deberá considerar que uno de los problemas con las mediciones en este tipo de muestras, es que pueden estar afectadas por la conductividad eléctrica del fluido de perforación y por la profundidad que alcanza a penetrar dicho fluido en el testigo. Para superar este problema, se pueden realizar mediciones sobre núcleos más pequeños, no contaminados, extraídos del interior de los núcleos de perforación más grandes. Deberá tomarse en cuenta que las mediciones

de la conductividad en muestras pequeñas rara vez son representativas de la roca global, ya que no reflejan los efectos que pueden producir sobre ella las grietas naturales llenas de fluido y/o las zonas ricas en arcilla.

#### 5.5.2.6.4 Estudios Hidrogeológicos

La perforación de propósito múltiple aporta información valiosa sobre los acuíferos regionales y sobre las características hidrogeológicas de la cubierta superficial y de la capa sello. eventualmente estas perforaciones podrán interceptar las zonas productoras del yacimiento geotérmico, en cuyo caso se obtendrá información de los materiales y fluidos del mismo.

Con base en los datos aportados por este tipo de perforaciones, se pueden realizar estudios sobre los siguientes aspectos hidrogeológicos:

**Niveles Hidrostáticos.**- Normalmente durante la perforación geotérmica ocurren pérdidas de circulación del fluido de perforación, que suceden en las zonas de contacto de las formaciones, entre diversos flujos lávicos, en estratos altamente porosos y permeables y en algunas fracturas o fallas abiertas. Cuando ocurren dichas pérdidas de circulación, el nivel del fluido de perforación descenderá hasta el nivel hidrostático del acuífero interceptado. Cementada la zona de pérdida y de continuar la perforación, en cada pérdida de circulación podría variar el nivel hidrostático del fluido de perforación y esto servirá para definir cada uno de los acuíferos interceptados.

**Índices de inyectividad.**- En cada pérdida de circulación se podrá realizar una prueba de inyección bombeando agua a diferentes caudales y manteniendo en el interior del pozo un medidor de la presión para registrar los cambios durante la inyección. Mediante este procedimiento se podrá determinar el índice de inyectividad del pozo y se estimará el grado de permeabilidad de la formación.

**Salinidad de los acuíferos.**- Durante la medición de los niveles hidrostáticos correspondientes a cada pérdida de circulación, se podrá intentar obtener muestras de agua representativas del acuífero en la formación, para que mediante el análisis químico del agua se traten de detectar los distintos acuíferos. Paralelamente se deberán tomar muestras del fluido de perforación, para su análisis químico y correlación con el análisis del agua procedente de los acuíferos interceptados. Dependiendo de la salinidad de los fluidos de los acuíferos muestreados se clasificarán éstos en dulces, semi-salinos y salinos.

**Porosidad y permeabilidad.**- Los núcleos de la perforación servirán para realizar en laboratorios ensayos y mediciones de la porosidad y la permeabilidad. Los resultados servirán para caracterizar

con mayor detalle la capa sello y el yacimiento, en el caso de que se lleguen a interceptar.

**Correlación de datos hidrogeológicos.**- Los datos hidrogeológicos aportados por los pozos se correlacionarán entre sí y con los obtenidos con los estudios geocientíficos de superficie. Con ellos se elaborará con mayor detalle el modelo de circulación hídrica del subsuelo.

### 5.5.3 Tiempos y Costos de la Perforación

El costo de los pozos de gradiente de temperatura a profundidades hasta de 200 metros, depende principalmente del costo de la perforación y ésta varía entre US \$ 100 a US \$ 350 por metro. Los costos más bajos corresponden al caso en que el equipo de trabajo fuera contratado localmente y la perforación se realice en rocas de poca dureza. Los costos más altos se aplican cuando hay la necesidad de utilizar contratistas de fuera del país y la roca por perforar es dura y presenta problemas en su penetración.

El tiempo total requerido para completar el trabajo de campo perforando y tomando datos en varios pozos de gradiente, depende del número de pozos por perforar, de las profundidades por alcanzar y de su terminación. La mayor parte del tiempo requerido para una investigación del gradiente de temperatura se la lleva la perforación de los pozos. Un pozo de 40 metros de profundidad puede realizarse en 1 semana, y uno de 200 metros en aproximadamente 1 mes. Por lo tanto, dependiendo del número de pozos por realizar y su profundidad, una investigación de esta naturaleza se podrá ejecutar en el lapso de 6 a 12 meses.

Por lo que respecta al costo de la perforación de pozos exploratorios de propósito múltiple a profundidades de 0.5 a 1.5 kilómetros, éste varía en el rango de US \$ 200.000 a US \$ 1'000.000 por pozo, pudiendo ser perforado el agujero en rocas volcánicas en un periodo de alrededor de 1 a 3 meses, respectivamente, según el equipo y la experiencia en la perforación geotérmica. El tiempo y el costo puede ser mayor cuando la perforación se dificulta por la dureza de las rocas y las pérdidas de circulación, condiciones que frecuentemente son encontradas en las regiones volcánicas.

Los costos de perforación señalados arriba para los pozos de propósito múltiple incluyen las actividades previas a la ejecución del pozo (como la construcción de la plataforma de perforación) y un tiempo razonable para la toma de registros durante y al término de la perforación. El costo en sí de la perforación se calcula con frecuencia en dólares por metro o por pie, pero dicho costo base aumenta con la profundidad del pozo ya que las velocidades de perforación disminuyen al aumentar los problemas al progresar la perforación en zonas con temperaturas más altas. Los pozos de exploración poco profundos, es decir esos de menos de un km, tienden a ser relativamente menos costosos.

## 5.6 Integración Geocientífica

Al término de la exploración con pozos de diámetro pequeño, la información proporcionada por los pozos de gradiente y/o los pozos de propósito múltiple deberá integrarse con la información de las diferentes disciplinas geocientíficas de superficie. Cada experto tendrá que analizar y actualizar su estudio para que sea consistente con los nuevos datos. Esto será particularmente importante para la reconstrucción del modelo conceptual del sistema geotérmico.

En el proceso de optimización del modelo del área geotérmica bajo estudio, cada disciplina presentará información sobre los aspectos más importantes del sistema geotérmico, enriquecida con los datos aportados por los pozos de gradiente y/o de propósito múltiple. Sin embargo, para obtener el mayor provecho de tal información, será necesario llevar a cabo una integración geocientífica en la cual se haga un análisis crítico y detallado de las concordancias y aparentes incongruencias.

La integración e interpretación conjunta de la información geológica, hidrogeológica, geoquímica, geofísica y la proporcionada por los pozos, deberá concluir con la elaboración del modelo conceptual actualizado del sistema geotérmico y un informe técnico en el que se presente una síntesis de los estudios y las perforaciones realizados, sus resultados, el modelo del sistema geotérmico y una evaluación de las posibilidades energéticas del área en estudio. El informe deberá ser determinante respecto a la posible existencia del yacimiento geotérmico y los riesgos naturales a los que esté expuesto el proyecto.

En el caso de ser positiva la evidencia de la existencia de un yacimiento geotérmico, el informe deberá incluir un documento de proyecto para el desarrollo de la siguiente etapa de factibilidad. Dicho documento deberá mostrar la ubicación de 3 a 6 pozos profundos de exploración, con indicaciones sobre los objetivos por alcanzar, la columna litológica por atravesar, el muestreo de rocas y fluidos por realizar, los registros de temperatura, presión, geofísicos, etc. que correr, y la profundidad total prevista para cada pozo. A tal información se tendrán que adicionar algunas consideraciones respecto al medio ambiente, orientadas al estudio, prevención y mitigación del impacto ambiental.

En una situación en la que la integración de la información geocientífica y la proporcionada por los pozos no permita definir las posibilidades del proyecto, o demuestre que no existen las condiciones adecuadas para el aprovechamiento del sistema geotérmico como recurso energético, tal situación se tendrá que señalar claramente recomendando alguna alternativa para su utilización o incluso el cierre del proyecto de no ser de interés para la institución que promovió la investigación.

## 5.7 RESULTADOS

### 5.7.1 Modelo Conceptual del Sistema Geotérmico

El modelo preliminar del sistema geotérmico que se había presentado como resultado de la integración de los estudios geocientíficos de superficie en esta etapa de prefactibilidad, tendrá ahora que transformarse en un modelo conceptual con mayor información del sistema. El modelo tratará de definir, de ser posible, la estructura tridimensional del yacimiento cuantificando la extensión del mismo, el ciclo de descarga y recarga del acuífero y la profundidad y características de la fuente de calor.

La integración científica de la información generada por los estudios de superficie con la información generada por los pozos, llevará a la formulación de un modelo conceptual de mayor detalle del sistema geotérmico. El modelo tratará de definir los aspectos fundamentales para la estimación del potencial del recurso para su explotación con fines energéticos. Entre otras cosas deberá describir:

- El modelo de evolución geovulcanológica de la zona. La naturaleza, características principales, dimensión estimada y ubicación de la fuente de calor.
- La columna litológica y las principales propiedades petrofísicas (capacidad calorífica, conductividad térmica, porosidad, permeabilidad) de las diversas unidades, particularmente las del yacimiento y de la capa sello.
- Los principales rasgos geológico-estructurales de la zona. En particular los rasgos relacionados con el modelo vulcanológico (estructuras caldéricas, estratovolcanes) y los sistemas principales de fallas que jueguen un papel importante en la definición del patrón de flujo de fluidos a profundidad.
- La profundidad y límites del posible yacimiento.
- La estimación de las posibles temperaturas en el yacimiento.
- El modelo de flujo subterráneo, incluyendo la probable ubicación de la(s) zona(s) de recarga, la dirección general de flujo, la ubicación de las descargas de agua geotérmica y, cuando sea posible, la ubicación de la(s) zona(s) de ascenso de vapor y una descripción de los procesos de mezcla en el subsuelo.

De ser positivos los resultados del estudio de prefactibilidad, especialmente en lo que se refiere a la existencia del yacimiento, el modelo conceptual del sistema geotérmico será la base para conducir exploraciones de factibilidad mediante la perforación profunda de diámetro comercial, cuyo objetivo será comprobar las condiciones geológicas y térmicas del subsuelo representadas en el modelo, y la existencia de un yacimiento geotérmico.

## 5.7.2 Evaluación del Potencial Energético Probable

Tomando como base el modelo geotérmico conceptual, se procederá a evaluar el potencial energético probable utilizando para ello cualquiera de los métodos señalados en la Guía para la Evaluación del Potencial Energético en Zonas Geotérmicas durante las Etapas Previas a la Factibilidad (1993), elaborada por OLADE y el BID, o el que se presenta más adelante.

Como se mencionó en la etapa de reconocimiento, la magnitud del recurso se puede inferir semicuantitativamente con base a los datos preliminares de campo. El tamaño y tipo de las manifestaciones termales, el flujo térmico medido en la superficie, las temperaturas calculadas del subsuelo, el área de alteración hidrotermal y el tamaño de las anomalías geoquímicas, son parámetros que permiten estimar en una forma muy general la importancia de la zona geotérmica y su posible potencial energético. En términos generales el tamaño del recurso suele ser proporcional a tales parámetros. Las fumarolas son más significativas del tamaño del recurso que las manifestaciones de agua, ya que aquellas tienden a presentarse en las áreas de mayor temperatura del sistema, mientras que los manantiales tienden a estar asociados con las zonas de descarga.

En la etapa de prefactibilidad el potencial del sistema geotérmico se puede calcular en una forma aproximada, tomando en cuenta las características geológicas y físicas del subsuelo interpretadas mediante las observaciones de superficie y la aplicación de métodos indirectos de exploración, complementadas, cuando éste sea el caso, con información del subsuelo proporcionada directamente por perforaciones de diámetro pequeño.

El cálculo del posible potencial se puede realizar utilizando cualquiera de los métodos que existen para tal propósito, de los cuales los más usados son el Método de la Cámara Magmática y el Método Volumétrico.

El Método de la Cámara Magmática se basa en establecer la cantidad de calor acumulado en el subsuelo dentro de un intervalo de profundidades, como consecuencia de la presencia de una cámara magmática a mayor profundidad con la cual se asocia el sistema geotérmico. El calor almacenado en un intervalo dado se podrá calcular estimando el volumen, profundidad, edad y temperatura de la cámara magmática y calculando la transferencia de calor únicamente por conducción entre dicha cámara y la superficie.

Este método requiere de un modelo de la cámara magmática, obtenido por medio de métodos vulcanológicos que proporcionan la profundidad, volumen, edad y temperatura inicial y final de la cámara. A continuación se desarrolla el cálculo de la distribución de la temperatura en la corteza, considerando sólo la conducción térmica. Una descripción detallada de este método se puede consultar en el trabajo de Barberi, F. y Marinelli, G., 1987.

El Método Volumétrico se basa en el cálculo de la energía térmica contenida en un volumen de roca a considerar dentro de la zona de interés, y en una estimación de la fracción de ésta que es recuperable y convertible a energía útil. En la sección referente a la etapa de reconocimiento se presentó una descripción de este método, obtenida de la literatura (Brook y Otros, 1979; Nathenson y Muffler 1975; Muffler y Cataldi, 1978; y OLADE/BID, 1993), que cuando no se tiene suficiente información del subsuelo en la etapa de prefactibilidad es el método más recomendable para estimar el potencial energético del posible yacimiento geotérmico.

En esta sección se presenta una descripción alternativa de este Método Volumétrico, que utiliza una nomenclatura ligeramente distinta y que permite obtener ventaja del mayor grado de detalle que se pudiera tener en la etapa de prefactibilidad sobre las propiedades de la roca y del fluido del yacimiento y sobre la distribución de las temperaturas en el subsuelo, cuando se tiene suficiente información como resultado de la perforación de varios pozos de propósito múltiple.

En la etapa de prefactibilidad si se perforan pozos de propósito múltiple, se tendrá más información que en la etapa anterior para formular una hipótesis razonable sobre el volumen del posible yacimiento geotérmico. En el caso de que se hayan perforado varios pozos de este tipo, podría llegarse a tener alguna información sobre la distribución de la temperatura en el yacimiento. Asimismo, los estudios petrofísicos realizados en muestras de roca de unidades aflorantes y en núcleos de perforación, habrán provisto información sobre las propiedades de transporte y de almacenamiento de fluidos de las rocas en diferentes estratos litológicos, entre ellos tal vez de las rocas del yacimiento.

Con tal información, una estimación del potencial energético se puede basar en el cálculo de la reserva de calor almacenado en el yacimiento (H), mediante la ecuación:

$$H = \int ((C)T_y - (C)T_{ab}) dV$$

la cual es una integral sobre el volumen (V) del yacimiento y en ella,

$T_y$  = temperatura en cada punto del yacimiento

$T_{ab}$  = temperatura de "abandono". Esta última depende de la forma en que se pretenda explotar el yacimiento. Por ejemplo, para el caso de generación geotermoléctrica convencional  $T_{ab}$  sería la temperatura en el fondo del pozo a la cual ya no se podría mantener la presión de cabezal mínima requerida (normalmente unos 150 - 180 °C).

(C) = capacidad calorífica de la roca saturada con fluido geotérmico a la temperatura respectiva, que se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\{C\} = (1 - \phi)\sigma_r C_r + \phi[S_a \sigma_a C_a - (1 - S_a)\sigma_v C_v]$$

donde los subíndices r, a y v indican roca, agua (líquida) y vapor, respectivamente, y

$\phi$  = porosidad de la roca  
 $\sigma$  = densidad  
 C = capacidad calorífica  
 $S_a$  = saturación de agua.

En la etapa de prefactibilidad se pueden utilizar valores típicos de porosidad, densidad y capacidad calorífica para el tipo de roca del yacimiento, los cuales se registran en la literatura. Los valores de densidad y capacidad calorífica del agua y del vapor se pueden obtener de tablas de vapor. En una primer instancia, se puede considerar que la roca está saturada sólo con agua líquida ( $S_a$  es igual a 1).

Si bien la mayor parte del calor en el yacimiento estará contenido en la roca, el vehículo para su extracción es el fluido geotérmico. La fracción de la reserva de calor que en última instancia será recuperable en la superficie, depende de las propiedades de almacenamiento y transporte de fluido de la roca, y de la posible aportación al yacimiento con agua de la recarga (natural o inyectada) que "barra" el calor contenido en la roca.

En esta etapa es conveniente formular modelos sencillos de "dimensión cero" (en inglés: "lumped-parameter"), que comparen proyecciones de extracción de fluido y calor, considerando un caso de cero recarga, y casos con diferentes magnitudes de recarga de agua.

Sólo una fracción de la reserva de calor calculada con las ecuaciones arriba descritas es recuperable como energía térmica en la superficie, y de esta última sólo una fracción es convertible a energía eléctrica. Típicamente, entre 15% y 20% de la reserva de calor definida arriba es convertible a energía eléctrica.

Algunos autores han recomendado el uso del concepto de "energía útil" (también llamada "exergía") para la evaluación del potencial del recurso geotérmico (Grant, et al, 1982; Bodvarsson y Eggers, 1972). Esta energía útil es la fracción del calor recuperable del yacimiento que puede ser convertido en trabajo (o en energía eléctrica) por una máquina perfecta. La exergía (e) se define como:

$$e = H_r - T_0 s$$

donde,

$H_r$  = calor recuperable del yacimiento  
 $s$  = la entropía específica del fluido

$T_d$  = temperatura (en escala absoluta) de desecho del fluido después de la extracción de energía (la temperatura de los condensadores, en el caso de una planta geotérmica convencional).

Si bien el potencial energético "estimado" preliminarmente con estos métodos, en muchas ocasiones pudiese no ser representativo de la magnitud real del recurso por la falta de información confiable del sistema geotérmico, cuando los resultados del cálculo sean congruentes con la importancia del área definida a partir de los resultados geocientíficos, sus posibilidades geotérmicas se puede decir que en cierta forma están siendo ratificadas.

## 5.8 Consideraciones Ambientales

La evaluación y declaración del impacto ambiental constituyen una práctica actualmente exigida por las legislaciones de la mayor parte de los países de América Latina y el Caribe. La Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) es un proceso que debe cumplirse para todos aquellos proyectos, obras o actividades susceptibles de afectar negativamente las condiciones ambientales del área de implantación, sin importar que los impactos resultantes del análisis sean o no significativos. En este sentido, la EIA debiera ser una práctica corriente en las empresas que tienen entre sus actividades la exploración y explotación geotérmica, con el fin de evitar daños a terceros y conflictos futuros con las comunidades.

La Declaración de Impacto Ambiental (DIA) es, por su parte, un documento legal y público, preparado a partir de la documentación de la EIA, destinado a informar a la autoridad ambiental y a la sociedad en general sobre el alcance del proyecto, los impactos que causará y las medidas que serán aplicadas para evitar o mitigar tales impactos. La preparación de una DIA es generalmente solicitada por una agencia ambiental competente.

Ante la necesidad de llevar a cabo la protección del medio ambiente en proyectos geotérmicos, durante la etapa de reconocimiento o de prefactibilidad se llevarán a cabo los trabajos correspondientes a un Examen Ambiental Inicial (EAI), que posteriormente, en la etapa de factibilidad, será la base para el desarrollo del Estudio del Impacto Ambiental propiamente dicho.

### 5.8.1 Examen Inicial Ambiental

Siendo los objetivos de la evaluación del impacto ambiental el:

- identificar y describir los recursos naturales que podrían ser afectados por el proyecto;

- describir los efectos que el proyecto podría ocasionar sobre los recursos naturales, incluyendo: 1) los efectos positivos que realzarán el valor o importancia del recurso natural y los efectos negativos que le perjudicarán; 2) los efectos directos o indirectos, 3) los efectos a corto y largo plazo, y 4) los efectos acumulativos y los de carácter irreversible, junto con una descripción de las formas específicas en que el diseño del proyecto minimizaría los efectos adversos y maximizaría los efectos positivos; y
- describir alternativas al proyecto propuesto, que podrían dar los mismos resultados deseados pero con una serie de efectos ambientales distintos;

durante la etapa de prefactibilidad el Examen Inicial Ambiental consistirá esencialmente en una verificación y complementación de la información correspondiente a los dos primeros puntos, que durante la etapa de reconocimiento se empezó a recopilar, con especial atención del efecto que tendrá en el medio ambiente la ejecución de los estudios geocientíficos y la posible perforación de pozos exploratorios de pequeño diámetro.

#### 5.8.2 Alcances y Actividades

Considerando que el estudio de prefactibilidad definirá con mayor precisión el área de interés geotérmico, en dicha área se tratarán de identificar los posibles impactos del proyecto geotérmico en el medio ambiente, mediante la:

- Elaboración de una lista de los receptores del impacto tales como: el agua, el aire, el suelo, el subsuelo, los animales, los vegetales y los seres humanos (Tabla No. 5 de la Guía de Reconocimiento).
- La identificación de las fuentes de los posibles impactos, como por ejemplo: caminos, campamentos, áreas de perforación, descargas de salmueras, reducción de árboles, etc.; mencionando los "posibles receptores" en el medio ambiente (cultivos, bosques, acuíferos, arroyos ríos, etc.).
- Distinción entre impactos temporales y permanentes, directos e indirectos, positivos y negativos, acumulativos e irreversibles.
- Identificación de los impactos mediante el uso de listas u otros instrumentos como matrices, redes, etc.

El examen se llevará a cabo utilizando la documentación que se recopiló durante el estudio de reconocimiento y la información que se obtenga durante los trabajos de campo que se realicen durante la prefactibilidad.

### 5.8.3 Resultados

Puesto que en la evaluación del impacto ambiental se debe asegurar que se prevean y manejen desde el comienzo del proyecto los problemas potenciales que se pudiesen ocasionar al medio ambiente, el examen inicial ambiental deberá prever la ocurrencia de impactos significativos debido a las actividades exploratorias durante esta etapa.

Es evidente que las investigaciones de geología, geoquímica, hidrogeología y geofísica no tendrán ningún efecto significativo sobre el medio ambiente, a menos que para desarrollar dichas actividades se tengan que construir caminos de penetración y haya que abrir claros en la vegetación de una zona protegida. Sin embargo, si en la investigación de prefactibilidad se ve involucrada la perforación de pozos de gradiente y/o de propósito múltiple, el examen ambiental inicial deberá orientarse principalmente a la afectación de tierras y limpieza de vegetación, al impacto visual de los equipos de perforación y los caminos, al ruido ocasionado por los equipos de exploración, a los riesgos de derrames de fluido de perforación y, eventualmente, a posibles descargas de fluido geotérmico.

La parte final de la evaluación del impacto ambiental tendrá que involucrar la elaboración de un informe que, de acuerdo con los objetivos generales establecidos, incluya como aspectos reelevantes los siguientes puntos:

- Descripción del área de interés geotérmico, con una introducción general del proyecto destinada a consignar sus objetivos, alcance, localización geográfica, justificación, entidad propietaria y otros aspectos que se consideren de interés.
- Descripción de las investigaciones propuestas, que en el caso de la prefactibilidad debe cubrir actividades geológicas, geofísicas, hidrogeológicas, geoquímicas y, eventualmente, la perforación de pozos de gradiente y/o de propósito múltiple.
- Descripción de las características ambientales del área de influencia del proyecto, con especial énfasis en:
  - . La definición del área de influencia.
  - . Ambiente físico: geología y geomorfología, sismología, suelos, meteorología local, calidad del aire, niveles de ruido, aguas superficiales y subterráneas.
  - . Ambiente biótico: recursos hidrobiológicos, fauna y flora terrestre.
  - . Ambiente socioeconómico: población, servicios públicos, uso de la tierra, economía, infraestructura, aspectos culturales y calidad del paisaje.

- . Proyección de la situación futura del área.
- Análisis de los impactos ambientales y de las correspondientes medidas de mitigación; realizando la:
  - . Identificación de impactos.
  - . Predicción o cuantificación de impactos.
  - . Evaluación o apreciación de la importancia de cada impacto.
  - . Identificación, descripción y comparación de las siguientes alternativas de prevención, mitigación y/o compensación de cada uno de los impactos juzgados significativos.
- Formulación del plan general de manejo ambiental.

Adicionalmente, se deberá redactar un resumen ejecutivo del estudio y, en caso de que la autoridad ambiental lo exija, una declaración de impacto ambiental (DIA).

La declaración de impacto ambiental debe ser un resumen de la evaluación de impacto ambiental, pero, al contrario del resumen ejecutivo recomendado como parte del texto principal de la EIA, la DIA debe ser una síntesis de tipo didáctico, ya que su destinatario es el público en general y, como tal, debe explicarse en ciertas explicaciones que podrían parecer superfluas a un experto, pero que evitan la confusión a los profanos. En especial, estas explicaciones deben darse para aclarar la importancia de los impactos significativos del proyecto y la eficacia de las respectivas medidas de control o mitigación. También se debe focalizar la relación entre el proyecto y los recursos ambientales de especial significación en el área, para los cuales existe un alto grado de sensibilidad pública (un lago, un bosque virgen, un yacimiento arqueológico, etc).

#### 5.8.4 Requerimiento de Personal, Tiempo y Costo

Siendo el EIA un análisis preliminar de los potenciales efectos en el medio ambiente debido a las actividades exploratorias en la etapa de prefactibilidad, su ejecución se llevará a cabo con un presupuesto limitado ya que estará integrado con base a la información disponible y/o la información que obtenga el grupo de investigadores que interviene en esta etapa.

De igual forma que en el reconocimiento, durante la prefactibilidad el geólogo del proyecto es la persona idónea para la elaboración del EIA, ya que al desarrollar los levantamientos de campo puede llegar a conocer con mayor detalle los aspectos ambientales naturales en el área de interés geotérmico, y estimar el efecto que podría tener en el medio ambiente el desarrollo del proyecto. Este profesional podrá ser el responsable de la ejecución del EIA, contando con la

colaboración del geoquímico, del geofísico y del hidrogeólogo quienes podrán aportar información importante sobre las condiciones ambientales iniciales, y del ingeniero de perforación quien proporcionará información sobre el posible impacto ambiental de las perforaciones.

Eliminando la obtención de información de campo y de laboratorio por parte de los investigadores, puesto que en general es parte de la propia actividad geocientífica de cada uno de ellos, y considerando sólo la recopilación de información requerida para el EIA, su análisis y la elaboración del informe, el tiempo que podría necesitar el geólogo responsable de esta actividad se estima será no mayor de dos o tres meses y su costo de U.S.\$ 10.000-20.000 dólares, aproximadamente.

#### 5.9 Preparación de un Documento de Proyecto para la Etapa de Factibilidad

Siendo positivas las conclusiones del estudio de prefactibilidad en cuanto a la posible existencia de un yacimiento geotérmico en el área investigada, el desarrollo del proyecto evolucionará a la etapa de factibilidad cuyo objetivo será comprobar la existencia del yacimiento geotérmico, evaluar el potencial energético en el área prospectada y presentar alternativas de utilización del recurso detectado.

La ejecución de un estudio de factibilidad involucra la realización de estudios geocientíficos, la perforación de pozos profundos, estudios de ingeniería de yacimientos y estudios técnico económicos, que llevarán a cuantificar el recurso base accesible, probar la factibilidad técnico-económica de su explotación y a establecer un programa de desarrollo para el aprovechamiento de dicho potencial con fines energéticos.

A la culminación de los estudios de factibilidad cuando el resultado demuestre la existencia de un yacimiento geotérmico, alguno o algunos de los pozos exploratorios productores podrían ser utilizados de inmediato en la generación de electricidad, mediante la instalación de plantas portátiles a boca-pozo de 1 a 5 MWe de capacidad, mientras se efectúa el desarrollo del campo para una planta de mayor potencia.

Conocida el área específica donde llevar a cabo el estudio de factibilidad, el documento de proyecto consistirá en la presentación de un programa mínimo de trabajo, con recomendaciones sobre la secuencia y forma de desarrollar las actividades, así como de los periodos en los cuales es conveniente realizar un análisis de los resultados preliminares para tomar la decisión de continuar o suspender los trabajos restantes.

En principio el documento de proyecto deberá presentar los aspectos relacionados con la topografía, caminos de acceso, el clima, las condiciones de trabajo, de salud, los riesgos naturales, la ubicación de sitios de perforación, el suministro de agua, de seguridad personal y de los equipos, etc., que podrían afectar las operaciones de campo.

En relación a las actividades técnicas, para cada disciplina (geocientífica, perforación, ingeniería de yacimientos, ingeniería de la planta, etc.) se deberán describir las actividades de campo, laboratorio y gabinete que estarán involucradas en el estudio. Se precisará que a la conclusión de cada uno de los trabajos programados se presente un informe que describa las actividades realizadas, los datos obtenidos, los procedimientos analíticos empleados y los resultados con los que concluye el trabajo. El informe final estará constituido por una síntesis de todos los trabajos, con un resumen de los datos colectados, el procesado de la información, las interpretaciones y los resultados de los cálculos sobre la factibilidad técnico-económica del proyecto.

En el documento se presentará un cronograma de las actividades programadas, señalando aquellas que podrían ser realizadas por elementos que pertenecen a la propia empresa responsable del estudio y las que tendrán que ser contratadas en el país o en el extranjero. Se deberá especificar si habrá que recurrir a firmas consultoras, instituciones especializadas o consultores individuales, así como la manera en que el personal extranjero o nacional formará equipo con el de la empresa contratante.

Finalmente, al tener una estimación de las actividades por realizar en el proyecto y los elementos (compañías, consultores, asesores, etc.) que deberán intervenir en el mismo, se preparará un presupuesto del estudio de factibilidad. Puesto que este presupuesto podrá ser la base para la consecución de financiamiento por parte de instituciones externas, será necesario que se presente en la forma más completa posible, detallando los trabajos y el costo estimado para cada uno de ellos.

El documento se deberá estructurar con un capítulo de antecedentes, seguido por los objetivos que se pretenden alcanzar, una descripción detallada de las actividades por realizar, un presupuesto de los trabajos, el cronograma de actividades y cualquier otra información que se considere conveniente para la mejor comprensión y justificación del proyecto.

## **5.10. Infraestructura Requerida**

### **5.10.1 Recursos Humanos**

Los requerimientos de personal y equipos para un estudio de prefactibilidad dependen de las condiciones locales de la institución o país que necesite realizar este tipo de estudio. Las variantes al respecto son amplias, sin embargo, en general se puede considerar que el personal mínimo necesario para realizar la investigación en un área de 500 km<sup>2</sup>, contando con información básica como mapas topográficos, mapas geológicos y fotografías aéreas, podría ser el siguiente:

Para geología:

Trabajo de campo y gabinete	1	Vulcanólogo
	1	Geólogo estructural
Trabajo de laboratorio	1	Petrógrafo
Coordinación del estudio	1	Geólogo experto en geotermia.

Para Geoquímica:

Supervisión	1	Geoquímico experto en geotermia.
Trabajo de campo	1	Geoquímico o Técnico geoquímico.
Trabajo de laboratorio		Apoyo de laboratorios para análisis químicos e isotópicos.

Para hidrogeología:

Para la supervisión y el trabajo de campo:	1	Hidrogeólogo.
	1	Técnico hidrólogo.

Para geofísica:

Independientemente de que los estudios geofísicos se realicen por administración o por medio de la contratación de servicios, la investigación se deberá llevar a cabo bajo la dirección de un geofísico, preferentemente con experiencia en la aplicación de métodos eléctricos o electromagnéticos en la exploración geotérmica, quien será responsable de la planificación y supervisión de los levantamientos y su interpretación. Adicionalmente, será conveniente contar con el apoyo de un geofísico auxiliar con experiencia en gravimetría, magnetometría y modelado numérico.

En caso de que los estudios geofísicos sean por administración, además del personal mencionado en el párrafo superior se requerirá de varios asistentes para los levantamientos, cuyo número variará en función de las técnicas de campo utilizadas y de las condiciones del terreno. Entre los asistentes es importante considerar a los operadores de los equipos de resistividad y MT, los

de una brigada de topografía y los peones de apoyo para los levantamientos, que en el caso de utilizar el método Schlumberger se incrementará considerablemente pudiendo llegar a ser alrededor de 30 personas cuando el espaciamiento electródico es grande ( $AB/2 = 4$  a  $5$  km).

Para el análisis ambiental:

El geólogo del proyecto será el responsable de elaborar el EIA, ya que durante los levantamientos de campo conocerá con mayor detalle los aspectos ambientales del área de interés geotérmico y podrá estimar el efecto que podría tener en el medio ambiente el desarrollo del proyecto. Este profesional contará con la colaboración de los investigadores que trabajen en el campo en otras disciplinas, quienes con sus observaciones y los datos que obtengan podrán aportar información sobre las condiciones ambientales iniciales y el efecto de algunas actividades en el medio ambiente.

Para la perforación:

A menos que se disponga de equipo propio, esta actividad deberá contratarse con alguna compañía con experiencia en perforación geotérmica. Sin embargo, independientemente del personal de la compañía contratista se tendrá que considerar la participación de un técnico de la institución o empresa contratante, cuya labor sea llevar a cabo la supervisión de los trabajos de perforación y de las mediciones que se realicen en el pozo.

Para el informe final:

Este trabajo será realizado por personal de las diversas disciplinas que participaron en el estudio de prefactibilidad, principalmente en las actividades de campo y en la elaboración de informes. La intervención de los supervisores es indispensable para la preparación del informe final.

#### 5.10.2 Recursos Físicos

Los países con posibilidades de desarrollar sus recursos geotérmicos y que no dispongan de la infraestructura adecuada, deberán considerar la posibilidad de disponer de los equipos indispensables para llevar a cabo con recursos propios estudios de reconocimiento y de prefactibilidad. Estos equipos consistirán por lo menos de:

Para geología:

- Equipo para fotointerpretación (estereoscopios).
- Equipo completo para la elaboración de láminas delgadas.
- Microscópio petrográfico.
- Equipo de campo (martillo, brújula, altímetro, lente de mano, etc.).

Para geoquímica:

- Laboratorio para análisis de aguas y gases equipado, entre otros instrumentos, con un equipo de absorción atómica y un cromatógrafo de gases.
- Equipo portátil para muestreo geoquímico de campo.

Para geofísica:

- Equipo de resistividad eléctrica con capacidad de investigación a no menos de 2000 metros de profundidad.
- Equipo MT.
- Magnetómetro de campo total.
- Medidor de susceptibilidad magnética.
- Gravímetro.
- Altímetro de precisión.
- Equipo de topografía.
- Equipo de computación.

### 5.11 Tiempo y Costos

Tomando en cuenta los tiempos que en promedio se han requerido para la realización de estudios de prefactibilidad en algunos países de América Latina, y lo expresado en este documento para cada una de las disciplinas, se puede afirmar que es factible llevar a cabo las investigaciones de geología en 8-10 meses, la geoquímica en 6-8 meses, la geofísica en 8-10 meses, la hidrogeología en 4-6 meses de trabajo efectivo en un período de 10-12 meses, el análisis ambiental en 2-3 meses, las perforaciones someras de gradiente en 6-12 meses y las perforaciones (3-4) de propósito múltiple en 6-12 meses.

Puesto que algunas de las actividades se pueden realizar paralelamente, se puede señalar que un estudio de prefactibilidad donde únicamente se vean involucrados estudios geocientíficos se podría desarrollar en aproximadamente 12-15 meses. La complementación del estudio con perforaciones de gradiente y/o de propósito múltiple, podría significar extender el período del estudio hasta 24 meses, según sea el número y profundidad de las perforaciones.

Los costos de un programa de exploración como el indicado en esta guía, podrían variar de acuerdo a ciertos factores tales como:

- El volumen de información existente.
- Las características topográficas y geológicas del área en estudio.
- La existencia de personal o compañías locales con experiencia en exploración geotérmica.
- La existencia de laboratorios con experiencia en trabajos de geología y geoquímica.
- El alcance que tengan los estudio de prefactibilidad.

Si la investigación geocientífica es suficiente para determinar la posible existencia de un yacimiento geotérmico, es evidente que se podrán suprimir las perforaciones de diámetro reducido y pasar a la etapa de factibilidad sin realizar los gastos que involucra esta última actividad.

Un costo aproximado de sólo los estudios geocientíficos podría estar dado por un mínimo de US \$ 500.000 y un máximo de US \$ 1.200.000 dólares.

Considerando perforaciones de gradiente y de propósito múltiple, dichas cantidades podrían ascender a más de US \$ 4.0000.000 dólares, dependiendo del número y profundidad de los pozos.

6. BIBLIOGRAFIA

Abdelrahman, E. M., 1985. On the least squares residual anomaly determination. *Geophysics*, 50.

Armstead, H.C.H., 1978. *Geothermal energy*. John Wiley & Sons, New York, 357 p.

Arnorsson S. y Gunnlaugsson E. 1985. New gas geothermometers for geothermal exploration - Calibration and application. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, pp. 1307-1325.

Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps, pseudogravimetric anomalies. *Geophysics*, 22.

Barberi, F. y Marinelli, G., 1987. Recientes progresos en la vulcanologia aplicada a la exploración geotérmica. *Revista Energética, OLADE*, Vol. 11, No. 2, pp. 91-115.

Barberi, F., Cataldi, R. y Merla, A., 1987. Resources and development perspective of geothermal energy in Central and South America. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 5, No. 2, pp. 245-265.

Barton M.D., Battles D.A., Debout G.E., Capo R.C., Christensen J.N., Davis S.R., Hanson R.B., Michelsen C.J. e Trim H.E., 1988. Mesozoic contact metamorphism in the Western United States. In: "metamorphism and crustal evolution of the Western United States", Rubey Vol. 7 (edited by Ernst W.D.). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 110-178.

Beamish, D., 1986. Geoelectric structural dimensions from magnetotelluric data: methods of estimation, old and new. *Geophysics*, 51.

Bhattacharya, P.K. and PATRA, H.P., 1968. *Direct current geoelectric sounding, principles and interpretation*. Elsevier Publishing Co.

Bhattacharya, B.A., 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarisation. *Geophysics*, 29.

Bodvarsson, G. y Eggers, D.E., 1972. The energy of thermal water. *Geothermics*, 1 (3), pp. 93-95.

Bostick, F.X., 1977. A simple and almost exact method of MT analysis. *Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration*, Snowbird, Utah.

Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti M. y Muffler, L.J.P., 1979. Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures > 90 °C, en *Assessment of Geothermal Resources of the United States* (L.J.P. Muffler, editor). U.S. Geological Survey Circular 790, pp. 18-85.

Bruno, C.A.E., Burgos, J.A. and Ayala, M.S., 1992, Agua Shuca hydrothermal eruption. Geothermal Resources Council Bulletin, pp. 361-369.

Cas R.A.F. y Wright J.V., 1987. Volcanic succession: Modern and ancient. A geological approach to processes, products and succession. Allen & Unwin, London, 528 p.

Cataldi R., Sommafuga C., 1986. Background, present state and future prospects of geothermal development. Geothermics, 15, pp. 359-383.

Crandell D.R., Booth B., Kazumadinata K., Shimosuru D., Walker G.P.L., Westerkamp D., 1984. Source-book for volcanic hazards zonation. UNESCO, Natural Hazards Serie n. 4, 97 p.

Crisp J.A., 1984. Rates of magma emplacement and volcanic output. J. Volcanol. Geothermal. Res., 20, pp. 177-211.

Custodio E. C. y Llamas M. R., 1976. Hidrología subterránea. Capitulo 10, Tomo 1. Ediciones Omega S. A., Barcelona, España.

D'Amore F. y Panichi C., 1980. Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas geothermometer. Geochim. Cosmochim. Acta 44, pp. 549-556.

D'Amore F. y Panichi C., 1987. Geochemistry in geothermal exploration, Capitulo 3 en Applied Geothermics, Economides M. y Ungemacht P., eds., John Wiley & Sons.

Davis G.H., 1984. Structural geology of rocks and regions. John Wiley & Sons, New York, 494 pp.

Dezs"O", N., 1966. The gravitational attraction off a right rectangular prism. Geophysics, 31.

Di Pippo R., 1984. Worldwide geothermal power development; an overview and update. Geothermal Resources Council Bulletin, 13, pp. 4-16.

Dobrin, M.B., 1976. Introduction to geophysical prospecting. McGraw Hill Book Co.

Ellis, A. J., 1979. Explored geothermal systems, en Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (Barnes, H.L., ed.), Wiley, Nueva York, pp. 632-683.

Ellis, A. J. y Mahon, W. A. J., 1977. Chemistry and geothermal systems. Academic Press, Nueva York.

Ervin, P. C., 1979. Reduction to the magnetic pole using a fast fourier series algorithm. Computers and Geosciences, 2.

Fournier, R. O., 1981. Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. Capítulo 4 en Geothermal Systems: Principles and Case Histories (Ryback, L y Muffler L. J. P., eds), Wiley, Nueva York, pp. 109-143.

Fournier R.O., Sorey M.L., Mariner R.H. y Truesdell A.H., 1979. Chemical and isotopic prediction of aquifer temperatures in the geothermal system at Long Valley, California. J. Volcanol. Geoth. Res. 5, pp. 17-34.

Fournier, R. O. y Potter, R. W. II., 1982. A Revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geothermal Resources Council, Bull. 11 (10), pp. 3-12.

Fournier, R. O., 1992. Water geothermometers applied to geothermal energy. Capítulo 2. Guía: Applications of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development, de la Serie Editada por el Centro sobre Fuentes Pequeñas de Energía, UNITAR, Organización de las Naciones Unidas, en imprenta.

Fournier, R. O., 1989. Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters. Reporte No. 10, 1989, Programa de Entrenamiento en Geotermia, Universidad de las Naciones Unidas/Orkustofnun, Reykjavic, Islandia.

Fournier, R. O. y Truesdell, A. H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochim. Cosmochim. Acta 37, pp. 515-525.

García E. G., 1990. Comentario sobre el uso del flujo de calor como método de exploración geotérmica. Informe Interno, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, C.F.E., Morelia, México.

Garduño V.H. y López A., 1986. Fracturamiento en campos geotérmicos. Geotermia, vol. 2, no. 3, pp. 277-296.

Garnish J.D., 1987. Introduction to the EEC-US workshop on hot dry rocks. Geothermics, 16, pp. 323-329.

Gat J.R. y Gonfiantini R., eds. 1981. Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Technical Report Series No. 210, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, Austria.

Geophysics Research Forum, U.S. National Research Council, 1986. Active tectonics. National Academy Press, Washington D.C., 263 p.

Giggenbach, W. F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. Geochim. Cosmochim. Acta 52, pp. 2749-2765.

Giggenbach, W. F. y Glover R. L., 1989. Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Report CD2401, Chemistry Division, DSIR, Petone, New Zealand.

Giggenbach W.F. y Stewart M.K., 1982. Processes controlling the isotope composition of steam and water discharges from steam vents and steam-heated pools in geothermal areas. Geothermics-11, pp. 71-80.

Goldstein, N.E., 1988. Subregional and detailed exploration for geothermal-hydrothermal resources: Geotherm. Sci. & Tech., v. 1, n. 4, pp. 303-431.

González J., Meza F., López F. G., Cervantes M., 1985. Manual de métodos de muestreo y análisis de fluidos geotérmicos de Cerro Prieto. Informe IIE/11/1894/I 03/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Grant, M. A., Donaldson, I. G. y Bixley, P. F., 1982. Geothermal reservoir engineering. Energy Science and Engineering: Resources, Technology, Management/An International Series (Denton, J. ed.), Academic Press, 1982, 369p.

Griffiths, D.H. and KING, R.F., 1969. Applied geophysics for engineers and geologists, Pergamon Press.

Hagedoorn, J.G., 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. Geophysics, 7.

Hanna, W.F., 1987, Geologic applications of modern aeromagnetic surveys: U.S. Geological Survey, Bulletin 1924.

Hatererly, P.J., 1982. A computer method for determining seismic first arrival times. Geophysics, 52.

Henley, R. W., Truesdell, A. H. y Barton, P. B. Jr., 1984. Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. Reviews in Economic Geology, Vol. 1 (Robertson, J.M., Ed.), Society of Economic Geologists (E. U. A.), 268p.

Iakubovskii, V. and Liajov, L., 1980. Exploración eléctrica. Editorial Reverte S.A. España.

Jaeger J.C., 1968. Cooling and solidification in igneous rocks. In: "basalts: the poldevaart treatise on rocks of basaltic composition", Vol. 2 (edited by Hess H.H. & Poldevaart A.). Interscience, New York, pp. 505-536.

Kelsey, J.R. and C.C. Carson, 1987, Geothermal drilling: Geothermal Science and Technology, Vol. 1, n. 1, pp. 39-62.

Lowell R.P., 1992. Hydrothermal systems. In: "encyclopedia of earth system science". Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publisher, pp. 547-558.

Marrett R. y Allmendinger R.W., 1990. Kinematic Analysis of Fault Slip Data J. Struct. Geol., 12, pp. 973-986.

Mooney, H.M., 1977 Handbook of engineering geophysics. Bison Instruments, Inc.

Muffler, L.J.P. y Cataldi, R., 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics, Vol. 7, No. 1, pp. 53-90.

Nathenson, M. y Muffler, L.J.P., 1975. Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas, en Assessment of geothermal resources of the United States-1975 (White, D.E. y Williams, D.L. Edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 104-121.

Nieva D. y Nieva R., 1987. Developments in geothermal energy in México, part twelve- A cationic composition geothermometer for prospection of geothermal resources. Heat Recovery Systems & CHP 7, pp. 243-258.

OLADE, 1978. Metodología de exploración geotérmica. Fases de Reconocimiento y prefactibilidad. Serie: Documentos OLADE No. 1. Quito, Ecuador.

OLADE, 1979. Metodología de la exploración geotérmica. Fase de Factibilidad. Serie: Documentos de OLADE No. 5. Quito, Ecuador.

OLADE, 1980. Metodología OLADE para la explotación geotérmica. Serie Documentos de OLADE. Quito, Ecuador.

OLADE/BID, 1993. Guía para la evaluación del potencial energético de zonas geotérmicas durante las etapas previas a la factibilidad. Serie: Documentos de OLADE. Quito, Ecuador.

Orange, A.S., 1990. Geophysical exploration for selected geothermal targets. Geothermal Energy Research and Development Co.

Petit J.P., 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. J. Struct. Geol., 9, pp. 597-608.

Plouff, D., 1976. Gravity and magnetic field of polygonal prisms and applications to magnetic terrain corrections. Geophysics, 41.

Razo A. y Romero R., 1991. Geothermal resources and provinces in Mexico. In G.P. Salas (ed.) "Economic Geology, Mexico", Geological Society of America, The Geology of North America, Vol. P-3, pp. 15-21.

Rijkswaterstaat., 1975 Standard graphs for resistivity prospecting. European Association of Exploration Geophysicists.

Shaw H., 1985. Links between magma-tectonic rates balances, plutonism and volcanism. *J. Geophysics. Res.*, 90, 11275-11288.

Sheppard S.M.F., 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters. "Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes", Valley J.W., Taylor H.P. Jr., O'Neil J.R. (eds.). *Reviews in Mineralogy*, Vol. 16, Mineralogical Society of America.

Sheriff, R.E., 1984. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. Society of Exploration Geophysicists.

Talwani, M. and Worzel, J.L., 1959. Rapid computations for two dimensional bodies. *J. Geophysics*, 10.

Telford, Gelart, Sheriff, and Keys., 1976. *Applied geophysics*, Cambridge University Press.

Truesdell, A. H., 1975. Resumen de la sección III de geochemical techniques in exploration. *Actas del 2o. Simposio sobre Desarrollo y Utilización de Energía Geotérmica*, Pisa, 1970.

Truesdell A.H., Nathenson M. y Rye R.O., 1977. The effects of subsurface boiling and dilution on the isotopic compositions of Yellowstone thermal waters. *J. Geophysics Res.* 82, pp. 3694-3704.

Vozoff, K., 1986. The magnetotelluric method. Society of Exploration Geophysicists. *Geophysical Reprint Series* 5.

Watsen J. C., 1978. Sampling and analysis methods for geothermal fluids and gases. Documento PNL-MA-572, Batelle Memorial Institute.

White, D. E., 1970. Geochemistry applied to the discovery, evaluation and exploitation of geothermal energy resources. *Actas del 2o. Simposio sobre Desarrollo y Utilización de Energía Geotérmica*, Pisa, 1970. Edición Especial de Geothermics, Vol. 1, pp 58-80.

Wright, P.M., Ward, S. H., Ross, H.P. and West. R.C., 1985. State-of-the-art geophysical exploration for geothermal resources. *Geophysics*, Vol. 50, pp. 2666-2699.



*gll*

CASILLA 6413 C.C.I., FAX (593-2) 539-684, TELEX 2728 OLADÉ, TELEF. 538-280, QUITO - ECUADOR

Quito, February 15, 1991  
DEIC-0504/91

MR. PHILLIP M. WRIGHT  
Technical Vice-President  
University of Utah  
Research Institute  
Salt Lake City, Utah 84108-1295

Subject: Elaboration of Guides for Geothermal Energy

Dear Mr. Wright:

We are pleased to inform you that the Latin American Energy Organization (OLADE) and the Inter-American Development Bank (IDB) have drawn up a technical cooperation agreement in order to strengthen the capacity of Latin American and Caribbean countries to develop their Region's energy.

Subprogram IV, entitled "Geothermal Energy Development", has been included in this agreement. Its purpose is to elaborate new guidelines aimed at directing the Region's countries in the research and exploitation of geothermal energy projects. We are well aware of your wide experience in geothermal energy activities in your country and other parts of the world and would therefore very much appreciate your sending us an updated curriculum vitae, should you be interested in forming part of the group of experts who will be participating in preparing the guidelines.

The guidelines that we intend to elaborate are aimed at the following:

- Geothermal Reconnaissance Studies
- Geothermal Prefeasibility Studies
- Geothermal Feasibility Studies
- Projects for Investment in Geothermal Power Plants and Plants Using Direct Heat
- Operation and Maintenance of Geothermal Energy Plants and Fields
- Evaluation of Energy Potential in Geothermal Areas and Fields

These guidelines should be complemented by the necessary computer programs for data processing in geophysics, geochemistry, simulation of reservoirs, etc.

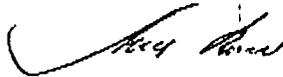
The project would be carried out with the participation of 14 experts in the different disciplines of geothermal energy. The activities that would be developed are:

- Analysis of existing methodologies
- A one-week meeting, to be held in Quito, Ecuador, in order to define the work activities that would be necessary in preparing the new guidelines, how they would be elaborated, and who would be participating in their elaboration
- Elaboration of the guidelines, according to each expert's specialization
- Compilation of the guidelines by the three work group coordinators
- Preparation of the final drafts of the guidelines by the group coordinators
- A second meeting of coordinators in Quito, Ecuador
- Participation in the dissemination of the guides, with attendance at three workshops and one conference in Quito

DETC-0504/91  
Page 2

For the project's implementation, which commences in June 1991 OLADE and IDB have planned to hire 3 group coordinators, 4 international experts, and 7 national experts. In accordance with the schedule of activities (Annex), the experts will carry out their work in various phases, mainly in their own home countries, and it is expected that it would be concluded within one and a half years.

Sincerely yours,

ALEXIS RIVERO  
Technical Director

Enclosure



MEMO TO: DAN DAHLO JOHNSON

FROM: MIKE WRIGHT

SUBJECT: VISIT TO INDONESIA

February 4, 1992

1. How critical is it that I visit Wayang Windu and Patuha? Could this be done on 10 or 12 February, either before or between appointments to review the data? These areas seem to be close to Jakarta. Maybe there would be enough time to visit only one -- in this case, Wayang Windu would probably be the best choice.
2. We want to make sure that you are applying for all data on both Wayang Windu and Patuha -- your FAX to Hutterer mentioned only Wayang Windu.
3. Where are you staying and what are you paying? It would seem to be advantageous for me to stay at the same place, even at higher cost. What do you think about this?
4. Do I need any shots?
5. What is the time difference between Jakarta and Los Angeles?
6. What frequency and voltage is the power in Indonesia? What are the plugs shaped like?
7. I will be bringing a note-book PC with me as well as a 8mm video camera. Will I have any problems getting these items into or out of the country?

QUESTIONS THAT NEED ANSWERS  
INDONESIAN GEOTHERMAL CONCESSIONS

GENERAL

1. What is the game plan for negotiating a power-purchase agreement, with whom, what part will partners play, how long will it take, what price per kwh can we expect, is there a pro forma agreement we could obtain, what type of agreement will it be (BOO, BOOT, etc), what are published avoided costs, how is the Unocal contract priced, what would be the term of the agreement, how much could be financed through Indonesian banks, how about repatriation of money? Are counter trade arrangements expected?
2. What part will our partners play, how will we interact with them, what kind of assistance can we expect from them, will they provide some of the financing, will they finance or partly finance the feasibility work, what politics are involved in their participation (do we have to use any certain subcontractors, etc)?
3. What permits are needed, who are they obtained from, how long do they take to acquire, what is the cost of each permit for:
  - a. exploration work
  - b. drilling, both small exploration rig and big rig
  - c. road construction
  - d. power plant construction
  - e. fluid gathering system piping
  - f. transmission line construction
  - g. waste and water disposal
4. What import/export duties and/or taxes are imposed on equipment, both equipment brought in permanently and equipment brought in for the project and taken back out of the country after use?
5. What is the availability of local subcontractors and partners?
  - a. Environmental firms
  - b. Legal firms
  - c. Land firms
  - d. Risk-oriented banks or firms -- Asian Development Bank, local banks to work with
  - e. Construction contractors -- excavation, concrete, road building, plant construction
  - f. Chemical and other similar services
  - g. Drilling and service contractors
6. What U.S. Government offices are maintained in Indonesia or nearby that handle Indonesian affairs:
  - a. U.S. Embassy
  - b. U.S. AID mission
  - c. U.S. Department of Commerce
  - d. Chambers of Commerce

7. What is the availability and cost of office space in Jakarta and other parts of the country nearby the concessions? What is the cost of space, phones, secretaries, copying facilities and other items of office equipment? Will we have to have our own offices, is it advisable that we do, or is it preferable to have space with a partner? What about warehousing, equipment transfer etc. What about security -- how big a problem is it?

8. What "under-the-table" payments are expected, to whom, how often, how much, and how can we stay clean?

9. Regarding exploration field work, what is the availability of trained people to do geological, geochemical and geophysical field surveys, what is the cost, what quality is to be expected, how timely is the response.

10. Regarding drilling,

a. What is the availability of core rigs, small rotary rigs, production-size rigs and workover rigs?

b. Could Pertamina drill for us? Would we want them to do this?

c. What are typical rig costs, mud costs, bit costs, etc?

11. Where are the best port facilities and how good are they? What about crane capacities, longshoremen and other labor. What are labor rates?

12. What is the schedule for an expected response from us re our desire to go ahead with project feasibility?

#### FOR EACH CONCESSION

1. What sort of development schedule will the Indonesians expect us to maintain?

2. What concession payments will be expected beyond the initial \$5,000 and on what schedule?

3. Are there regional differences in permits, taxes, duties that affect work on any concession?

4. What is the terrain and road access for equipment? What are the possibilities and costs for upgrading roads?

5. What are the details of the transmission grid, including extra capacity? Are there access fees? Will there be a need for construction of new power lines or will the government of Indonesia bring power lines in? How much power line might we have to furnish, what are construction costs? Will we have to furnish substations, what are costs?

6. What is the availability of potable and drilling/construction

water?

7. What maps are available? Need maps of roads, topography, vegetation, rivers and springs, land ownership, areas of environmental sensitivity,

8. What is exact land ownership, how does one acquire a lease or other permission to proceed from surface owner, what are the costs, what is the usual time frame, what government approvals are necessary?

9. What exploration data are available, how can its quality be judged, are we expected to furnish any more surveys, what are they, what do the Indonesians think of the concession in terms of risk of developing a geothermal power plant?

# Journal

## Mining Week 80

□ Chairman of British Steel suggests that Alumax might examine the prospects of the Invergordon aluminium smelter, whilst recent report is optimistic on metal's outlook. □ Representatives of Australia's mining industry make submissions for fundamental reform to Industries Assistance Commission. □ Harbinson group proposes new Quebec gold mine following successful commissioning of its Cullaton Lake property. □ People's Republic of China forms Energy Development Corporation, to develop the country's coal and other natural resources. □ Japan and Australia close to final agreement on nuclear safeguards issue.

## Metal Markets 82

### Methods and Machines 83

Geoset drill diamond; Micro-processor based ore sorting; W. German diesel driven trucks; Wet high intensity magnetic separator; Swedish companies join forces.

### Industry in Action 85

Ansil drilling results; Indonesian survey; Exxon project delay; Lake Way approval; Japanese interest in Coral Canyon mine; Inco cuts back in Indonesia; Billiton Bauxite to cut Surinam output; Cominco cuts zinc output; Guyana falls short of target; Gas Hills uranium agreement.

## Company News 88

□ Difficult year for Teck Corporation with low metal prices cutting profits from its metal mining subsidiaries. Reserves at Schaft Creek rise to 1.0 Bt of ore. □ Consolidated Murchison enjoys a good year after a strong final quarter but other South African base metal producers fare less well. □ Higher operating costs and reduced contribution from Falconbridge Nickel pose problems for McIntyre Mines. □ Group restructuring for the Manville Corporation. □ Mixed results from the Anglo Group South African gold mines in the final quarter of 1980. □ Fourth quarter earnings slump for Alcoa and Alcan.

## Latin America — Mineral Cornucopia

FOR CONVENIENCE, the aggregate of those lands lying south of the U.S.-Mexican border are commonly referred to as Latin America. Many of the constituent countries have considerable populations and extreme poverty is endemic in many regions. There is also much wealth, albeit all too frequently this is narrowly held. Latin America also has a justifiable reputation for political instability. Bolivia, for instance, has had about one political coup or its equivalent each year on average since it attained independence from Spain in the first half of the 19th century.

This vast (19.5 Mkm<sup>2</sup>) sector of the Western Hemisphere shows remarkable geographical and social/political differences and although the same might be said of many other parts of the globe of comparable size and population, many of its physical features are most impressive nevertheless. It embraces one of the world's largest countries, ie Brazil, and South America contains a rain forest so large that it has a material effect on the world's climate. Its far western parts are dominated by one of the globe's greatest mountain ranges whose eastern slopes give birth to the Amazon and other mighty rivers. West of the Andes are found some of the world's most arid deserts which in the distant past were tamed by pre-Inca civilisations.

Latin America is of course also a metal and mineral treasure house, a fact that first became apparent to the Old World via the rapacious Conquistadores in Peru, Mexico and elsewhere whose pillaging of gold and silver Inca and Aztec artifacts soon extended to control over the primary sources of these precious metals.

Today gold and silver feature far less prominently overall, although Mexico and Peru still retain a leading position in the silver league table. Of more significance in these closing years of the 20th century is Latin America's contribution to the international supply of copper, and other base metals, iron ore, bauxite and a vast range of sundry metalliferous commodities. By and large energy minerals (barring Venezuelan oil) have made a less impressive showing and this must be of growing concern, although the relatively recent discoveries of massive oil fields offshore from Mexico have transformed the country's economic prospects.

This Latin American mineral panorama has recently been the subject of a comprehensive report by the Bureau of Mines of the U.S. Department of the Interior\*. It forms the last of the current series of Mineral Perspectives. These have been examining and analysing the mineral industries of many nations and giving an insight into their roles in world mineral supply and demand.

Inevitably perhaps, a study of this nature with a relatively long gestation period is likely to present statistical detail which is not entirely up to date. "Mineral Industries of Latin America" suffers slightly on this score (1979 is generally the cut-off year) but this does not detract from the interest provided by the text and tabulation concerning the 34 countries reviewed. Sensibly, the study has not strictly adhered to the general concept of what is "Latin America" and includes the Caribbean countries, thus ensuring that such mineral rich nations as Jamaica (bauxite), The Dominican Republic (gold, silver, nickel, bauxite) and Cuba (nickel, cobalt and chromium) are not overlooked. For regional completeness the Bahamas and Bermuda are also embraced.

Argentina takes precedence on an alphabetic basis and ranks second and third respectively in terms of land area and population, after Brazil and Mexico. However, its mining industry falls well short of what might be expected from what is known of its mineral potential. This is something of an enigma although a thoroughly outmoded mining code has been a real impediment. As the USBM survey remarks, mining is still in an incipient stage of growth with output dominated by construction materials (about 90%). It should be mentioned though that the country is Latin America's third largest producer of petroleum and natural gas, after Mexico and Venezuela. It is also the major producer within the region of boron and uranium.

At the moment mineral output accounts for less than 1% of the gross domestic product. The relatively recent formulation of more pragmatic mining legislation should help to increase this percentage in future although this advance may be stalled for the time being because of international recessionary influences. In due course though

Argentina should become a significant producer of ferrous and non-ferrous metals (notably copper).

### Bolivia Struggles

Sidestepping the Bahamas, Bermuda and Barbados the next country with a significant mining industry is Bolivia. The study remarks that this land locked and politically turbulent country (even by Latin American standards) ranks fourth in the world as a tin producer and is overwhelmingly in first place in the South American context. It is also the world leader in antimony output and is a major tungsten producer. Bolivia's recorded mining history dates back to the first discovery by the Spaniards of the fabulous silver deposit at Cerro Rico de Potosi in the 16th century and to this day metal/mineral exports are of key importance from foreign exchange earning considerations, albeit their relative importance vis à vis gross national product has declined with the development of other industries. Bolivia's future growth as a mining country is clouded by political instability and lack of substantial domestic and foreign investment (which is a linked issue).

Potentially the prospects are promising however, despite the decline of the traditional mining areas; major new mineral deposits almost certainly remain to be discovered given a suitable political climate and incentives for primary exploration.

Brazil stands as the giant of Latin America in respect of land area (8.5 Mkm<sup>2</sup>), population (120 M) and, arguably, with regard to its mining industry. While it cannot match Chile's pre-eminent position in copper it is the co-leader with Australia in iron ore production and is the world's greatest producer of niobium and, more exotically, natural quartz crystal. It is also a major producer of manganese, bauxite-alumina-aluminium, ferro alloy material and gold. Copper production is a weak spot but this will surely improve substantially before long. Brazil's potential as a tin producer is also far from being realised, but here too the future could see a major change.

Overall, the Brazilian mining industry yields some 75 mineral commodities of which 27 are metallic in nature. In terms of value the country's leading products are petroleum and iron ore. Notwithstanding this position for oil, Brazil's major weakness in mineral resources is in the energy sector and the need to import much oil is a serious economic drag.

### For Copper Read Chile

Geographically, Chile is a remarkable country. It extends from about latitude 18°S to 55°S (in the region of Cape Horn) yet rarely spans more than 300 km east-west. The bulk of its land is either highly mountainous or comprises some of the world's most arid deserts. In great contrast, parts of the south are famed for the softer beauties of pine forest and lakes. From a mining standpoint Chile is almost synonymous

with copper, being the world's largest producer after the U.S. and the world's greatest exporter of this metal.

Chile also takes pride of place in Latin America as a producer of molybdenum and, as the USBM survey remarks, is a notable producer of vanadium, silver and natural nitrates as well as having significant iron ore and petroleum/natural gas production. Nevertheless, Chile's economy seems likely to remain heavily dependent on copper production and exports for the foreseeable future. The present military government, while essentially autocratic, has adopted a realistic policy for economic development — notably in respect of private sector and overseas investor participation. The result is that Chile is now in a better position to optimise its mineral wealth and broaden its mining and general industrial base than for many years past.

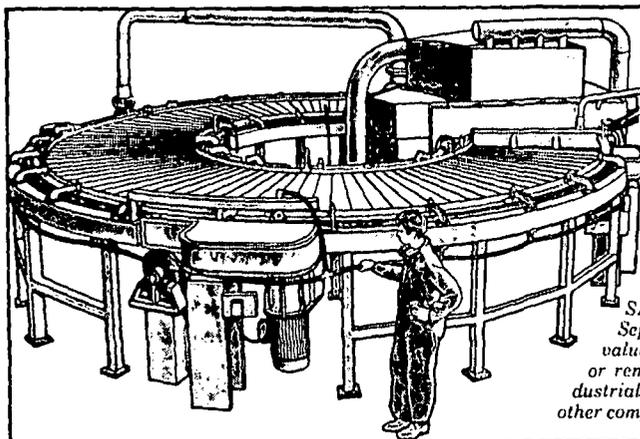
### More than Emeralds

Colombia has, in the minerals context, been principally identified as the world's greatest producer of high quality emeralds. Of far greater economic significance is the country's future role as a coal producer. It already ranks second in this respect within Latin America and may emerge before the end of the century as one of the world's leading coal exporters. The basis of this production and trade will be the massive El Cerrejon deposits, now under intensive development with major overseas participation (Ixxon). The Cerro Matoso nickel deposit will be another important, if lesser, component of the Colombian mining industry in due course helping to increase mining's share of the GDP from its current paltry 1%. In the longer term significant developments in regard to asbestos, copper, bauxite, uranium and phosphate may be anticipated.

Pursuing the alphabetic sequence, suffice to say that Costa Rica's mining industry is only of minor importance and seems likely to remain so in the medium term at least. Cuba is clearly important for its nickel and cobalt output; this, coupled with substantial sugar production, being the essential counterpart in kind to massive economic assistance by the Soviet Union.

The Dominican Republic is Latin America's second largest nickel producer, after Cuba, and a significant producer of gold, silver and bauxite. However, its major nickel producer, Falconbridge Dominicana announced temporary closure earlier this month (*MJ*, January 15, p.50). Dominica (the small independent Caribbean island state), Guadeloupe and Martinique have no internationally important mining industries at present.

Ecuador's mineral industry is dominated by petroleum production but there is some base metal and associated gold and silver output — this being derived chiefly from the La Plata copper/zinc mine northwest of the capital, Quito. El Salvador's mining sector is insignificant, as is that of French Guiana.



## High Gradient Magnetic Separation can do more.

SALA has experience, advanced technology and modern production facilities for the manufacture of equipment for grinding, pumping, mineral dressing, solid/liquid separation and agglomeration.

SALA also delivers process systems and packages. SALA is represented world wide. Contact us for further information.

*SALA's High Gradient Magnetic Separators extract more of the valuables in the fine particle ranges, or remove more impurities from industrial minerals or water than any other comparable system.*

# SALA

Sala International AB S-73300 Sala Sweden  
Tel. 0224-13220 Telex 7536  
An Allis-Chalmers Company.

Guatemala's mining industry is described by the USBM as in the incipient growth stage. Since the report was prepared, however, this growth has been severely stunted by the closure of Inco's Exmibal nickel operations for economic (principally high energy cost) and market reasons. Aside from nickel the country also has antimony resources.

### The Bauxite League

Guyana, has abundant resources of bauxite and the extraction and export of this raw material and its derivative, alumina (which falls under state control) represents the bulk of its mining sector. There is also a small output of gold and diamonds. Bauxite also constitutes the core of Haiti's mining industry but there has been a decline in activity in recent years (the reserves are only marginally profitable) and this Caribbean country remains one of the most impoverished in "Latin America".

The island state of Jamaica is another bauxite producer but it is a giant in the field; being not only Latin America's largest producer of aluminium raw material but second ranking (with Guinea) in the world league after Australia. The current international recession and the dire effects this is having on the aluminium industry worldwide have had severe repercussions for the Jamaican industry. Even so, the extensive reserves and highly developed infrastructure suggest that the long term future of the Jamaican bauxite/alumina industry is relatively secure.

### Mexico: Metals and Oil

Mexico's position as a major mining country is well established. Over the past few years it has also emerged as a leading oil producer, following the development of massive offshore fields in the Gulf of Mexico. Mexican mines produce a very wide range of products and the nation is the world leader in primary silver output, fluor spar and strontium. Within Latin America, Mexico is also one of the leading producers of copper, gold, iron ore and coal and has major outputs of lead, zinc, cadmium, antimony and sulphur. In all, some 18 significant metallic minerals are produced, plus 28 non-metallic minerals. One of the most significant mining developments is the La Caridad copper project, which should take Mexico into the top league of world refined copper producers in the second half of the 1980s.

As a result of the Mexicanisation laws applicable to non-fuel minerals introduced in 1961 and substantially amended in 1975, much of the industry comprises fully state owned companies, or those having majority or significant government equity. Foreign interests (mostly U.S., Canadian or Japanese) have minority positions in some cases but their role has been transformed since the immediate post World War II period when 95% of Mexico's non-fuels mineral industry was in foreign hands.

Nicaragua's mining industry is of minor importance to its domestic economy and is insignificant in the general Latin American context. The same must be said for Panama although the country has considerable potential as a future copper producer via the well known Cerro Colorado deposit. The final decision to go ahead with the full development of this very large but low grade porphyry deposit as a joint venture between the state mining agency (Codemin) and RTZ of London has been deferred however; the current state of the copper market is clearly a contributory cause for hesitation. Paraguay also has no current mining of importance and there are few signs that this could change in the near future.

### Peru's Diverse Wealth

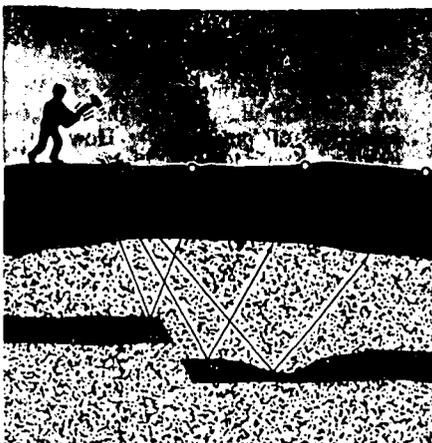
In complete contrast is Peru, which the USBM justifiably describes as being amongst the world's most important mining nations. It is a major producer of silver, zinc, lead, copper, and lesser amounts of such important by-products as bismuth, cadmium, indium, selenium and tellurium. In the Latin American sphere Peru leads in zinc and comes second in silver, copper and bismuth. It is co-leader with Mexico in lead output. Mineral reserves are equally impressive and the mining industry accounts for about 10% of GDP. Most of the largest mines (barring Southern Peru Copper Corp.) are state owned/controlled but recent changes to the mining code allow for easier foreign and private participation in the development of one of the globe's most promising mineral regions.

Suriname, in northeastern South America, is only notable in mining for its bauxite industry and thus is comparable with its neighbour Guyana. It ranks fourth in the world in bauxite output and second in Latin America. Exports account for some 30% of GDP. For the time being Trinidad and Tobago has no significant non-fuel industry but is Latin America's fourth largest oil producer.

Returning to the mainland, Uruguay has no mining industry of international significance. This certainly cannot be said for Venezuela which, while chiefly notable for its oil production, is also Latin America's second largest producer of iron ore. There are ambitious plans to exploit further the country's known resources of coal, bauxite, and gold.

The foregoing remarks about the many mineral industries of Latin America necessarily contain little of the detail that is presented in the USBM's report and in the country profiles presented from time to time in *Mining Journal* and, of course, in *Mining Annual Review* each June. This brevity does however allow Latin American mining activity to be seen as a whole and thereby, more readily appreciated in terms of its overall importance in the total provision of the world metal and mineral needs now and in the future.

\*\*"Mineral Industries of Latin America", Bureau of Mines — United States Department of the Interior. Available for sale by the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.



## SEISMOGRAPHS FOR MINERAL EXPLORATION

If you're doing shallow geologic investigations for mining, depth-to-bedrock, weathering corrections, construction, geologic exploration or other applications where a clear picture of the substrata is needed — Geometrics has the right seismograph for the job. Call or write for complete product information and a free copy of Technical Report #19.

**EG&G  
GEOMETRICS**

395 Java Drive, Sunnyvale, CA 94086 U.S.A.

TEL: (408) 734-4616 • TELEX: 357-435 • CABLE: "GEOMETRICS" Sunnyvale

*El Salvador*

OLADE

CEAC

LISTA DE PARTICIPANTES EN LA EXPOSICION TECNICA  
DEL SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE  
PERSPECTIVAS GEOTERMICAS  
EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE

8 AL 11 DE OCTUBRE DE 1990  
HOTEL PRESIDENTE.

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, AMERICA CENTRAL

- [MODULO No] M-1  
 [EXPOSITOR] FORAMINES, Francia.  
 [RESUMEN] Servicios de Perforación para la Industria Geotérmica.
- [MODULO No] M-2  
 [EXPOSITOR] CICESE, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.  
 [RESUMEN] Servicios de Investigación Científica y de Enseñanza Superior.
- [MODULO No] M-3  
 [EXPOSITOR] IIE, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.  
 [RESUMEN] Servicios de Investigación Científica y Tecnológica para la Industria Eléctrica.
- [MODULO No] M-4  
 [EXPOSITOR] PHOENIX GEOPHISICS LIMITED, U.S.A.  
 [RESUMEN] Equipos y Estudios Geofísicos para Exploración. Equipos y Estudios Magnetotelúricos MT.
- [MODULO No] M-5  
 [EXPOSITOR] ISSCO, El Salvador.  
 [RESUMEN] Materiales y Aditivos Químicos para Perforación y Cementación de Pozos. Equipo Herramientas y Accesorios para Perforación de Pozos. Accesorios de Cabezal, Válvulas Maestras y Accesorios de Control de Conducción de Fluidos Geotérmicos.
- [MODULO No] 6-9  
 [EXPOSITORES] HYDRIL, TAMSA Y TUCOTA, México.  
 [RESUMEN] Empresas Mexicanas en Apoyo a la Industria Geotérmica en América Latina.
- [No 6] HYDRIL  
 Rosca Especial Hydril para la Tubería de Perforación y Revestimiento.
- [No 7-8] TAMSA  
 Tubos de Acero sin Costura para Revestimiento, Perforación de Pozos y Conducción de Fluidos.
- [No 9] TUCOTA  
 Maquinado de Ranura para Tubería de Revestimiento.

[MODULO No] M-10  
[EXPOSITOR] FUJI ELECTRIC Co.Ltd. Japan.  
[RESUMEN] Fabricante de Plantas Geotérmicas, Hidroeléctricas y Nucleares, así como de Sistemas y Aparatos Electrónicos.  
Como fabricante de plantas geotérmicas FUJI ha ganado reconocimiento mundial y esta agresivamente promocionando el desarrollo tecnológico de los recursos geotérmicos, solucionando uno de los más importantes problemas del mundo: la energía a través de la diversificación de los recursos energéticos.

[MODULO No] M-11  
[EXPOSITOR] ORMAT  
[RESUMEN] Plantas de Ciclo Binario que Utilizan Recursos Geotérmicos.

[MODULO No] M-12  
[EXPOSITOR] COPERLASA, Constructora y Perforadora Latina, S.A, México.  
[RESUMEN] Breve Historia de la Compañía en los diversos Objetivos de Perforación, tanto Nacional como Internacional.  
Exposición de Fotografías de los diversos equipos, en algunos de los Campos donde ha Perforado Constructora y Perforadora Latina.

[MODULO No] M-13  
[EXPOSITOR] SWISSBORING OVERSEAS CORP., Guatemala.  
[RESUMEN] PERFORACIONES:  
Para Investigación de Represas y Túneles.  
Centrales Eléctricas, Fundaciones de Obras.  
Civiles, Obras Portuarias, Aeropuertos.  
Explotación Geotérmica y Minera.  
Perforación a Diamante.  
INYECCIONES:  
Inyecciones para Impermeabilización y Consolidación en Rocas, Suelo y Aluviones para Represas, Túneles, Canales, Embalses usando Lechadas Coloidales de Cemento.  
Productos Químicos Especiales.

[MODULO No] M-14  
[EXPOSITOR] CEAC, Consejo de Electrificación de América Central, El Salvador.  
[RESUMEN] El Consejo de Electrificación de América Central (CEAC) es un organismo regional de cooperación, coordinación e integración cuya finalidad principal es lograr el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos de los estados miembros, por medio de una eficiente, racional y apropiada generación, transmisión y distribución

de la energía eléctrica entre los países de América Central.

[MODULO No] M-15

[EXPOSITOR] OLADE

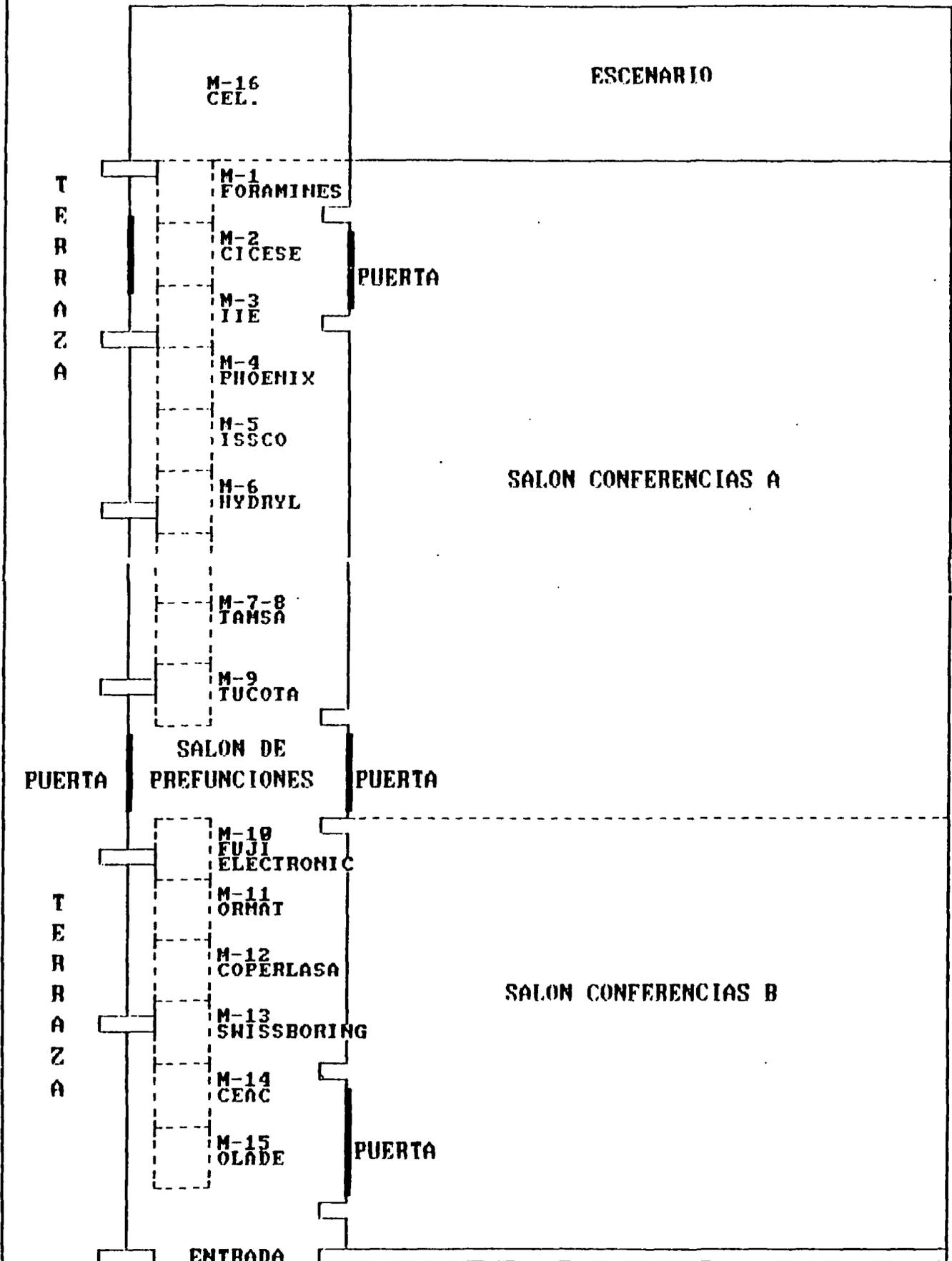
[RESUMEN] La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) es una Entidad Pública Internacional de cooperación, coordinación y asesoría, cuyo propósito es la integración, protección, conservación, aprovechamiento racional, comercialización y defensa de los recursos energéticos de la región.

[MODULO No] M-16

[EXPOSITOR] CEL, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa.

[RESUMEN] La Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa es una Empresa Autónoma que tiene por objeto desarrollar, conservar, administrar y utilizar los recursos energéticos y fuentes de energía de El Salvador.

# DISTRIBUCION DE MODULOS



NOTA: DIAGRAMA NO A ESCALA

LISTA DE PARTICIPANTES AL SEMINARIO INTERNACIONAL  
SOBRE PERSPECTIVAS GEOTERMICAS EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE .

LIST OF PARTICIPANTS TO THE INTERNATIONAL SEMINAR ON GEOTHERMAL  
PROSPECTS IN LATIN AMERICAN AND THE CARIBBEAN

- 1 Alfaro, Guillermo  
ISSCO S.A. de C.V.  
89 Ave. Norte y 13 C. Poniente 4606  
Col. Escalón, San Salvador, El Salvador.
- 2 Almeida, Eduardo  
Instituto Ecuatoriano de  
Electrificación  
Ave. 6 de Diciembre 2427 y Ave. Orellana  
Quito, Ecuador.
- 3 Alvarado, Alexis  
Instituto Costarricense de  
Electricidad  
Aptdo. Postal 10 032-1 000  
San Jose, Costa Rica.
- 4 Conde Benavides, Rigoberto  
Import & Export  
El Salvador
- 5 Andaluz Carmona, Juan Ignacio  
Comisión Federal de Electricidad  
Alejandro Volta 655 Col. Electricista  
58290 Morelia Mich. Mexico.
- 6 Auguste, John  
Ministerio de Finanzas  
Grenada.
- 7 Barrera, Gabriel  
Tubos de Acero de Mexico S.A.,  
Campos Eliseos 400  
11600 Mexico D.F., Mexico.
- 8 Arias Flores, Rebeca  
PNUD  
El Salvador
- 9 Buendía Domínguez, Eduardo  
Instituto de Investigaciones  
Electricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 10 Alvares Vega, Jorge  
El Salvador
- 11 Caicedo, Angel Andres  
INDE  
7 Ave. 2-29 zona 9,  
Edificio La Torre, Guatemala.
- 12 Campbell, Hector  
Universidad Autónoma  
de Baja California  
Mexico.
- 13 Castro L., Francisco G.  
INCENTRO  
Aptdo. 271-1000
- 14 Sánchez Sierra, Gabriel  
OLADE  
Av. Occidental, Edificio OLADE  
Sector San Carlos, Casilla 6413 C.C.I  
Quito, Ecuador.
- 15 DiPippo, Ronald  
P.O. Box 144  
S. Dartmouth, MA 02748, USA
- 16 Mereles, Humberto  
Banco Interamericano de Desarrollo,  
BID  
El Salvador.
- 17 Esaki, Yuria  
Fuji Electric Co., Ltd.  
New Yurakucho Bldg. 12-1,  
Yurakucho 1-chome,  
Chiyoda-ku, Tokyo 100 Japan
- 18 Ferez Gánem, Jose  
TUCOTA  
Valle de las Alamedas 66, Esq. Jose  
Lopez Portillo, San Francisco Chilpan,  
Tultitlan, Edo. Mexico, Mexico.
- 19 Iraheta, Gustavo Nery  
Especialidades Industriales  
El Salvador.

- 20 Freeston, Derek H.  
Geothermal Institute, University of  
Auckland, Private Bag, Auckland,  
New Zealand
- 21 Galante, Jose María  
Dirección Nacional de Conservación  
Y Nuevas Fuentes de Energía  
Ministerio de Economía  
Argentina.
- 22 Garboza C., Alfredo A.  
LIFESA  
Ave. Universidad Centro Parque  
Carabobo, Piso 6 Of. 611,  
La candelaria, Caracas, Venezuela
- 23 Girelli, Mauricio  
ELECTROCONSUL ELC.  
Milano, Italia.
- 24 Fuentes, Roberto Antonio  
El Salvador
- 25 Castro Tous, Luis A.  
HYDRIL  
Hamburgo 213, Piso 12 Col. Juarez  
D.F. 6-868 Mexico D.F., Mexico.
- 26 Goff, Sue  
Los Alamos National Laboratory,  
P.O. Box 1663, Los Alamos,  
New Mexico, 87545, USA.
- 27 González Partida, Eduardo  
Instituto de Investigaciones  
Electricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 28 González, Raúl  
USAID  
Avenida Olímpica y 63 Ave. Sur  
San Salvador, El Salvador.
- 29 Guerra y Guerra, Rodrigo  
Servicios Tecnicos de Ingeniería  
63 Avenida Sur, Pasaje Sta. Mónica 8  
Col. Avila, San Salvador, El Salvador.
- 30 Fox, Leo  
Phoenix Geophysics  
7100 Warden Avenue,  
Unit 7 Unionville  
Ontario, Canada, L3R 8B5
- 31 Hamza, Valiya M.  
Instituto de Pesquisas Tecnologicas  
de Sao Paulo  
Brasil.
- 32 Hiriart Le Bert, Gerardo  
Comisión Federal de Electricidad  
Mexico D.F., C.P. 06500  
Mexico.
- 33 Hirschmann, Tomas S.  
Swissboring Overseas Corp. Ltd.  
10 Calle 1-89 zona 10  
Aptdo.2435, Guatemala
- 34 Cuellar, Gustavo  
Estudios Geotermicos,  
El Salvador.
- 35 Iglesias R. , Eduardo  
Instituto de Investigaciones  
Electricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 36 Iturriaga, Eduardo  
Tubos de Acero de Mexico S.A.,  
Campos Eliseos 400  
11600 Mexico D.F., Mexico
- 37 Juárez, Jorge  
INDE  
7 Ave. 2-29 zona 9,  
Edificio La Torre, Guatemala.
- 38 Lam, Luis  
Instituto de Investigaciones  
Electricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, México.
- 39 Chevez Paz, Maritza  
FIPETROL LATINOAMERICANA  
El Salvador.

- 40 López, Hector  
ISSCO S.A. de C.V.  
89 Ave. Norte y 13 C. Poniente 4606  
Col. Escalón, San Salvador, El Salvador.
- 41 Lozano, Edinson  
Instituto Colombiano de Energía  
Eléctrica  
Carrera 13 # 27-00 Piso 3,  
Bogotá, Colombia.
- 42 Merla, Andrea  
Geotermica Italiana srl  
Lunganno Mediceo, 16 56127  
Pisa, Italia
- 43 Mikashima, Kengo  
Fuji Electric Co., Ltd.  
New Yurakucho Bldg. 12-1,  
Yurakucho 1-chome,  
Chiyoda-ku, Tokyo 100 Japan
- 44 Mosley, Charles  
USAID  
Avenida Olímpica y 63 Ave. Sur  
San Salvador, El Salvador.
- 45 Arellano G., Víctor  
Instituto de Investigaciones  
Eléctricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 46 Pagoaga, Oscar Rolando  
Empresa Nacional de Energía  
Eléctrica  
Honduras.
- 47 Quintanilla, Oscar  
SUMIMOTO CORPORATION  
Paseo General Escalón 4828  
Edificio VLM 2o. Piso  
San Salvador, El Salvador.
- 48 Rivas A., Cecilia Esmeralda  
El Salvador
- 49 Razo Montiel, Antonio  
OLADE  
Ave. Occidental, Edificio OLADE  
Sector San Carlos, Casilla 6413 C.C.I.  
Quito, Ecuador.
- 50 Joly, Christian R.  
FORAMINES, S.A.  
Francia
- 51 Liguori, Paolo Emilio  
DAL Spa  
Via Privata Maria Teresa, 4  
20123 Milano, Italia.
- 52 Lima Lobato, Enrique Manuel  
West Japan Eng. Consultants, Inc.  
7a. Ave. 7-78, zona 4,  
Edificio Centroamericano  
Ofic.210, Guatemala, Guatemala.
- 53 Lippman, Marcelo  
Earth Sciences Division  
Lawrence Berkeley Laboratory  
Berkeley, Ca 94710, USA
- 54 Reyes Guerrero, Eduardo  
Instituto de Recursos Hidráulicos  
y Electrificación  
Panama
- 55 Gomez, Enrique  
Empresa Nacional de Electricidad S.A.  
Bolivia.
- 56 Rodríguez, Alejandro  
EPN, Mexico.
- 57 Romo Jones, Jose Manuel  
Centro de Investigación Científica  
y de Educación Superior de Ensenada  
Espinoza 843, Ensenada, BC, Mexico.
- 58 Santoyo, Socrates  
Instituto de Investigaciones  
Eléctricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 59 Granados, Eduardo  
GeothermEX, Inc.  
5221 Central avenue, Suite 201  
Richmond, Ca 94804, USA.
- 60 Sicuteri, Julian  
FORAMINES  
Francia.

- 61 Reguera Roa, Ernesto  
Constructora y Perforadora  
Latina, S.A. de C.V.  
Sierra Mojada # 626-1, Mexico.
- 62 Sánchez, Ismael  
Universidad Centroamericana  
José Simeón Cañas  
El Salvador
- 63 Horsman, Eric  
Embajada de Francia  
Francia
- 64 Yarimi, Ami  
Ormat turbines Ltd  
255 Glendale Ave. Suite 25,  
Sparks, NV 89431, USA.
- 65 Zelada, Marcia  
Comisión Nacional de Energía  
Teatinos 120  
Santiago, Chile.
- 66 Raygoza, Guillermo  
Constructora y Perforadora  
Latina, S.A. de C.V.  
Sierra Mojada # 626-1, Mexico.
- 67 Talavera, Emilio  
Constructora y Perforadora  
Latina, S.A. de C.V.  
Sierra Mojada # 626-1, Mexico.
- 68 Arcia Lacayo, Roger  
INE  
Nicaragua.
- 69 Portilla Salas, Felix  
Electro Perú S.A.  
Perú.
- 70 Thorhallsson, Sverrir  
United Nations University  
Geothermal training Programme  
Orkustofnum, Grensasvegi 9,  
108 Reykjavik, Iceland.
- 71 Nieva G., David  
Instituto de Investigaciones  
Electricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 72 Umaña, Federico  
Alvaro Umaña y Cia  
Costa Rica
- 73 Vaca, Jaime  
Comisión Federal de Electricidad  
Alejandro Volta 655 Col. Electricista  
58290 Morelia Mich. Mexico.
- 74 Varela Pagola, Pablo  
Ministerio de Energía y Minas  
Venezuela.
- 75 Rivera R., Jesús  
Aquater, SpA  
Italia.
- 76 Vázquez González, Rogelio  
Centro de Investigación Científica  
y de Educación Superior de Ensenada  
Espinoza 843, Ensenada, BC, Mexico.
- 77 Suárez Meneses, Jaime  
Instituto de Investigaciones  
Electricas (IIE)  
Cuernavaca, Morelia, Mexico.
- 78 Marroquín M., Roberto Armando  
FORAMINES, S.A.  
El Salvador.

79 Espinoza, Noel  
IEEE,  
El Salvador.

80 Moreno Facero, Gabriel  
Universidad Nacional Autónoma de Mexico  
Mexico.

81 Fonseca López, Hector L.  
Ingeniería y Proyectos del  
Noroeste, S.A. de C.V.  
Mexico

82 Torres Castillo, Alfonso  
Instituto Nicaraguense de Energía,  
Nicaragua.

83 Aycinena, Sergio M.  
Swissboring Overseas Corp. Ltd.  
10 Calle 1-89 zona 10  
Apto.2435, Guatemala

84 Castro Antillón, Francisco  
INCENTRO, S.A.  
Costa Rica.

## LISTADO DE PARTICIPANTES DE CEL "CELDIREC"

FECHA: Oct 11, 1990

HORA: 9:12 AM

NOMBRE	CARGO	INSTITUCION	PAIS	UNIDAD
Sigifredo Ochoa Pérez	Presidente de CEL/CEAC	C E L	El Salvador	DIRECCION SUPERIOR
Carlos Hayem Moreno	Director Ejecutivo	C E L	El Salvador	DIRECCION SUPERIOR
José Oscar Medina	Subdirector Técnico	C E L	El Salvador	DIRECCION SUPERIOR
Orlando Calderón	Subdirector Administrativo Financ.	C E L	El Salvador	DIRECCION SUPERIOR
Jorge Ernesto Rovira	Junta Directiva	C E L	El Salvador	DIRECCION SUPERIOR
Jorge Salomón Montesinos	Gerente PLANICEL (Secretario CEAC)	C E L	El Salvador	GERENCIA PLANICEL
Rodolfo Cáceres	Gerente de GEOCEL	C E L	El Salvador	GERENCIA GEOCEL
Gustavo Napoleón Chávez	Gerente DISCEL	C E L	El Salvador	GERENCIA DISCEL
Leonel Antonio Bojorquez	Auditor General Interno	C E L	El Salvador	AUDITORIA
Roberto Guillermo Villatoro Castro	Jefe Depto. de Operaciones	C E L	El Salvador	DISCEL
Abel Antonio Jiménez Deras	Analista de Contabilidad	C E L	El Salvador	FINANCEL
Aida Isabel Santana de Zamora	Jefe Area Petrología	C E L	El Salvador	GEOCEL
Aldo Mauricio Valencia Martínez	Técnico Analista	C E L	El Salvador	GEOCEL
Alejandro Campos Romero	Jefe Depto.Exploración Geotérmica	C E L	El Salvador	GEOCEL
Alejandro Fidel Serrano López	Asistente Técnico	C E L	El Salvador	GEOCEL
Alejandro Quintanilla Castro	Supte. Explotación Geotérmica	C E L	El Salvador	GEOCEL
Anabella Salaverría	Ing. químico	C E L	El Salvador	GEOCEL
Benjamín Reinaldo Monge Ramos	Geoquímico de Exploración	C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Alberto Pérez Monterrosa	Jefe Depto. Eléct.Mantto.Cent.	C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Alfredo Larín Ramos	Jefe Depto. Redes	C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Ernesto Monge Alberto	Jefe Depto.Perforación Geotérmica	C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Escobar Bruno		C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Guillermo Quiñonez Chávez	Analista Programador	C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Rafael Martínez Sáenz	Auxiliar de Petrofísica	C E L	El Salvador	GEOCEL
Carlos Roberto Pullinger Aguilar	Geólogo	C E L	El Salvador	GEOCEL
Edgardo Walter Hernández	Jefe Sección Hidrogeología	C E L	El Salvador	GEOCEL
Emperatriz a Morales	Químico - Analista	C E L	El Salvador	GEOCEL
Ernesto Vásquez Sorto	Colaborador Ingeniero Civil	C E L	El Salvador	GEOCEL
Federico Castellanos Funes	Hidrólogo	C E L	El Salvador	GEOCEL
Francisco Antonio López Ramírez	Técnico de Operación y Mantenimiento	C E L	El Salvador	GEOCEL
Fredy Alberto Pacheco Mejía	Técnico en Mediciones Geotérm.	C E L	El Salvador	GEOCEL
Guillermo Adolfo Mayorga Mayorga	Asistencia Explot. Geotérmica	C E L	El Salvador	GEOCEL
Guillermo Edberto Cacao	Químico Analista	C E L	El Salvador	GEOCEL
Guillermo Villacorta Gavidia	Asistente Depto. Exploración	C E L	El Salvador	GEOCEL
Herbert Manuel Mayorga Leaus	Ingeniero Mecánico de Perforación	C E L	El Salvador	GEOCEL
Hugo Renato Jacobo Castaneda	Geofísico	C E L	El Salvador	GEOCEL
Jaimé Armando Arevalo Martínez	Ingeniero Mecánico de Perforación	C E L	El Salvador	GEOCEL
Javier Alberto Rivas Hernández	Jefe Ingeniería Perforación Geotérm.	C E L	El Salvador	GEOCEL
Jorge A. Burgos Silva	Jefe Explotación Ahuachapán	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Alejandro Hidalgo Turcios	Técnico en Mediciones Geotérmicas	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Alonso Martínez Maltez	Supte. Explor.y Eval.de Campos	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Francisco Mena Manéndez	Técnico en Operación y Mantenimiento	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Leonel Mendoza	Asistente Gerencia GEOCEL	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Miguel Hernández	Ing. Reservorios - Ahuachapán	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Paz Cruz Rovira	Técnico Mecánico	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Raúl Romero Pineda	Jefe Mediciones Geot.-Berlin	C E L	El Salvador	GEOCEL
José Tenorio Mejía	Ingeniero Geoquímico	C E L	El Salvador	GEOCEL
Juan Antonio Beltrán Castro	Analista II-Auditoria General	C E L	El Salvador	GEOCEL
Julio Alberto Guidos	Ing. químico	C E L	El Salvador	GEOCEL
Julio Chávez		C E L	El Salvador	GEOCEL
Julio Eduardo Quijano Cortéz	Geofísico	C E L	El Salvador	GEOCEL
Luz Antonina Barrios de Luna	Físico de Rocas	C E L	El Salvador	GEOCEL

JO DE PARTICIPANTES DE CEL "CELDIREC"

A: Oct 11, 1990

A: 9:12 AM

Habel Argelis Ortega de Sánchez	Geólogo	C E L	El Salvador	GEOCEL
Manuel Antonio Aguirre	Técnico en Mediciones Geotérmicas	C E L	El Salvador	GEOCEL
Manuel Ernesto Monterrosa Vásquez	Jefe Med. y Produc. Campo Geotérm.	C E L	El Salvador	GEOCEL
Marbin Antonio Martínez Flores	Geoquímico Asistente	C E L	El Salvador	GEOCEL
Mario Antonio Rodríguez Herrera	Jefe en Campo Geotérmico-Berlín	C E L	El Salvador	GEOCEL
María del Rosario M. de Mongue	Técnico Analista	C E L	El Salvador	GEOCEL
Mauricio Enrique Retana	Jefe Depto. Diseño de Estudios	C E L	El Salvador	GEOCEL
Milagro Aida Durán de Amaya	Jefe Depto. Químico Ahuachapán	C E L	El Salvador	GEOCEL
Osamaro Peña		C E L	El Salvador	GEOCEL
Pablo Hernández Panameño		C E L	El Salvador	GEOCEL
Rafael Villelas	Técnico en Computación	C E L	El Salvador	GEOCEL
Regina Basagoitia de Quiñonez	Químico Analista	C E L	El Salvador	GEOCEL
Ricardo Alonso Escobar Vásquez	Jefe Depto. Eq. Geotermoelectrónicos	C E L	El Salvador	GEOCEL
Ricardo Have Trejo	Asistente Depto. Explot. Geot.	C E L	El Salvador	GEOCEL
Ronaldo Iván Canizales Mendoza	Jefe Depto. Explot. Chipilapa	C E L	El Salvador	GEOCEL
Rubén Antonio Loy Ayala	Asistente Depto. Perforación	C E L	El Salvador	GEOCEL
Rol Edgardo López García	Técnico Analista	C E L	El Salvador	GEOCEL
Saúl Amilcar Jacinto Bonilla	Auxiliar de Laboratorio	C E L	El Salvador	GEOCEL
Saúl Ayala Mendoza	Jefe Explotación Berlín	C E L	El Salvador	GEOCEL
Tomás Antonio Campos Villafuerte	Supte. Proyectos Geotérmicos	C E L	El Salvador	GEOCEL
Tomás Samuel Peñate Salazar	Jefe Secc. Ing. Reservorios	C E L	El Salvador	GEOCEL
Zaida Osorio Días	Geoquímico Asistente	C E L	El Salvador	GEOCEL
Jaime Luis Torres Alvarado	Colaborador Jurídico	C E L	El Salvador	JURIDICO
Rodolfo Enrique Saravia Pineda	Colaborador Jurídico	C E L	El Salvador	JURIDICO
José Roberto Linares Muñoz	Supte. Planif. y Des. Energético	C E L	El Salvador	PLANICEL
Mauricio Alfredo Henríquez Varela	Técnico Planificación	C E L	El Salvador	PLANICEL
Noemí Argentina Lainez Grimaldi	Ing. en Auditoría Energética	C E L	El Salvador	PLANICEL
Roberto Herbert Portillo	Asistente Gerencia PLANICEL	C E L	El Salvador	PLANICEL
Víctor Manuel Alejandro Avilés	Supte. Desarrollo Institucional	C E L	El Salvador	PLANICEL
Alfredo Salomón Aquino	Jefe Area Cont. y Seg. Proyectos	C E L	El Salvador	PROYECTOS
Jorge Francisco Blanco	Jefe Control y Seg. Proyectos	C E L	El Salvador	PROYECTOS
Ciro Antonio Guevara A.	Asistente de Recursos Humanos	C E L	El Salvador	RECURSOS H.
Herbert Stanley López Cisneros	Jefe Pers. Gerencia Seguridad	C E L	El Salvador	SEGURIDAD
Napoleón Heriberto Magaña S.	Encargado Operac. Gcia. Seguridad	C E L	El Salvador	SEGURIDAD
Azael Espinoza	Supte. Diseños Electromecánicos	C E L	El Salvador	TECNICEL

*Manuel Antonio Aguirre*

## **QUESTIONS TO BE ANSWERED LATIN AMERICAN GEOTHERMAL CONCESSIONS**

Phillip Michael Wright  
Geothermal Energy Association

1 March 1994

### **GENERAL QUESTIONS**

1. **POINTS OF CONTACT.** What will be our chief points of contact within the government and the government's electrical utility for the Latin American country? What is the position and title of everyone we need to know and to deal with in bringing a private power project to successful conclusion in the country, including the utility and regulating agencies?
2. **POLITICS OF POWER DEVELOPMENT.** What are the politics of power development in the Latin country? What political or other barriers may we face in bringing a private power development project to fruition? Does the government have an energy strategy or a short- or long-range plan for development? Which energy fuels is the government relying on now and/or will rely on in the future?
3. **NEED FOR POWER.** What is the need for new electrical generating capacity within the country? Within the region? What plans already exist for supplying this new capacity? What repowering plans are there? How reliable are projections of need for new capacity? Is there a desire to export electrical power, or will the power be used in solely within the government's economy? What part does the Latin government see for geothermal energy in the country? Is geothermal energy development supported by the government? By the public?
4. **GEOTHERMAL CONCESSIONS.** Are there geothermal concessions available now or in the near future? How will concessions to geothermal resources be handled? Will there be long-term title or lease to the resource (20 years or more)? What about title, lease, or other rights of access to the surface? What conditions will be placed on concession agreements? Will there be a desire or attempt by any entity of the local government to control and develop the resource and sell geothermal fluids to the geothermal plant developer, or will the entire project be done by the private developer?
5. **PRIVATE DEVELOPMENT AND POWER PURCHASE AGREEMENT.** Are the laws and regulations completely in place for private power development and sales? What restrictions are there? Has any foreign group or company, using geothermal or other fuels, successfully negotiated a private power-purchase agreement with the government or with a large industrial or other user of electricity? Have there been failed negotiations? What is the strategy for negotiating a power-purchase agreement? With what agency is it negotiated? How long will it take to negotiate? What is the final sign-off process, and at what level of government? What

price per kwh can we expect? What is the price of power charged by the government utility? What are their published avoided costs of electrical power? Are there any other private power-purchase agreements in place? How are they constructed and what is the price? Is there a pro forma agreement we could obtain? What types of agreements are acceptable (BOO, BOT, BOOT, etc)? What term could we expect for any negotiated agreement? Are counter-trade agreements acceptable, desirable or needed?

6. **REPATRIATION OF PROFITS.** What restrictions in law or in fact are there against repatriation of profits from private-power or other private investment in the host country? Has there been a history of problems or lack of problems in this regard?

7. **PERMITS.** What permits are needed for all phases of the work? Who are they obtained from? How long do they take to acquire? What is the cost of each permit? What is the permitting process for: exploration work, drilling (both small exploration rig and big rig), road construction, power-plant construction, fluid-gathering system piping, transmission-line construction, waste and water disposal.

8. **ENVIRONMENTAL REGULATION.** What environmental requirements must be met? Are there requirements for EIS-like studies? What air-emissions standards are there for power plants? Is geothermal energy perceived as being environmentally friendly or advantageous by the government? By the public? If not, why not? What problems exist with governmental and public perception of power projects in general and geothermal projects in particular?

9. **DUTIES AND TAXES.** What import/export duties and/or taxes are imposed on equipment - both equipment brought in permanently and equipment brought in for the project and taken back out of the country after use? Is there significant hold-up in customs for bringing equipment into the country or getting it back out? Will the government or utility be willing to intercede with their customs to expedite this? What are the taxes on money spent for exploration, drilling, construction? Are there any other taxes?

10. **REPORTING AND CONFIDENTIALITY OF DATA.** What technical, financial and other reports and paper work will be required by the Latin government during the project? Will the private power developer be able to restrict distribution of sensitive information? If so, what types of information? What information must be made public? What information must be supplied on the resource? on the power plant? on the overall operations? and with what frequency?

11. **COURTESY PAYMENTS.** What courtesy payments are expected, to whom, how often, how much, and how can we be assured of operating legally while still getting business done in a timely fashion? Of course, the U.S. geothermal industry's companies working on this and other projects in Latin America are aware of the traditional methods of doing business, but we will not be willing to operate outside of U.S. or local law.

12. **PARTNERS.** Is there a requirement for a local Latin American partner? What part will

such partners play? How will we interact with them? What kind of assistance can we expect from them? Will they provide some of the financing? Will they finance or partly finance the feasibility work? What politics are involved in their participation (do we have to use certain subcontractors, etc)?

13. **FINANCING.** How much, if any, of a geothermal project could be financed through local or regional Latin American banks? How much financing, if any, could the Latin government or its utility furnish? What is the credit rating of the government on the world capital markets? Does the country have large debt now with the United States, and could a debt swap be arranged with the U.S. government and the local Latin government to assist in paying for a geothermal project?

14. **U.S. GOVERNMENT IN-COUNTRY ASSISTANCE.** What U.S. Government offices are maintained in Latin American countries that can assist us -- Embassies, AID Missions, Department of Commerce offices, U.S. city or state Chambers of Commerce. Will the local U.S. Embassy or AID offices be enthusiastic about helping us? What will their requirements be? Do we need letters from the host-country government agencies and/or any partners before we can get help?

15. **SUBCONTRACTOR AVAILABILITY.** What is the availability of local subcontractors and partners? Environmental firms, legal firms, land firms, risk-oriented banks or firms, construction contractors (excavation, concrete, road building, plant construction), chemical and other similar services, drilling and service contractors.

16. **OFFICE SPACE.** What is the availability and cost of office space in major cities and in cities near the concessions? What is the cost of space, phones, secretaries, copying facilities and other items of office assistance? What about bringing office and similar equipment into the country? Will we have to have our own offices, is it advisable that we do, or is it preferable to have space with a partner? What about warehousing, equipment transfer etc. What about security -- how big a problem is it?

17. **PORT FACILITIES.** How do goods and large equipment normally flow into the country? How good is the transportation system within the country? Where are the best port facilities and how good are they? What about crane capacities? What are labor rates for longshoremen, etc.?

18. **FREIGHT AND HAULAGE.** What is the availability and cost of trucking for all sizes of equipment?

19. **ACCOUNTING.** What is the availability of accounting services? How much do they cost? How about auditing firms?

20. **GEOHERMAL DATA AVAILABILITY.** How much data on geothermal resources are available from the local government? How can we obtain these data -- do we study the data in government offices or can we copy it for our use? Is there a charge for the data and how much?

Can we get information on country-wide, regional and local electrical grids?

21. **EXPLORATION.** Regarding exploration field work: What is the availability of well trained people to do geological, geochemical and geophysical field surveys? What is the cost? How timely is the response from local consultants and contractors, should these become necessary?

22. **DRILLING.** Regarding drilling: what is the availability of core rigs, small rotary rigs, production-size rigs and workover rigs? What are typical rig costs, mud costs, bit costs, logging costs, drill-pad construction costs, etc.?

### **FOR EACH CONCESSION**

1. **SCHEDULE.** How long will a U.S. company have to evaluate any existing data and decide whether to proceed with negotiations and/or feasibility studies? What sort of development schedule will the Latin government expect us to maintain?

2. **PERMITS, TAXES, DUTIES.** Are there regional permits, taxes, duties that affect work on any concession? If so, what is their nature and cost?

3. **PHYSICAL ACCESS.** What is the terrain and road access for equipment? What are the possibilities and costs for upgrading roads if needed? Will the Latin government assist financially or in-kind with such upgrades? What would be the process and restrictions for building new roads? Are there local air strips? Is there a railway network and how close to the concession does it come?

4. **TRANSMISSION GRID.** What are the details of the transmission grid, including extra capacity? Are there access fees? Will there be a need for construction of new power lines or will the government bring power lines in? How much power line might we have to furnish, what are construction costs? Will we have to furnish substations, what are costs?

5. **WATER.** What is the availability of potable and drilling/construction water at the site? What is the cost of water and of water haulage?

6. **MAPS.** What maps are available? Each project will need maps of roads, topography, vegetation, rivers and springs, land ownership, areas of environmental sensitivity, etc. Will the government assist in providing or making such maps?

7. **LOCAL LABOR.** What is the availability of local skilled and unskilled labor?

## THE NEED FOR ELECTRICAL DEVELOPMENT IN GUATEMALA

During February, 1992, Dr. Carlos Hurtarte, the Minister of Energy for Guatemala, visited the U.S. Department of Energy to ask for assistance in obtaining funding from the World Bank for rural electrification.

Dr. Hurtarte was formerly the Vice Dean of Engineering and Professor of Nuclear Engineering at the University of Guatemala. He knew the technical capabilities of the university graduates and thought they could repair and maintain simple electrical generating systems.

In his request for DOE influence with the World Bank, Dr. Hurtarte mentioned that Guatemala has 10,000 isolated villages that will never be connected to the electrical grid. These villages have an average of 200 people each, and they are in great need of education, communication, and health care that can only come with electrification. He also mentioned that electricity could help these villages rise above a subsistence economy to produce something of value to the outside world such as electronics assembly, weaving, or other traditional crafts.

Over 1,000 villages in Guatemala could be electrified through the installation of 250 kW to 1 MW binary geothermal generators powered by the numerous hot springs. Only short transmission lines would be needed to reach the villages. The status of the binary generators could be monitored and they could be controlled remotely from a central location.

Dr. Hurtarte mentioned the rolling blackouts in the electrical grid because of the lack of reliable generators. He said that the real avoided cost of electricity was not the 5 to 10 cents per kilowatt hour of generation but was \$1.25 per kilowatt hour of lost productivity when the electricity was not available. That was the real loss to the gross national product from curtailed industrial production. To help with this problem, Guatemala has opened electrical generation to foreign investors. They can now develop and operate electrical facilities and sell the electricity to the national utility.

### Contact:

Dr. Carlos Hurtarte, Minister of Energy  
Diagonal 17, 29-78  
Zona II, Guatemala City  
C.A. 01011, Guatemala

Telephone: 011-502-2-763091  
FAX: 011-502-2-763175

Exception to SF 14, Approved by NARS, June 1978

**UNCLASSIFIED**

1. INSERT ABOVE, CLASSIFICATION LEVEL, UNCLASSIFIED, OR OFFICIAL USE ONLY

2. MESSAGE CONTAINS WEAPON DATA?

("X" appropriate box. Message Center will not transmit message unless one box is marked.)

YES  NO

3. USE WHEN REQUIRED

THIS DOCUMENT CONSISTS OF 15 PAGES  
NO.     OF     COPIES, SERIES    

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY  
TELECOMMUNICATION MESSAGE  
(See reverse side for Instructions.)

**U51**

4. PRECEDENCE DESIGNATION ("X" appropriate box):

FOR NORMAL USE                      EMERGENCY USE ONLY

ACTION:  Routine  Priority  Immediate  FLASH  
INFO:  (6 Hrs.)  (3 Hrs.)  (30 Mins.)  (ASAP)

5. TYPE OF MESSAGE ("X" appropriate box)

Single Address  
 Multiple Address  
 Title Address  
 Book Message

FOR COMMUNICATION CENTER USE

MESSAGE IDENTIFICATION

NR:     DTG:     Z    

6. FROM **MARSHALL REED  
FORRESTAL BLDG.  
WASHINGTON, DC**

7. OFFICIAL BUSINESS **Marshall Reed** (TIME) **A.M.**  
*Signature of authorizing official* P.M.

8. DATE **5/8/89**

9. TO  
**Dr. P. Michael Wright  
UNIV. OF UTAH RESEARCH INST.  
SALT LAKE CITY, UT  
TELEFAX: FTS 588-3453  
Confirm: FTS 588-3437**

COMMUNICATION CENTER ROUTING

89	69
01	P
02	C
03	I
04	S
05	E
06	R
07	V
08	M
09	E
10	N
11	T
12	E
13	R
14	S
15	E
16	C
17	E
18	S
19	E
20	R
21	E
22	S
23	E
24	R
25	E
26	S
27	E
28	R
29	E
30	S
31	E
32	R
33	E
34	S
35	E
36	R
37	E
38	S
39	E
40	R
41	E
42	S
43	E
44	R
45	E
46	S
47	E
48	R
49	E
50	S
51	E
52	R
53	E
54	S
55	E
56	R
57	E
58	S
59	E

BE BRIEF ELIMINATE UNNECESSARY WORDS

10. ORIGINATOR (On separate lines, enter Name, Routing Symbol, & Tel. No.)  
**MARSHALL REED  
CE-342  
FTS 896-8076**

11. DERIVATIVELY CLASSIFIED NSI  
NATIONAL SECURITY INFORMATION  
Unauthorized Disclosure subject to Administrative and Criminal Sanctions.  
Derivative Classifier: (Name) \_\_\_\_\_  
(Title) \_\_\_\_\_  
(Date or Event) (OADR) \_\_\_\_\_  
Declassify on: \_\_\_\_\_  
Derivatively Classified by: \_\_\_\_\_  
(Date or Event) (OADR) \_\_\_\_\_  
(Guide or Source Document) \_\_\_\_\_

12. ORIGINALLY CLASSIFIED NSI  
NATIONAL SECURITY INFORMATION  
Unauthorized Disclosure subject to Administrative and Criminal Sanctions.  
Originally Classified by: (Name) \_\_\_\_\_  
(Title) \_\_\_\_\_  
Declassify on: \_\_\_\_\_  
(Date or Event) (OADR) \_\_\_\_\_

13.  RESTRICTED DATA  
This document contains Restricted Data as defined in the Atomic Energy Act of 1954. Unauthorized disclosure subject to Administrative and Criminal Sanctions.  
DERIVATIVE CLASSIFIER \_\_\_\_\_  
(Name and Title)

14.  FORMERLY RESTRICTED DATA  
Unauthorized disclosure subject to Administrative and Criminal Sanctions. Handle as Restricted Data in Foreign Dissemination Section 144.b Atomic Energy Act, 1954.  
DERIVATIVE CLASSIFIER \_\_\_\_\_  
(Name and Title)

15. INSERT BELOW, CLASSIFICATION LEVEL, UNCLASSIFIED, OR OFFICIAL USE ONLY

**UNCLASSIFIED**

2 JM #65-1

# TRIP REPORT

August 10-20, 1986

*Dr. Marcelo J. Lippmann  
Staff Scientist  
Earth Sciences Division  
Lawrence Berkeley Laboratory*

## DESTINATION:

Sao Paulo, Guaruja, and Caldas Novas, Brazil

## PURPOSE

The main purpose of this trip was to get acquainted with the geothermal activities being carried out by the Instituto de Pesquisas Tecnologicas do Estado de Sao Paulo (IPT) and to learn about the progress of geothermal development in Latin America.

## DESCRIPTION OF ACTIVITIES

*Monday, August 11, 1986*

At 11:05 AM arrival at Sao Paulo's Guarulhos Airport. At 12:30 PM leaving with IPT personnel to Guaruja, State of Sao Paulo. At 3:00 PM arrival at Guaruja where the International Meeting on Geothermics and Geothermal Energy (IGGM) was underway. That afternoon I met for the first time with Dr. Valiya Hamza of IPT who was organizing the meeting.

*Tuesday, August 12 to Thursday, August 14, 1986*

Participated in the IGGM. About eighty persons attended (see attached list of IGGM participants), largely from Brazilian institutions. Because of travel restrictions the number of attendees, particularly from South and Central American countries, was rather limited. However, the expertise of the participants, especially those from North

3

JM  
#651

America, New Zealand, Europe and Japan was excellent.

The main emphasis of the meeting was toward heat flow measurements; geothermal development was discussed only during the last day. From private discussions with IPT personnel and other Latin American participants it is clear that very little is being done to develop the geothermal resources of South America. As shown by Raffaele Cataldi during his presentation, there seem to exist a vast resource base in the area (about 170 GW-years electric) especially along the Andes, but mainly because of lack of financial resources its development has been stifled.

Venezuela seem to have a promising area in its northern region, in the Moron-El Pilar Fault Zone. Franco Urbani in his talk indicated that some inferred reservoir temperatures reach about 300° C.

The importance of geothermal resources in Argentina is generally not known. The only promising area seem to be Copahue, in the western province of Neuquen, where there are indications of a vapor-dominated zone. Further exploratory drilling by local and Italian groups is being planned.

The geothermal resources of Brazil seem to be of low enthalpy, as indicated by the talks presented at IGGM and by the heat flow map distributed by IPT (Fig. 1).

Talks given by researchers from other Latin American countries did not present new information about the status of geothermal development in their countries.

On Thursday, during the session on Development of Geothermal Fields, I presented two papers: (1) Convective Heat Transport in Geothermal Systems, and (2) Numerical Models for the Evaluation of Geothermal Systems. The papers summarized some of the results obtained from studies supported by DOE's Geothermal Program. This session was cochaired by Robert Hanold (LANL/AID) and myself.

*Friday, August 15, 1986*

At 10.00 AM left Guaruja to visit IPT laboratories located on the campus of the University of Sao Paulo.

4 #51

The Instituto de Pesquisas Tecnologicas do Estado de Sao Paulo S/A (IPT) is a non-profit corporation owned by the State of Sao Paulo. About 3000 persons work at the different divisions of IPT (see Table 1), about 800 are researchers and about 1100 are technicians.

My visit to IPT and my discussions with IPT personnel was restricted to the Mining and Applied Geology Division. This group is involved in IPT's Energy Program (see Table 2) and supports a small effort in exploration for geothermal resources. Because of the low enthalpy of the Brazilian fields the emphasis of activities of the Geothermal Group is on direct applications. The head of this group is Dr. Valiya M. Hamza, a former student of Prof. Alan E. Beck, University of Western Ontario, Canada.

*Saturday, August 16 to Monday, August 18, 1986*

On Saturday at 8:00 AM left for Caldas Novas, State of Goias, with a small group headed by Dr. Hamza (IPT). The other participants were Dr. John Elder (New Zealand), Dr. Ladislaus Rybach (Switzerland). Because of a flight cancellation we had to fly to Brasilia and then travel by car another 400 km (250 miles) to get there. We arrived at about 6:00 PM.

The Caldas Novas geothermal area is located in the Brazilian highlands about 800 km (500 miles) north of Sao Paulo. It extends over about 200 km<sup>2</sup> (80 square miles) presenting numerous hot springs. The natural discharge is estimated to be around 7000 m<sup>3</sup>/h (30,000 gpm) of thermal waters of up to about 45 °C (113 °F). The total dissolved solids in these waters is very low, about 100 ppm.

Numerous hotels and resorts have been built around the hot springs; tourism has become one of the major industries in the area. Because of the intense development of the geothermal aquifer its water level has dropped significantly, possibly by about 40 meters (130 feet). In the town of Caldas Novas pumps had to be installed to produce the thermal waters needed for the spas and pools. However, in the Pousada do Rio Quente (Hot River Inn) located about 10 km (6 miles) southwest of the town, no major changes in spring discharge have been observed.

5 JM  
#651

According to the literature the origin of this geothermal anomaly might be related to a relatively young uplifted plateau known as "Serra de Caldas" located within a SE-NW trending belt of Tertiary alkaline intrusives (my observations suggest that the plateau could be an erosional remnant instead of an uplifted feature). There is need for a careful study of the area to determine the origin of the thermal waters and to monitor the development of the resource. There is a possibility of over-exploiting the aquifer, especially in the town of Caldas Novas where new hotels (and wells) are under construction or are being planned.

Sunday we spent traveling through the area to look at outcrops, visit the hot springs and developments built around them. On Monday we left about 9:00 AM to arrive at Downtown Sao Paulo about 3:00 PM.

*Tuesday, August 19, 1986*

I visited the Instituto de Geociencias of the University of Sao Paulo. In the morning met with Dr. Horstpeter Ulbrich, professor of petrology and petrography, who is studying Brazilian alkaline intrusives. Based on our discussions there seems to be a higher heat flow in the area of these intrusions because of their high content in radioactive accessory minerals.

Spent the afternoon at the Centro de Pesquisas de Aguas Subterraneas (CEPAS) which is also part of Instituto de Geociencias. That same evening (at 8:00 PM) returned to the U.S.

The main purpose of the CEPAS is to conduct research in basic and applied hydrogeology, groundwater pollution and groundwater chemistry and to apply mathematical modeling and geophysical techniques to hydrogeology. Met with Dr. Aldo da Cunha Reboucas, director of CEPAS, to discuss their program and LBL activities related to heat and mass flow in groundwater systems. Even though CEPAS has no geothermal program, the group is applying for funds to study the Caldas Novas aquifer to establish its characteristics and long-term capacity. This does not conflict with IPT activities since IPT research is directed mainly towards the utilization of the geothermal waters.

6 #64

Another area of mutual interest that could have significance to DOE's Geothermal Program is the evaluation of ground water resources in crystalline rocks. Since the permeability in these rocks is fracture dominated, we could learn from CEPAS experience. We decided to exchange data and literature on low-temperature geothermal resources. Dr. Reboucas also provided me with names of University of Pernambuco researchers working on the same subject, mainly on the exploration for ground water in fractured rock masses.

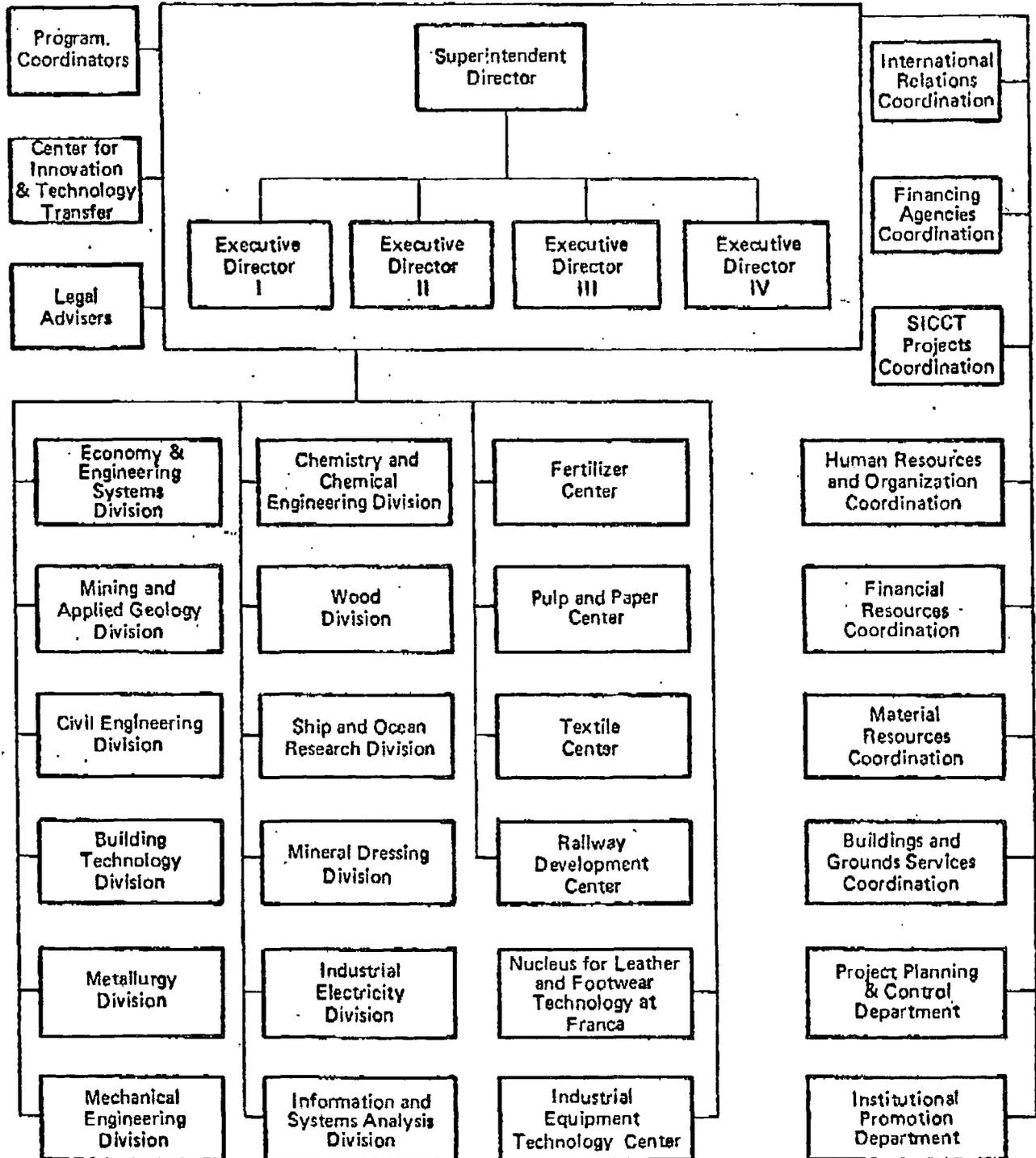
TABLE 1



7 FEB

SÃO PAULO STATE INSTITUTE FOR TECHNOLOGICAL RESEARCH

ORGANIZATION CHART



ENERGY PROGRAM

It aims to contribute in reducing the energy consumption in industry, transportation and other sectors; to increase productivity of energetic products (alcohol); to support the Energy Planning of Federal and State Government; to develop technologies related to the use of natural gas in industry and engines; other alternative fuels in engines, and small hidroelectric plants.

Main Sub-Programs:

1. Energy Conservation: Support to the technologic development of processes and products with lesser energy consumption, with emphasis in electrical energy; rationalisation of energy use in industry, transportation and other sectors.
2. Natural Gas: Support to the energy planning agencies and commercialization companies of natural gas; support to the development and conversion of equipments; help in standardization for use and instalation of equipments.
3. Increase in Alcohol Productivity: Technical support to the alcohol and sugar sector and equipment manufacturers to increase productivity involving sugarcane crushing, juice treating, fermentation, distillation and moreover, the use of by products: stillage and bagasse.
4. Energy Planning: Data collecting, evaluation of alternative energy potentials; social and economic impact of production and use; advise to the planning agencies of federal and state government; regionalization of use of energy resources.
5. Engine Technology: Support to the feasibility study of alternative fuels for Diesel engines: methane, low grade diesel; research in combustion process in engines.
6. Combustion and Gasification: Fluidized bed combustion and gasification in order to use resources like sugarcane bagasse, firewood and charcoal; support to the equipment users and manufactures.
7. Small Hidroelectric Plants: Support to the technologic development of equipments: turbines, generators and load regulators.

INTERNATIONAL MEETING  
ON GEOTHERMICS  
AND GEOTHERMAL ENERGY

Guarujá, Brazil, August 1986

8 #65

PARTICIPANTS LIST

NAME	INSTITUTION/ADDRESS	COUNTRY
AIRES, JOSE RIBEIRO	PETROBRAS - CENPES QUADRA 7 21910 - ILHA DO FUNDADO - RJ PHONE: (021)2906016	BRAZIL
ANDRADE, DE SOUSA MAURO	CNPq - OBSERVATORIO NACIONAL RUA GENERAL JOSE CRISTINO, 77 - 20921 - SAO CRISTOVAO - RJ PHONE: (021)560-7091	BRAZIL
BACHU, STEFAN	ALBERTA RESEARCH COUNCIL 7TH FLOOR, TER. PLAZA, 4445 CALGARY TRAIL S EDMONTON, ALTA, T6H5R7 PHONE: (403)4360555	CANADA
BECK, ALAN E.	UNIV. OF WESTERN ONT. - DEPT. OF GEOPHYSICS LONDON ONTARIO N6A 5B7 PHONE: 5196613141	CANADA
BECKER, EDUARDO ARTHUR	IPT - LABORATORIO DE GEOTERMIA CIDADE UNIVERSITARIA - CX. POSTAL 7141 01000 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)2682211 R-650	BRAZIL
BERGE, CHARLES WILLIAM	BERGE RESOURCES 2301, SNOW MOUNTAIN CIRCLE SANDY, UTAH 84092 PHONE: (801)9425918	USA
BOMFIM, ROCHA ERONALDO	INST. ASTRON. E GEOFISICO - USP AV. MIGUEL STEFANO, 4200 - AGUA FUNDA SAO PAULO - SP PHONE: (011)5778599 R-51	BRAZIL
BRENHA, RIBEIRO FERNANDO	UNIV. DE SAO PAULO - INST. ASTRON. E GEOFIS. CX. POSTAL 30627 01051 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)5778599 R-46	BRAZIL
BUNTEBARTH, GUENTER	INSTITUT F. GEOPHYSIK P.O. BOX 1253 CLAUSTHAL - ZELLERFELD - 3392 PHONE: 49/5323/722232	FRG
CAMPOS, DOS PRAZERES J. N.	PETROBRAS RUA ARTHUR BERNARDES, 5511 PHONE:	BRAZIL

9 #69<sup>2</sup>

CARVALHO, DA SILVA HUMBERTO	INST. DE GEOCIENCIAS UFBA, PPPG RUA CAETANO MOURA, 123 - 2o. ANDAR 40210 - FEDERACAO - BA PHONE: (071)2375407	BRAZIL
CATALDI, RAFFAELE	ENEL - NATIONAL GEOTHERMAL UNIT 14, P.zza BARTOLO DA BASSOFERRATO 56100 - PISA PHONE: (50)575005	ITALY
CERNAK, VLADIMIR	GEOPHYSICAL INST. CZECHOSL. ACAD. OF SCIENCES BOCNI II/1a - 141-31 PRAHA-4 PHONE: (422)766051	CZECHOSLOV.
CHOUHURI, ASIT	INSTITUTO DE GEOCIENCIAS - UNICAMP CX. POSTAL 6152 13100 - CAMPINAS - SP PHONE: (0192)391097	BRAZIL
CLAUSER, CHRISTOPH	INSTITUT FUR ANGEWANDTE GEOPHYSIK TU BERLIN/SEKR. ACK 2 -ACKERSTRASSE 71-76 D-1000 BERLIN 65 PHONE: 030/31472627	FRG
CORREA, GARCIA WILSON A.	CESP - COMPANHIA ENERGETICA DE SAO PAULO RUA MINISTRO ROCHA AZEVEDO, 38 01410 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)2040111	BRAZIL
CREMA, GIANCARLO	AQUATER S.p.A. (ENI GROUP) P.O. BOX 20 SAN LORENZO IN CAMPO - PESARO - 61047 PHONE: (0721)771217	ITALY
DE ARAUJO, RUTENIO LUIZ C.	UNIVERSIDADE DO AMAZONAS CX. POSTAL 972 66000 - BELEM - PARA PHONE: (091)2315714	BRAZIL
DEL REY, ANTONIO COSME	IAG - USP AL. TEREZA CRISTINA, 422 09700 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)4433724	BRAZIL
DONALDSON, IAN G.	PHYSICS AND ENGINEERING LABORATORY, DSIR PRIVATE BAG LOWER HUTT PHONE:	NEW ZEALAND
ELDER, JOHN W.	UNIV. OF MANCHESTER, U.K. 17 CEDAR ROAD, Mt. EDEN AUCKLAND 4 PHONE: (09)686762	NEW ZEALAND

16 12513.

FABIANI, A. ABEL PEDRO IPT - AGRUPAMENTO DE MECANICA DE ROCHAS BRAZIL  
 CIDADE UNIVERSITARIA - CX. POSTAL 7141  
 01000 - SAO PAULO - SP  
 PHONE: (011)2682211 R-772

FARHAT, GABRIEL MALUF INST. DE PESQ. TECN. DO EST. DE S.P. S/A IPT BRAZIL  
 AV. PROF. ALMEIDA PRADO, 535  
 05508 - SAO PAULO - SP  
 PHONE: (011)2682211

FERRARI, VARGAS ANTONIO S. PETROBRAS MINERACAO S/A BRAZIL  
 RUA DO BOQUIM, 539  
 47000 - ARACAJU - SE  
 PHONE: (079)2246440

FRANGIPANI, ALCIDES IPT - AGRUPAMENTO DE HIDROGEOLOGIA BRAZIL  
 CIDADE UNIVERSITARIA - CX. POSTAL 7141  
 01000 - SAO PAULO - SP  
 PHONE: (011)2682211 R-644

FUERTE, ALFREDO UNIV. NACIONAL DE SALTA-CAT. HIDROGEOLOGIA ARGENTINA  
 CASTANARES - RUTA 9  
 4400 - SALTA  
 PHONE: 220335

GUPTA, MOHAN LAL NATIONAL GEOPHYSICAL RESEARCH INSTITUTE INDIA  
 UPPRL ROAD HYDERABAD  
 HYDERABAD  
 PHONE: 851929

HANZA, VALYIA M. IPT - LABORATORIO DE GEOTERMIA BRAZIL  
 CIDADE UNIVERSITARIA - CX. POSTAL 7141  
 01000 - SAO PAULO - SP  
 PHONE: (011)2682211 R-350

HANOLD, ROBERT J. LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY USA  
 P.O. BOX 1663 - MS 0446  
 LOS ALAMOS, NEW MEXICO, 87545  
 PHONE: (505)6671698

HURTER, VARELLA SUZANNE INSTITUTO ASTRONOMICO E GEOFISICO (USP) BRAZIL  
 AV. MIGUEL STEFANO, 4200  
 01000 - SAO PAULO - SP  
 PHONE: (011)5778599 R- 46

HURTIG, ECKART CENTRAL INSTITUTE PHYSICS OF THE EARTH GDR  
 1500 POTSDAM, TELEGRAPHENBERG  
 PHONE: 37-33-4551

IGLESIAS, EDUARDO R. INST. DE INV. ELEC. - DEPTO DE GEOTERMIA MEXICO  
 APARTADO POSTAL 475  
 56000 - CUERNAVACA  
 PHONE: (73)143011 EXT-3210

4.  
N 659

IYER, SUNDARAM SANKARA S.	INST. DE PESQ. ENERGETICAS E NUCLEARES CIDADE UNIVERSITARIA SAO PAULO - SP PHONE: (011)2116011 R-325	BRAZIL
JOHNSTON, CHARLES E.	PETROBRAS MINERACAO S/A -- PETROMISA AV. PRESIDENTE VARGAS, 583 -- 10. ANDAR 20071 - RIO DE JANEIRO - RJ PHONE: (021)2247919	BRAZIL
KOWSMANN, RENATO OSCAR	PETROLEO BRASILEIRO S.A. -- PETROBRAS CIDADE UNIVERSITARIA - QUADRA 7 ILHA DO FUNDACAO - RJ PHONE: (021)2702122 R-410	BRAZIL
LIPPMANN, MARCELO J.	UNIV. OF CA-LABORATORY LAWRENCE BERKELEY EARTH SCIENCES DIVISION BERKELEY - CALIFORNIA - 94720 PHONE: (415)4865035	USA
LOBO, FERNANDO SIMOES PAULO	INST. DE GEOCIENCIAS DA UFBA/PPPG RUA CAETANO MOURA, 123 40210 - FEDERACAO - BA PHONE: (071)2370407	BRAZIL
LOFFREDO, LUIZ F	DEP AGUAS E ENERGIA ELETRICA RUA SAO BENTO, 919 - CENTRO 14000 - ARARAGUARA PHONE: (0162)322255	BRAZIL
MANTOVANI, M. S. MARTA	INSTITUTO ASTRONOMICO E GEOFISICO AV. MIGUEL STEFANO, 4200 01051 - SAO PAULO - SP PHONE:	BRAZIL
MARANGONI, YARA REGINA	INITITUTO ASTRONOMICO E GEOFISICO - USP AV. MIGUEL STEFANO, 4200 01051 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)5770599 R-46	BRAZIL
MERLA, ANDREA	GEOTERMICA ITALIANA LUNGARNO MEDICEO, 16 PISA PHONE: 50/40580	ITALY
MIDEA, F. NILSON	IPT - AGRUPAMENTO DE MECANICA DE ROCHAS CIDADE UNIVERSITARIA - CX. POSTAL 7141 01000 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)2682211 R-366	BRAZIL
MIRANDA, TELMA A. D.	INSTITUTO DE FISICA DA UFBA RUA CAETANO MOURA, 123 40000 - FEDERACAO PHONE: (071)2499862	BRAZIL

12 259

ROCO, ROACYR FRANCISCO	PRO-MINERIO RUA MAJOR SERTORIO, 128 4a. ANDAR 01222 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)2563299	BRAZIL
MONTICELI, JOAO JERONIMO	CESP - COMPANHIA ENERGETICA DE SAO PAULO RUA MINISTRO ROCHA AZEVEDO, 38 01410 - SAO PAULO - SP PHONE: (011)2640111 R-105	BRAZIL
MORGAN, FRANK DALE	GEOPHYSICS DEPT. TEXAS A & M UNIVERSITY COLLEGE STATION, TEXAS 77843 PHONE:	USA
MUNOZ, MIGUEL	UNIVERSIDAD DE CHILE - DPTO DE GEOFISICA B. ENCALADA 2085 SANTIAGO PHONE: 6968790	CHILE
MERI, GILSON LUIZ TEIXEIRA	PETROBRAS MINERACAO S/A RUA BOSQUIM, 589 49000 - ARACAJU - SE PHONE: (079)2246440	BRAZIL
MUNN, JEFFREY A.	LOUISIANA STATE UNIV. - DEPT OF GEOLOGY LOUISIANA STATE, 70803 PHONE: (504)3883353	USA
MOCOLA, LEONIDAS	INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU APARTADO 3747 LIMA PHONE: 370244	PERU
OLIVEIRA, MARCO AURELIO F. DE	UNESP - IGCE - RIO CLARO RUA 10, 2527 13500 - RIO CLARO - SP PHONE: (0195)340522	BRAZIL
PANARELLO, HECTOR OSVALDO	INST. DE GEOCRONOLOGIA Y GEOL. ISOTOPICA CIUDAD UNIVERSITARIA PABELLON INGEIS BUENOS AIRES - 1428 PHONE: 7833021/23	ARGENTINA
PANDA, PRAMODE KUMAR	KDMIPE (ONGC) 9 KAULAGARH ROAD 248195 - DERHADUN PHONE: 27101-05/285	INDIA
PARMAR, DEEPAK	GEO THERM INC. 188 DEERFIELD ROAD NEWMARKET - ONTARIO - L3Y2L9 PHONE: (416)89875355	CANADA

PESCE, ABEL	SECRETARIA DE MINERIA AV. SANTA FE 1548 PISO 11 BUENOS AIRES PHONE:	ARGENTINA
POITEVIN, CHRISTIAN	OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE AVENUE CIRCULAIRE, 3 B-1180 BRUXELLES PHONE: (2)3752484	BELGICA
POLLACK, HENRY N.	UNIVERSITY OF MICHIGAN DEPT OF GEOLOGICAL SCIENCES ANN ARBOR - MICHIGAN - 48109 PHONE: (313)7641435	USA
RAMAKRISHNA, T.S.	GEOLOGICAL SURVEY OF INDIA CHANDRAVIHAR 9TH FLOOR MJ ROAD HYDERABAD - 500001 PHONE: 558236	INDIA
RATTON, EDUARDO	UNIV. FEDERAL DO PARANA-CENTRO POLITEC. CX. POSTAL 19010 80000 - CURITIBA - PR PHONE: (041)2662122 R-257	BRAZIL
RIBEIRO, MAURICIO	UNIV. FED. RIO GRANDE DO SUL-INST. DE GEOC. CX. POSTAL 8 94400 - VIAMAO - RS PHONE: (0512)217805	BRAZIL
RYBACH, LADISLAUS	INST. OF GEOPHYSICS ETHZ-HOENGGGERBERG CH-8093 - ZURICH PHONE: 1/3772605	SWITZERLA
SCHUBERT, GERALD	UNIV. OF CALIFORNIA, LOS ANGELES LOS ANGELES, CALIFORNIA, 90024 PHONE: 213/8254577	USA
SHUKOWSKY, WLADIMIR	INSTITUTO ASTRONOMICO E GEOFISICO AV. MIGUEL STEFANO, 4200 SAO PAULO - SP PHONE:	BRAZIL
SOUZA, JOSE RICARDO SANTOS	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA CX. POSTAL 1611 66000 - BELEM - PA PHONE: (091)2291811	BRAZIL
STECKLER, MICHAEL S.	LAMONT-DOHERTY GEOLOGICAL OBSERVATORY PALISADES, NY, 10964 PHONE: 9143592900	USA

14 <sup>06/9</sup> HUNGARY

STEGENA, LAJOS                      EOTVOS UNIVERSITY  
KUNB 2  
1083, BUDAPEST  
PHONE: 342785

MACHAZ FILHO, ANTONIO              PETROBRAS                      BRAZIL  
  
RIO DE JANEIRO - RJ  
PHONE:

TINEO, ALFREDO                      UNIV. NACIONAL DE TUCUMAN              ARGENTINA  
24 DE SETIEMBRE 1021 96. C.  
4000 - TUCUMAN  
PHONE: (081)214777

ULBRICH, HARSTPETER              UNIV. DE SAO PAULO - INST. GEOCIENCIAS              BRAZIL  
CIDADE UNIVERSITARIA - BUTANTA  
05508 - SAO PAULO - SP  
PHONE: (011)2122011

URBANI, FRANCO                      UNIV. CENTRAL DE VENEZUELA, DEPT. GEOLOGIA VENEZUELA  
APARTADO 4702B  
CARACAS 1041-A  
PHONE: 02-6627845

UYEDA, SEIYA                      UNIV. OF TOKYO-EARTHQUAKE RESEARCH INST.              JAPAN 113  
  
TOKYO  
PHONE: 03-8122111

VACQUIER, VICTOR                      UNIV. OF CALIFORNIA                      USA  
SAN DIEGO, MAIL STOP A-005  
LA JOLLA, CALIFORNIA, 92093  
PHONE: (619)4596991

VARELA, PABLO R.                      MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS              VENEZUELA  
PARGUE CENTRAL - TORRE GESTE - PISO 19  
CARACAS 1010-A  
PHONE: 5076926

VIRGILI, JOSE CARLOS              CESP - COMPANHIA ENERGETICA DE SAO PAULO BRAZIL  
RUA MINISTRO ROCHA AZEVEDO, 38  
01410 - SAO PAULO - SP  
PHONE: (011)2840111 R-105

WANG, JI-YANG                      INST. GEOLOGY, ACAD. SINICA              PRCHINA  
P.O. BOX 634  
BEIJING  
PHONE: 446551 EXT332

WHEELER, GRAHAM HAROLD              KRTA LIMITED                      NEW ZEALAND  
29 CUSTOMS STREET WEST  
AUCKLAND 1  
PHONE: 795700

ZEMBRUSKI, SYLVIO GERALDO              PETROLEO BRASILEIRO S.A.              BRAZIL  
ILHA DO FUNDAO, QUADRA 7  
21910 - RIO DE JANEIRO - RJ  
PHONE: (021)2702122 R-576

**A. I. D. OFFICE OF ENERGY**  
**ACTIVITIES IN LATIN AMERICA**

The Office of Energy has been assisting a number of countries in Latin America on issues related to policy and planning, renewable energy, and energy efficiency. Recent or current activities include the following:

**1. Costa Rica:**

- o Working with the Direccion Sectorial de Energia and the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) on a Power Sector Efficiency Assessment, which will make recommendations for improvements in efficiency in generation, transmission, distribution, and end uses. The Mission has co-funded this activity through a buy-in.
- o In concert with the Power Sector Efficiency Assessment, working with ICE on comprehensive least-cost planning methodology, in order to determine the best mix of efficiency investments and to demonstrate the expected reduction in need for capacity expansion.
- o Funding pre-investment studies for capacity expansion by the private sector using renewable energy, specifically small hydropower and electricity from bagasse in the sugar industry. The Mission has funded a portion of the hydropower feasibility study.
- o Co-funding with ROCAP the establishment of an electrical generation and transmission association composed of four existing rural cooperatives.
- o At the request of the Mission, funding a four-day study tour to California in January 1991 by the Minister of Natural Resources, Energy and Mines and the President of ICE, to expose them to utilities and private companies who have cooperated in the latter's independent production of electricity and sales to the former.

**2. Guatemala:**

- o With a buy-in from the Mission, developing a methodology for estimating the national electric utility's avoided costs, in order to assist the Ministry of Energy and Mines and the utility in initiating the purchase of electricity from private sector producers, beginning with the sugar industry.
- o Through the Centro MesoAmericano de Estudios Sobre Tecnologia Apropiada, developing a market for improved woodstoves.
- o Evaluated policy, management, and technical issues related to the efficiency of operations of isolated diesel power utilities, as part of a global study of such issues in collaboration with the World Bank and other bilateral aid agencies (this occurred in spring 1990).

**3. Honduras:**

- o With co-funding from the Mission (through a buy-in), determining the feasibility of private sector power generation for on-site usage and possibly off-site sales, using forestry and or sawmill residues.



4. *Belize:*

- o Working with the Mission energy officer and Embassy commercial officer to determine the feasibility of private power generation using citrus industry wastes.

5. *El Salvador:*

- o At request of Mission, organizing a two-day workshop on private sector participation in the power sector, to be held in San Salvador in early 1991.

6. *Panama:*

- o At request of the Mission, providing a speaker with experience in private power development in Latin America for a half-day workshop on strategies for the power sector being organized by the Mission for late November 1990.

7. *Central America Region:*

- o Earlier in 1990, worked with A.I.D.'s Regional Office for Central America and Panama (ROCAP) in preparing background reports for the development of an energy strategy statement for the Central America Region.
- o Also earlier in 1990, worked with ROCAP in performing a desk study of the status of Nicaragua's power sector.

8. *Dominican Republic:*

- o Assessing the legal, economic, and institutional issues in private power generation, assisting with the drafting of relevant legislation, and evaluating and monitoring the implementation of such legislation.
- o Providing assistance to a U.S. private sector power developer to conduct a feasibility study on the rehabilitation and privatization of two gas turbine generation facilities.
- o Working with the Mission to determine the appropriateness and attractiveness of supporting U.S. and Dominican private companies examining private power generation from municipal waste.

9. *Jamaica:*

- o Co-sponsored a conference on private power and efficiency in September (with the World Bank, the Jamaican utility, and the Jamaican national petroleum company).
- o Providing assistance to a private U.S. firm to conduct a feasibility study on power generation in the sugar industry, for sale to the national power company.

**10. Bolivia:**

- o Working with the World Bank to investigate the potential for private sector power projects using the "build-own-transfer" approach.

**11. Colombia:**

- o At the request of the World Bank, organizing a workshop on private sector participation in the power sector, to be held early in 1991.

**12. Brazil:**

- o Working with the German foreign aid agency, the World Bank, and the Inter-American Development Bank to create a semi-private institute that will develop a range of programs promoting energy efficiency, with a probable focus on the industrial sector. The LAC Bureau has bought into this activity.
- o Working with Princeton University and the Government of Brazil on examining the impact of cogeneration in the sugar and ethanol industries of Brazil.
- o Coordinating participation of the Government of Brazil in development of advanced gas turbine systems fueled with biomass.
- o Funding a pre-investment study for advanced technologies to convert wood to charcoal.

**13. Mexico:**

- o As part of the Agency's Global Warming Initiative, will collaborate with the Mission in sending a definitional mission to Mexico in early 1991, to determine effective low-budget activities for implementation (discussions have been held with World Bank and the U.S. Department of Energy about possible collaboration).

LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION (OLADE)  
VISIT TO DOE MAY 26, 1994

Francisco Gutierrez, Secretary General, and Ugo Altamonte (UNDP employee), both from OLADE, met with several people in DOE to discuss various programs in OLADE. Discussions covered oil and gas, offshore drilling and environmental protection from spills, energy information and data bases, the upcoming Western Hemisphere Presidential Summit, international energy markets, geothermal energy, wind-hydro-ocean energy, solar energy, and energy efficiency in transportation, industry, and buildings. Gary Ward, International Affairs, 202-586-6123, was the DOE contact for the day.

Francisco Gutierrez stated that OLADE has a strong interest in helping South American countries develop geothermal energy. Central America is much farther ahead in geothermal development. Strong concern was mentioned for Bolivia. At Sol de Mañana (Laguna Colorada), in the western cordillera near the border with Chile, Italians drilled 4 wells to depths of 1180 to 1600 m between 1987 and 1989. These wells are available to produce 18 MW for a nearby mine, but there is no money for power plant construction. The mine is ready to pay for the electricity. This area is of special interest to Antonio Razo who heads the Geothermal Office of OLADE. OLADE would like U.S. geothermal development companies to consider this area for development.

Mr. Guterrez also mentioned a recent meeting with Gustavo Cuellar, geothermal specialist at the U.N. Gustavo Cuellar mentioned to Francisco Guterrez and Ugo Altamonte that the new President of El Salvador is very interested in geothermal development. Mr. Guterrez thought there would be opportunities for U.S. geothermal development in El Salvador. This potential development in El Salvador should be discussed with Gustavo Cuellar at the U.N. or Antonio Razo at OLADE.

Mr. Guterrez suggested that DOE with U.S. industry and OLADE plan 2 meetings for Latin America to have industry talk about the advantages of geothermal development. The advantage for countries without oil and gas is clear, but the countries with petroleum do not see the advantage of domestic development of geothermal energy and greater export of the petroleum thus freed from internal use. Mr. Guterrez suggested these meetings be targeted for Latin American energy ministers and natural resource ministers. One meeting would be in Quito for countries in South America, and the other meeting would be in San Jose for the Central American countries. Francisco Gutierrez would like DOE or U.S. industry pay for the travel for 2 persons from each country.

ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA  
DEPARTAMENTO TECNICO  
PROGRAMA DE GEOTERMIA

DESARROLLO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE LA GEOTERMIA  
EN AMERICA LATINA Y EL CARIBE

INFORME PG 4/92

## 2.1.2. Bolivia

Durante el año 1975 una misión italiana llevó a cabo el primer reconocimiento geotérmico del país, para establecer en forma preliminar la existencia de condiciones geológicas favorables para la presencia de recursos geotérmicos de alta entalpía.

En 1976, la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) y los Ministerios de Energía e Hidrocarburos y de Minas y Metalurgia iniciaron con fondos del PNUD la evaluación del potencial geotérmico de Bolivia, dando como resultado la identificación de 7 áreas de interés geotérmico en: Volcán Sajama, Empexa, Salar de la

Laguna, Volcán Ollague-Cachi Laguna, Laguna Colorada, Laguna Verde y Quetana. Este estudio se llevó a cabo principalmente en el suroeste del país, con la participación del Grupo ENI de Italia.

Entre los proyectos más atractivos para llevar a cabo desarrollos geotérmicos se definieron los de Valle del Río Empexa y Laguna Colorada, situados en la Cordillera Occidental cerca del límite de Bolivia con Chile; adicionalmente se señalaron otras zonas geotérmicas en el Altiplano y las Cordilleras Oriental y Occidental.

Para el año 1983 una investigación de las manifestaciones termales en el país, indicó que existían 42 (Tabla No. 3), sin embargo las más importantes seguían siendo Valle del Río Ampexa y Laguna Colorada.

TABLA No. 3.- PRINCIPALES MANIFESTACIONES TERMALES EN BOLIVIA

---

### CORDILLERA OCCIDENTAL

RIO JUNTHUMA  
RIO KASILLA  
RIO POCOKAHUA  
PARAJOYA  
TOWA  
EL DESIERTO  
MINA CONCEPCIÓN  
EMPEXA  
VOLCAN IRRUPUTUNCU  
SALAR DE LA LAGUNA  
VOLCAN OLCA  
VOLCAN OLLAGUE  
LAGUNA PASTO GRANDE  
RIO QUETENA  
SAIBOL  
RIO HUAYLLAJARA  
RIO AGÜITA BRAVA  
POLKES  
CAMPTO. MINA RIO BLANCO  
CAMPTO. MINA SUSANA  
RIO DE AGUAS CALIENTES

### BORDE ALTIPLANICO ORIENTAL

VISCOCHANI  
OBRAJES  
COPACHOS  
POPO  
URMIRI DE PAZÑA  
CHALLAPATA  
RIO PARIA (ORCKORANY)

### CORDILLERA ORIENTAL

MINA MATILDE  
AGUAS CALIENTES DE HU  
AGUAS CALIENTES DE LLA  
COTAVI  
BALNEARIO MUNICIPAL DE UNI  
RIO JUNTHUMA  
LULUNI  
TALULA  
TOTORA PAMPA  
BALNEARIO DE MIRAFLORES  
LAGUNA TORAPAYO  
DON DIEGO  
CHAQUI

---

regional de Energía Geotérmica del Neuquén (CREGEN) creado en 1985, exploró un área de 400 Km<sup>2</sup> con geología, geoquímica e isotopía y definió tres zonas de interés geotérmico: una en Tocomar, otra cerca del Volcán Tuzgle y una más en la zona de Pompeya. Por las características, especialmente las geoquímicas, el CREGEN determinó que Tocomar y Tuzgle correspondían a zonas geotérmicas de media entalpía (132°C a 143°C), y el de Pompeya a uno de baja entalpía, ya que en este sitio se calcularon temperaturas no superiores a los 70°C.

En Valle del Cura los estudios de prefactibilidad han permitido inferir a profundidad la probable existencia de fluidos geotérmicos con temperaturas mayores de los 200°C, y un acuífero superior secundario con temperaturas entre 130°C y 150°C.

### 3.1.2. Bolivia

Los primeros estudios de prefactibilidad se llevaron a cabo en este país durante 1978 y 1979, mediante la cooperación de la Corporación Andina de Fomento (CAF) y el Gobierno de Italia, en el Valle del Río Ampexa y Laguna Colorada, siguiendo la metodología de OLADE. La compañía Aquater que realizó los trabajos, entregó el informe respectivo a mediados del año 1980, señalando la importancia de ambas zonas geotérmicas.

En Valle de Río Ampexa, situado al Oeste del Río Salar de Uyano, uno de los más caudalosos del mundo, la geología, geofísica y geotermometría sugirió la existencia en el subsuelo de fluidos geotérmicos con temperaturas de 230°C a 240°C. La resistividad y 6 pozos de gradiente, aunados a la geoquímica, indicaron que entre los sitios denominados El Desierto y Fuente de Towa, se encuentra una de las zonas de mayor interés geotérmico.

Laguna Colorada, ubicada en la Cordillera Occidental cerca de la frontera con Chile, al este del campo geotérmico de El Tatio en Chile y a 200 Km al sur del Valle de Ampexa, corresponde a una zona de vulcanismo Cuaternario afectado de fracturamiento intenso. La geoquímica que desde sus inicios permitió calcular temperaturas de 200°C a 250°C en el subsuelo, se complementó con investigaciones geofísicas y un pozo de gradiente a 127 m de profundidad, con los que se infirió la existencia de un yacimiento geotérmico. En base a esta información, posteriormente se decidió continuar con los estudios de factibilidad cuyos resultados permitieron identificar el primer campo geotérmico del país.

Los resultados obtenidos en la campaña de estudios de 1978 y 1979, llevaron a la selección del área de Laguna Colorada para realizar en ella investigaciones de superficie de mayor detalle. Estas se ejecutaron en 1986 en un área de 500 Km<sup>2</sup> y comprendieron geología, geofísica y geoquímica. La geoelectricidad consistió de 149 sondeos eléctricos verticales (SEV), con espaciamentos electródicos para AB/2 entre 4.000 y 10.000 m.

El resultado de los estudios en Laguna Colorada permitió la elaboración del modelo geotérmico de Sol de Mañana y la selección de los sitios para la perforación de pozos exploratorios de la etapa de factibilidad, tanto en Apacheta como en Sol de Mañana. Otras zonas de interés geotérmico se definieron en Agüita Brava y Huayllajara, en el área de Laguna Colorada.

### 3.1.3. Colombia

Organismo oficial encargado de coordinar las actividades de implementación de una posible central de generación geotérmica en Copahue, realizó la perforación del segundo pozo exploratorio profundo a 1241 m en esta zona geotérmica, el cual produjo vapor seco a partir de los 736 m.

En base a los resultados de los dos pozos ya perforados, en 1986 se instaló una planta de ciclo binario de 0.67 MW, para operar con el fluido que produce el pozo Copahue I.

En el marco de un convenio de cooperación con el Japón (JICA), el CREGEN está realizando el estudio de factibilidad técnico-económico del campo, que incluirá los resultados del pozo Copahue III perforado a 1065 m de profundidad, con producción de 8.6 t/h de vapor seco a una presión de 10.9 Kg/cm<sup>2</sup> en la boca del pozo.

Los estudios de factibilidad han permitido estimar la capacidad del campo en 20 MW, en un área de 4 Km<sup>2</sup> entre los tres pozos perforados, que bien podría aumentar a 80 MW en 13 Km<sup>2</sup> marcados como de interés por la geoelectricidad.

#### 4.1.2. Bolivia

En base a los resultados de la investigación de superficie, entre 1987 y 1989 se perforaron 4 pozos exploratorios profundos en Laguna

Colorada en el área denominada Sol de Mañana, de los cuales tres fueron productores con características favorables para la generación de electricidad. Los pozos perforados en rocas volcánicas (ignimbritas y andesitas), se terminaron con tubería de ademe hasta los 700 m de profundidad y en agujero abierto la parte inferior de los pozos, cuyas profundidades varían entre 1180 y 1600 m.

La evaluación del yacimiento indica que éste es un depósito de agua dominante, que se encuentra a profundidades comprendidas entre 977 m y más allá de los 1486 m, permitiendo producciones de 270 a 350 t/h por pozo, a 7 bars de presión y con entalpías de 1050 kJ/kg.

El potencial probado para el campo con los tres pozos perforados es del orden de los 18 MWe; él probable se estima en 60 MWe y el posible en 150 MWe. Tomando en cuenta estos resultados las investigaciones deberán seguir al grado de buscar a futuro la explotación comercial del campo.

Ampexa es el primer campo geotérmico del país (1987) en el cual se realizó la perforación de un pozo profundo, tendiente a determinar su factibilidad geotérmica. A la fecha dicho pozo sigue siendo el único en el campo y fue perforado a 1400 m de profundidad, habiendo registrado temperaturas de yacimiento de 260°C y una producción de solamente 30 t/h de vapor, con entalpía de 1400 kJ/kg a 7 bars de presión.

Los resultados obtenidos en este pozo han permitido ser optimistas a las autoridades de la Empresa Nacional de Electricidad S.A. (ENDESA), y la exploración de factibilidad deberá continuar con la perforación a futuro de más pozos y la evaluación del yacimiento.

explotación mediante una central que aproveche los fluidos de alta entalpia.

### 5.1.2. Bolivia

Los estudios de factibilidad llevados a cabo en Sol de Mañana, hasta ahora han permitido determinar como reserva probada la capacidad de 18 MW, una probable de 60 MW y otra posible del orden de los 150 MW.

El éxito obtenido en 3 de 4 pozos exploratorios perforados cuya producción manifiesta la existencia de un yacimiento con temperaturas de 240°C a 260°C, a profundidades de 800 a 1000 metros, ha llevado a la Empresa Nacional de Electricidad, S.A. (ENDE) a programar inicialmente su explotación, mediante la instalación de dos unidades de poca capacidad (4 MW cada una), para aprovechar el potencial disponible de vapor y continuar con la evaluación precisa del yacimiento, para instalar a futuro una central geotermoeléctrica de mayores dimensiones.

Actualmente se está realizando un "programa de ampliación de perforaciones", que consiste en perforar un nuevo pozo (SM-5) y estudios complementarios de ingeniería de yacimientos, que lleven a garantizar la disponibilidad de fluido geotérmico para una central geotermoeléctrica de mayor capacidad y disponer de un pozo para la reinyección de los fluidos geotérmicos de desecho. Posteriormente (1992-1993) se tiene prevista la instalación de las plantas geotermoeléctricas y su conexión al mercado local.

### 5.1.3. Costa Rica

Como resultado de las investigaciones llevadas a cabo en el campo geotérmico de Miravalles, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) determinó entre 1984 y 1988 la posibilidad de instalar como parte de su plan de expansión eléctrica, dos unidades turbogeneradoras de 55 MW cada una, utilizando como fuente de energía el recurso geotérmico. La primera de ellas se programó para entrar en operación el año de 1992 y la segunda en 1993, sin embargo debido a problemas relacionados aparentemente con la licitación de los equipos, el ICE no llevará cabo tal programa y la primera unidad comenzará a operar con un retraso de varios meses, de tal manera que el inicio de la generación será para 1994 y el de la segunda unidad varios meses más tarde, esto es, en 1995.

El financiamiento de la primera unidad de 55 MW de Miravalles se está llevando a cabo en forma conjunta por medio del BID y el Gobierno de Japón. El de la segunda unidad aún está en trámite.

Actualmente el campo de Miravalles cuenta con 9 pozos, de los cuales 7 son productores y 2 reinyectores. Siendo su capacidad de producción de vapor equivalente a 35 MW, el ICE deberá realizar durante los próximos años la perforación de varios pozos para completar el vapor requerido para la primera unidad de 55 MW. Más

# UURI

391 CHIPETA WAY, SUITE C  
SALT LAKE CITY, UTAH 84108-1295  
TELEPHONE 801-584-4422

Mr. John Ryan  
Coordinator, Project Finance  
IFREE  
Suite 930  
750 First Street, N. E.  
Washington, D. C. 20002

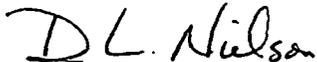
Dear Mr. Ryan:

This is an amendment to our request for travel funds to investigate geothermal opportunities in Costa Rica. As you requested we have suggested adding two additional people to the team.

1. We have requested through the attached letter to Mr. William White that Mr. Gary Ward be assigned to accompany us.
2. Mr. Domenic Falcone, a Principal in Creston Financial Group has been suggested as a representative of the financial community. His qualifications have been forwarded to you by Martin Booth.

Please contact myself or Mike Wright if there are further questions or suggestions. I will be out of the country between February 24 and March 14, so Mike will be the better contact for the next few weeks.

Sincerely,



Dennis L. Nielson  
Associate Director

UNIVERSITY OF UTAH RESEARCH INSTITUTE

# UURI

391 CHIPETA WAY, SUITE C  
SALT LAKE CITY, UTAH 84108-1295  
TELEPHONE 801-584-4422

Mr. William White  
Deputy Director  
U.S. Department of Energy  
1000 Independence Ave., S.W.  
Washington, DC 20585

February 3, 1994

Dear Bill,

The geothermal industry is very much interested in developing easier and more successful methods of doing business in Latin America. As a result of your interest in the potential for geothermal power development to displace a large, environmentally damaging hydro project in Costa Rica, several of our member companies have gotten together to submit a proposal to DOE for geothermal work in that country. The proposed project would blaze a trail for other U.S. companies to follow in (1) negotiating a geothermal concession, (2) complying with environmental and other regulations, (3) negotiating a power-purchase agreement with the Costa Rican utility ICE, and (4) exploration, drilling and construction of a geothermal power plant in Costa Rica. As you know, the Costa Ricans in the past have given U.S. companies only relatively small pieces of geothermal projects, with the major portions usually being contracted to Italian geothermal companies. The Italian government has been very aggressive in pursuing geothermal projects for its industry in countries throughout the world.

Development of geothermal power generation has been extremely slow in Costa Rica, especially given the enormity of the resource. We believe that the process could be speeded up considerably using U.S. expertise and the new business environment for developing private power in that country. However, the first geothermal project to actually navigate the complete path will be the most difficult and, if successful, will form a model that other U.S. companies can follow.

The proposed project has been discussed with Tom Hall in DOE's CORECT program who suggested that we present the proposal to the U.S. ECRE office. We have been given strong encouragement by Judy Siegel at ECRE and John Ryan who runs their IFREE program. They have indicated that a cost-shared project may be funded if we have support from your office. These organizations made funding available to organize a trip to Costa Rica and other Central American countries to examine project feasibility first hand. Such a trip is

tentatively planned for early June, 1994, after installation on the new government in Costa Rica following February elections. Our project has also been discussed with Gary Ward, who I understand accompanied you on your trip to Costa Rica, and who is enthusiastic and supportive.

It would help us greatly if you would be willing to do two things:

1. Indicate your support for our project to Gary Ward and ask him to pass on this support to the CORECT and ECRE people; and,
2. Designate Ward as your representative to accompany us on our forthcoming trip to Costa Rica and other Central American countries, and to maintain cognizance of this project.

The geothermal industry is certain that several goals of the Clinton Administration can be furthered through your support. Installation of geothermal power generation can be accomplished in Latin America in the short term, helping to alleviate environmental problems, maintaining 1990 levels of CO<sub>2</sub> emissions and creating jobs for Americans through export of our goods and services. We thank you for your help.

Sincerely,

A handwritten signature in cursive script that reads "Mike". A long horizontal line is drawn across the signature, extending to the right.

Phillip Michael Wright, President  
National Geothermal Association

## **QUESTIONS TO BE ANSWERED LATIN AMERICAN GEOTHERMAL CONCESSIONS**

Phillip Michael Wright  
Geothermal Energy Association

1 March 1994

### **GENERAL QUESTIONS**

1. **POINTS OF CONTACT.** Who will be our chief points of contact within the government and the government's electrical utility for the Latin American country? What is the position and title of everyone we need to know and to deal with in bringing a private power project to successful conclusion in the country, including the utility and regulating agencies?

2. **POLITICS OF POWER DEVELOPMENT.** What are the politics of power development in the Latin country? What political or other barriers may we face in bringing a private power development project to fruition? Does the government have an energy strategy or a short- or long-range plan for development? Which energy fuels is the government relying on now and/or will rely on in the future?

3. **NEED FOR POWER.** What is the need for new electrical generating capacity within the country? Within the region? What plans already exist for supplying this new capacity? What repowering plans are there? How reliable are projections of need for new capacity? Is there a desire to export electrical power, or will the power be used in solely within the government's economy? What part does the Latin government see for geothermal energy in the country? Is geothermal energy development supported by the government? By the public?

4. **GEOTHERMAL CONCESSIONS.** Are there geothermal concessions available now or in the near future? How will concessions to geothermal resources be handled? Will there be long-term title or lease to the resource (20 years or more)? What about title, lease, or other rights of access to the surface? What conditions will be placed on concession agreements? Will there be a desire or attempt by any entity of the local government to control and develop the resource and sell geothermal fluids to the geothermal plant developer, or will the entire project be done by the private developer?

5. **PRIVATE DEVELOPMENT AND POWER PURCHASE AGREEMENT.** Are the laws and regulations completely in place for private power development and sales? What restrictions are there? Has any foreign group or company, using geothermal or other fuels, successfully negotiated a private power-purchase agreement with the government or with a large industrial or other user of electricity? Have there been failed negotiations? What is the strategy for negotiating a power-purchase agreement? With what agency is it negotiated? How long will it take to negotiate? What is the final sign-off process, and at what level of government? What

price per kwh can we expect? What is the price of power charged by the government utility? What are their published avoided costs of electrical power? Are there any other private power-purchase agreements in place? How are they constructed and what is the price? Is there a pro forma agreement we could obtain? What types of agreements are acceptable (BOO, BOT, BOOT, etc)? What term could we expect for any negotiated agreement? Are counter-trade agreements acceptable, desirable or needed?

6. **REPATRIATION OF PROFITS.** What restrictions in law or in fact are there against repatriation of profits from private-power or other private investment in the host country? Has there been a history of problems or lack of problems in this regard?

7. **PERMITS.** What permits are needed for all phases of the work? Who are they obtained from? How long do they take to acquire? What is the cost of each permit? What is the permitting process for: exploration work, drilling (both small exploration rig and big rig), road construction, power-plant construction, fluid-gathering system piping, transmission-line construction, waste and water disposal.

8. **ENVIRONMENTAL REGULATION.** What environmental requirements must be met? Are there requirements for EIS-like studies? What air-emissions standards are there for power plants? Is geothermal energy perceived as being environmentally friendly or advantageous by the government? By the public? If not, why not? What problems exist with governmental and public perception of power projects in general and geothermal projects in particular?

9. **DUTIES AND TAXES.** What import/export duties and/or taxes are imposed on equipment - both equipment brought in permanently and equipment brought in for the project and taken back out of the country after use? Is there significant hold-up in customs for bringing equipment into the country or getting it back out? Will the government or utility be willing to intercede with their customs to expedite this? What are the taxes on money spent for exploration, drilling, construction? Are there any other taxes?

10. **REPORTING AND CONFIDENTIALITY OF DATA.** What technical, financial and other reports and paper work will be required by the Latin government during the project? Will the private power developer be able to restrict distribution of sensitive information? If so, what types of information? What information must be made public? What information must be supplied on the resource? on the power plant? on the overall operations? and with what frequency?

11. **COURTESY PAYMENTS.** What courtesy payments are expected, to whom, how often, how much, and how can we be assured of operating legally while still getting business done in a timely fashion? Of course, the U.S. geothermal industry's companies working on this and other projects in Latin America are aware of the traditional methods of doing business, but we will not be willing to operate outside of U.S. or local law.

12. **PARTNERS.** Is there a requirement for a local Latin American partner? What part will

such partners play? How will we interact with them? What kind of assistance can we expect from them? Will they provide some of the financing? Will they finance or partly finance the feasibility work? What politics are involved in their participation (do we have to use certain subcontractors, etc)?

13. **FINANCING.** How much, if any, of a geothermal project could be financed through local or regional Latin American banks? How much financing, if any, could the Latin government or its utility furnish? What is the credit rating of the government on the world capital markets? Does the country have large debt now with the United States, and could a debt swap be arranged with the U.S. government and the local Latin government to assist in paying for a geothermal project?

14. **U.S. GOVERNMENT IN-COUNTRY ASSISTANCE.** What U.S. Government offices are maintained in Latin American countries that can assist us -- Embassies, AID Missions, Department of Commerce offices, U.S. city or state Chambers of Commerce. Will the local U.S. Embassy or AID offices be enthusiastic about helping us? What will their requirements be? Do we need letters from the host-country government agencies and/or any partners before we can get help?

15. **SUBCONTRACTOR AVAILABILITY.** What is the availability of local subcontractors and partners? Environmental firms, legal firms, land firms, risk-oriented banks or firms, construction contractors (excavation, concrete, road building, plant construction), chemical and other similar services, drilling and service contractors.

16. **OFFICE SPACE.** What is the availability and cost of office space in major cities and in cities near the concessions? What is the cost of space, phones, secretaries, copying facilities and other items of office assistance? What about bringing office and similar equipment into the country? Will we have to have our own offices, is it advisable that we do, or is it preferable to have space with a partner? What about warehousing, equipment transfer etc. What about security -- how big a problem is it?

17. **PORT FACILITIES.** How do goods and large equipment normally flow into the country? How good is the transportation system within the country? Where are the best port facilities and how good are they? What about crane capacities? What are labor rates for longshoremen, etc.?

18. **FREIGHT AND HAULAGE.** What is the availability and cost of trucking for all sizes of equipment?

19. **ACCOUNTING.** What is the availability of accounting services? How much do they cost? How about auditing firms?

20. **GEOHERMAL DATA AVAILABILITY.** How much data on geothermal resources are available from the local government? How can we obtain these data -- do we study the data in government offices or can we copy it for our use? Is there a charge for the data and how much?

Can we get information on country-wide, regional and local electrical grids?

21. **EXPLORATION.** Regarding exploration field work: What is the availability of well trained people to do geological, geochemical and geophysical field surveys? What is the cost? How timely is the response from local consultants and contractors, should these become necessary?

22. **DRILLING.** Regarding drilling: what is the availability of core rigs, small rotary rigs, production-size rigs and workover rigs? What are typical rig costs, mud costs, bit costs, logging costs, drill-pad construction costs, etc.?

### **FOR EACH CONCESSION**

1. **SCHEDULE.** How long will a U.S. company have to evaluate any existing data and decide whether to proceed with negotiations and/or feasibility studies? What sort of development schedule will the Latin government expect us to maintain?

2. **PERMITS, TAXES, DUTIES.** Are there regional permits, taxes, duties that affect work on any concession? If so, what is their nature and cost?

3. **PHYSICAL ACCESS.** What is the terrain and road access for equipment? What are the possibilities and costs for upgrading roads if needed? Will the Latin government assist financially or in-kind with such upgrades? What would be the process and restrictions for building new roads? Are there local air strips? Is there a railway network and how close to the concession does it come?

4. **TRANSMISSION GRID.** What are the details of the transmission grid, including extra capacity? Are there access fees? Will there be a need for construction of new power lines or will the government bring power lines in? How much power line might we have to furnish, what are construction costs? Will we have to furnish substations, what are costs?

5. **WATER.** What is the availability of potable and drilling/construction water at the site? What is the cost of water and of water haulage?

6. **MAPS.** What maps are available? Each project will need maps of roads, topography, vegetation, rivers and springs, land ownership, areas of environmental sensitivity, etc. Will the government assist in providing or making such maps?

7. **LOCAL LABOR.** What is the availability of local skilled and unskilled labor?

**MISSION TO  
COSTA RICA, GUATEMALA AND EL SALVADOR  
ON BEHALF OF  
GEOTHERMAL ENERGY DEVELOPMENT**

A group of companies from the U.S. geothermal industry will be undertaking a 10 - 14 day mission to the Central American countries of Costa Rica, Guatemala, and El Salvador during early June, 1994. They will be accompanied by representatives of the Department of Energy. Their purposes will be to determine what steps need to be taken in developing geothermal energy for private electrical power generation and to search for viable geothermal projects that could be undertaken. This document gives a brief summary of the objectives, anticipated accomplishments, and focus of this mission.

**PARTICIPANTS**

Participants on the mission will be:

- \* Geothermal Development Associates (GDA), Reno, NV, a developer of geothermal power projects.
- \* University of Utah Research Institute (UURI), Salt Lake City, UT, an earth-science consultant experienced in geothermal exploration and drilling.
- \* Dames and Moore, San Francisco, CA, a consulting company experienced in the environmental aspects of geothermal development.
- \* Creston Financial Group, Oakland, CA, a company experienced in the financing of geothermal power projects.
- \* Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), Berkeley, CA, a DOE National Laboratory with expertise in geothermal development.
- \* Department of Energy (DOE), Washington, DC.

**OBJECTIVES OF THE MISSION**

The primary objectives of the mission will be to:

- \* Determine the state of readiness of each country to allow and support private power development within its borders; and,
- \* Determine what steps are necessary to develop private power in each country.

## ANTICIPATED ACCOMPLISHMENTS

The fondest hope of the companies on this mission would be to negotiate a power sales agreement and obtain a geothermal concession for development. However, this hope is not likely to be realized on this mission alone due to the complex nature of these tasks. The realistically anticipated results of the mission are to:

- \* Meet important people in the various government agencies who will be negotiating private power agreements and establish a working relationship with them;
- \* Obtain the answers to a long list of questions, some of which are given in the attachment, that will allow the potential of each country to be assessed;
- \* Use the information obtained to reach the primary objectives of specifying what steps are necessary and the state of readiness for private power development projects in each country; and,
- \* Perhaps, sign a memorandum of understanding or similar document indicating the willingness and the enthusiasm of the host government to proceed with a private power geothermal project.

## FOCUS OF THE MISSION

We anticipate that the mission will focus first on projects for rural electrification using geothermal resources, with a secondary focus on projects for grid-connected power development. Rural electrification is a high priority in most developing countries. However, the relative priorities for these two options will be discussed with each government and the primary focus in each country will be on the highest priority option.

## LONG TERM OBJECTIVES

Many of the Latin American and Caribbean countries have abundant high-temperature geothermal resources suitable for electrical power generation. These countries have large areas with no electrical services, and their grids are generally plagued by blackouts due to a growing demand for electricity and due to periodic drought coupled with heavy reliance on hydroelectric power. The potential for export of U.S. geothermal goods and services to these countries is large -- perhaps \$2 - 6 billion or more over the next decade. The Geothermal Energy Association and the U.S. geothermal industry have the long-term objective of working in Latin and Caribbean countries over a sustained period of time to help them develop their infrastructure and become more self sustaining. The companies on this mission hope to blaze a path for others in the U.S. geothermal industry to follow by developing private power projects in one or more of the countries on the itinerary.

First Draft

Booth - 3 countries in today's  
is a best practice -

would be good if  
someone sets up  
meetings to get an  
agenda for  
each meeting

Marcie Goffin suggested as  
financial person

- she says there is  
nothing in their law that  
would allow PFD.

MISSION TO  
COSTA RICA, GUATEMALA AND EL SALVADOR  
ON BEHALF OF  
GEOTHERMAL ENERGY DEVELOPMENT

- ask for their input  
of what we should be aware  
of.

A group of companies from the U.S. geothermal industry will be undertaking a one and one-half week mission to the Central American countries of Costa Rica, Guatemala, and El Salvador during early June, 1994. They will be accompanied by representatives of the Department of Energy. Their purposes will be to determine what steps need to be taken in developing geothermal energy for private electrical power generation and to search for viable geothermal projects that could be undertaken. This document gives a brief summary of the objectives, anticipated accomplishments, and focus of this mission.

PARTICIPANTS

Participants on the mission will be:

- List of resources  
- those open to private  
- those of priority  
- Due diligence on each  
one.

- \* Geothermal Development Associates (GDA), Reno, NV, a developer of geothermal power projects.
- \* University of Utah Research Institute (UURI), Salt Lake City, UT, an earth-science consultant experienced in geothermal exploration and drilling.
- \* Dames and Moore, San Francisco, CA, a consulting company experienced in the environmental aspects of geothermal development.
- \* Creston Financial Group, Oakland, CA, a company experienced in the financing of geothermal power projects.
- \* Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), Berkeley, CA, a DOE National Laboratory with expertise in geothermal development.
- \* Department of Energy (DOE), Washington, DC.

OBJECTIVES OF THE MISSION

The primary objectives of the mission will be to:

- \* Determine what steps are necessary to develop private power in each country; and,
- \* Determine the state of readiness of each country to allow and support private power development within its borders.

Find out where we go?  
- can we privatize?

- ① Booth
- ② Nielson
- ③ Bradley
- ④ Falcone
- ⑤ Lippman
- ⑥ Reed

## ANTICIPATED ACCOMPLISHMENTS

The fondest hope of the companies on this mission would be to negotiate a power sales agreement and obtain a geothermal concession for development. However, this hope is not likely to be realized on this mission alone due to the complex nature of these tasks. The realistically anticipated results of the mission are to:

- \* Meet important people in the various government agencies who will be negotiating private power agreements and establish a working relationship with them;
- \* Obtain the answers to a long list of questions, given in the attachment, that will allow the potential of each country to be assessed;
- \* Use the information obtained to reach the primary objectives of specifying what steps are necessary and the state of readiness for private power development projects in each country; and,
- \* Perhaps, sign a memorandum of understanding or similar document indicating the willingness and the enthusiasm of the host government to proceed with a private power geothermal project.

## FOCUS OF THE MISSION

We anticipate that the mission will focus first on projects for rural electrification using geothermal resources, with a secondary focus on projects for grid-connected power development. Rural electrification is a high priority in most developing countries. However, the relative priorities for these two options will be discussed with each government and the primary focus in each country will be on the highest priority option.

## LONG TERM OBJECTIVES

Many of the Latin American and Caribbean countries have abundant high-temperature geothermal resources suitable for electrical power generation. These countries have large areas with no electrical services, and their grids are generally plagued by blackouts due to a growing demand for electricity and due to periodic drought coupled with heavy reliance on hydroelectric power. The potential for export of U.S. geothermal goods and services to these countries is large -- perhaps \$2 - 6 billion or more over the next decade. The Geothermal Energy Association and the U.S. geothermal industry have the objective of working in Latin and Caribbean countries over a sustained period to help these countries develop their infrastructure and become more self sustaining.

The long term objectives of the companies on this mission is to blaze a path for others in the U.S. geothermal industry to follow by developing private power projects in one or more of the countries on the itinerary.

**NATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION**

P.O. Box 1350  
Davis, California 95817-1350 USA  
(916) 758-2360 Fax: (916) 758-2839  
Telex: 882410

Date: February 14, 1994

To: Mike Wright, UURI; Dave Cox, California Energy Co., Tom Hinrichs, Magma Power; Bob Lawrence, Dave Flory, NGA Washington Office, and Ted Mock, DOE

From: David N. Anderson

Subject: Initiatives for Rural Electrification in Latin America

The following information has been sent to you at the request of Tsvi Meidav, NGA President. He also thinks that the material should be a subject of discussion for the next GEA telephonic or non-electronic board meeting.

**Department of Energy**

Washington, DC 20585

February 1, 1994

Dr. Tsvi Meidav, President  
National Geothermal Association  
P.O. Box 1350  
Davis, California 95617-1350

Dear Dr. Meidav:

Mr. William White, Deputy Secretary, has asked me to reply to your letter of January 5, 1994, regarding participation by the geothermal industry in initiatives for rural electrification in Latin America. We are aware of the potential of geothermal energy for generation of electricity in these countries, and welcome initiatives from the geothermal industry. Some industry initiatives are already underway in the rural electrification program including photovoltaics, wind power, and hybrid combinations with diesel. (See enclosures).

Your idea about providing "islands of power" for development of light industry in Latin America is interesting, and I am sure that others would also be interested if you develop this idea further. It is important for the economic and political strength of developing countries to provide employment in rural areas in addition to providing the education and health benefits from rural electrification. The World Bank has endorsed the stated interest of many developing countries to make rural electrification a major emphasis of international energy financing.

The Department of Energy is looking forward to hearing more from you on these matters.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "R. L. San Martin", with a long horizontal line extending to the right.

Robert L. San Martin  
Deputy Assistant Secretary  
for Utility Technologies  
Energy Efficiency and Renewable Energy

Enclosures

# U.S. Department of Energy



**WIND  
ENERGY**  
**PROGRAM OVERVIEW  
FY 1992**

## WIND ENERGY PROGRAM OVERVIEW

The VET project will support U.S. wind plant operators in rapidly developing more economic wind systems from proven turbine designs. At the same time, these firms will maintain or improve current levels of quality, performance, and reliability. This strategy involves a minimum of technical and financial risk.

DOE designed the VET project to allow the wind industry to commercialize competitive U.S.-built turbines within 1 to 2 years. To achieve this goal, DOE plans to award multiple subcontracts for the program in FY 1993.

### DOE funds new Wind Technology Applications Projects

In FY 1992, DOE funded seven cost-shared subcontracts to industry under its Government/Industry Wind Technology Applications Projects. The projects focus on enhancing the performance, efficiency, and reliability of wind plants; encouraging regional diversity for wind power in the United States; and defining new wind energy applications.

DOE's industry partners include Northern Power Systems; Bergey Windpower; Zond Systems, Inc.; Hawaiian Electric Renewable Systems; FloWind Corporation; Atlantic Orient Corporation; and Smith Wind Energy Corporation. These companies are providing from 23% to 93% of the funding for the cooperative projects. The projects include design support for a new village electrification system, a power inverter development project, a wind power plant performance improvement project, an alleron retrofit project for 600-kW wind turbines, a project to develop and test a new rotor for a vertical-axis turbine, and two activities to develop new blades for horizontal-axis turbine rotors. In a related area, DOE also funded a wind/diesel system analysis.



*Bergey Windpower installed six wind turbines near Xcalak, Mexico, to help provide electricity for a remote fishing village.*

### Remote wind energy systems to compete in overseas markets

Village electrification in regions currently without electricity represents a significant market opportunity for small wind systems. Northern Power Systems hopes to tap this market with its modular "rotary village power system" unit. The hybrid power plant consists of a diesel engine, a battery bank, system controllers, a power conditioning unit, and one or two 50-kW wind turbines. The company plans to install the stand-alone system in a remote area of Alaska. NREL and Sandia's Design Assistance Center will assist the company in evaluating the system at the site.

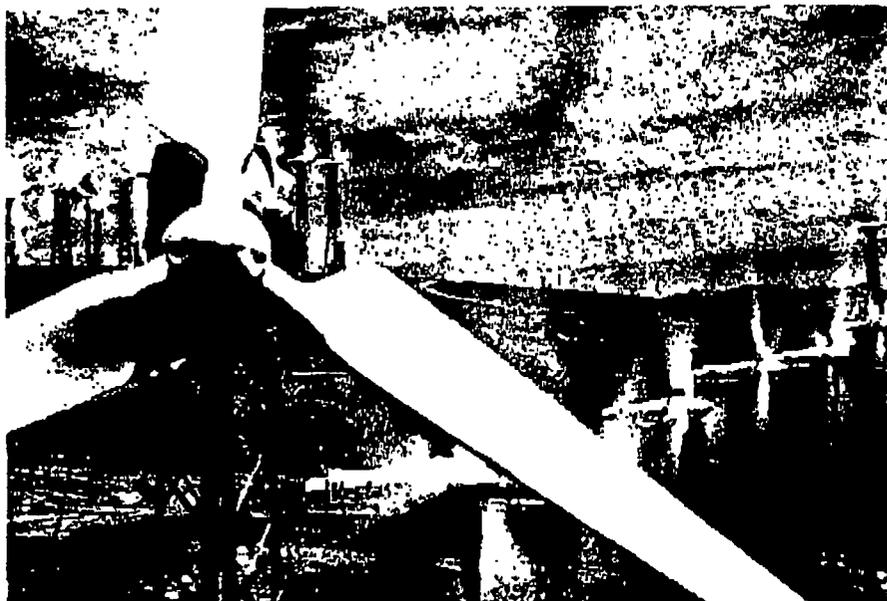
In August 1992, Bergey Windpower installed six 10 kW wind turbines near Xcalak, Mexico, on the southeastern tip of the Yucatan peninsula. The turbines were part of a village electrification project to provide power for 41 homes in the remote fishing village. The project replaced diesel generators that had been abandoned.

Technical assistance and funding are provided through the federal Committee on Renewable Energy Commerce and Trade (CORECT).

During FY 1992, the University of Massachusetts enhanced its computer model of a wind/diesel hybrid system to include three diesel engines and up to 20 wind turbines. Researchers also added battery storage and an option to add a module of photovoltaic cells to the model. In the laboratory, researchers upgraded their wind/diesel system simulator by modifying the system controller and adding a second, variable-speed diesel engine. Variable-speed engines are expected to operate more efficiently over a wider range of conditions and can save a substantial amount of fuel.

Bergey Windpower received funding for a project to improve the design of inverters used with stand-alone renewable energy systems. Inverters change direct current into alternating current. Bergey's new inverter should be more rugged than were the older

**WIND ENERGY PROGRAM OVERVIEW**



Lloyd Herrington, Zond Systems, Inc.

**New aileron controls enhance turbine performance**

In FY 1992, Hawaiian Electric Renewable Systems, Inc. began a joint project with NREL to develop aileron controls for the company's 600-kW wind turbines located on the island of Oahu. When extended out from the turbine blade, aileron controls slow a rotating wind turbine. Company officials expect the aileron controls to replace the turbines' trouble-prone hydraulic pitch-control systems.

Ailerons effectively control aerodynamic forces on a turbine rotor. They also allow turbines to respond more effectively to high winds. During severe turbulence, the Hawaiian turbines must run at half their rated power to avoid power spikes that may damage the drivetrain and generator. With aileron controls, the turbines could safely run at their full rated power.

*During FY 1992, Zond Systems, Inc., began a joint project with NREL to look at ways to improve the performance of its 65-MW wind plant located in California's Tehachapi region.*

models. Its current output will also be adjustable to conform to the power requirements in either Europe or the United States.

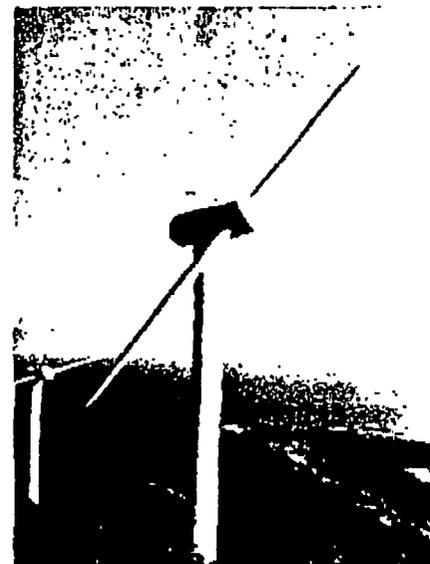
**New project aims at improving wind power plant**

During FY 1992, Zond Systems, Inc. and NREL began a joint project to evaluate ways to improve the performance of a 65-MW wind plant located in the Tehachapi region of California. Several activities are under way to accomplish this goal. In one series of tests, researchers are comparing the performance of new fiberglass turbine blades with conventional blades. The new blades incorporate NREL-designed thin airfoils, and the conventional blades use standard LS-1 airfoils. In 1992, researchers evaluated the performance of the LS-1 airfoil under normal operating conditions and in a simulated roughness test. For the latter test, researchers took strips of tape embedded with metal particles and attached them to the blades. The tape simulated soiling from insects and dirt.

Researchers also looked at loads induced on the turbine rotor when metal extenders were placed between the rotor hub and the blades to increase rotor diameter. Then they compared the loads induced by blades with these extenders with loads on normal blades. During FY 1993, researchers will repeat these tests on the same wind turbine equipped with blades that incorporate NREL-designed airfoils.

As part of this project, Zond also plans to measure the effects of yaw control improvements on loads and performance. In addition, the company plans to evaluate the potential for improving energy capture by relocating turbines within the wind plant. Zond will use computer models to predict energy output from proposed wind park layouts. The company will use an advanced data-acquisition system it developed for NREL (see p. 15) to instrument wind turbines for its many project activities.

During 1992, project participants completed three designs for aileron controls, tested them in Wichita State



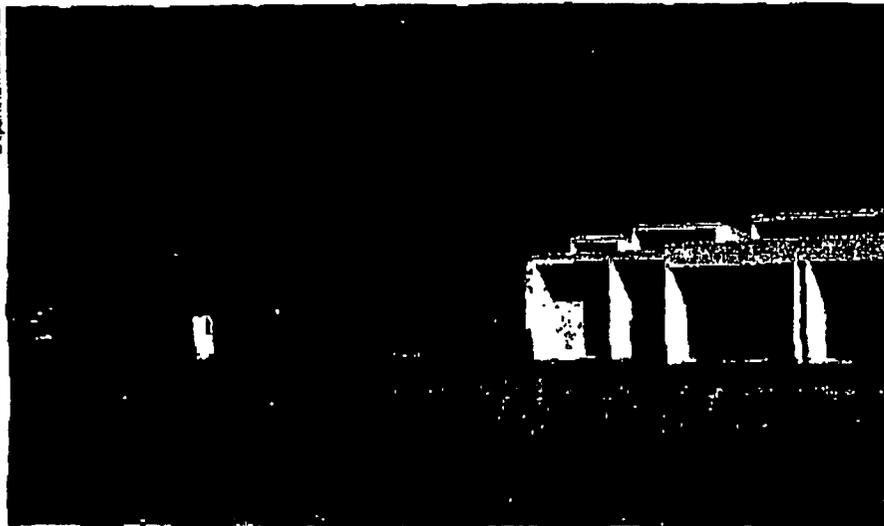
Hawaiian Electric Renewable Systems, Inc.

*These 600-kW wind turbines will get new aileron controls developed under a Wind Technology Applications Project launched in FY 1992.*

**PHOTOVOLTAICS: PROGRAM OVERVIEW FISCAL YEAR 1992**



Department of Defense



*During the last few years, the Department of Defense (DoD) has carried out a number of successful PV projects. For example, this security checkpoint building is powered by PV. In the next few years, DoD will install 100 MW of PV in similar installations.*

Federal Energy Efficiency Award for their accomplishments.

These experiences convinced DoD to use PV to fulfill a Congressional mandate for the installation of 100 MW of cost-effective renewables by 1996.

In 1992, DoD requested bids for up to nine projects to be installed in 1993. These projects will be especially important in demonstrating near-term applications that will soon be cost effective in the civilian sector. The PV Program will continue to provide technical assistance to DoD for defining projects, assessing applications, and monitoring the systems after they are installed.

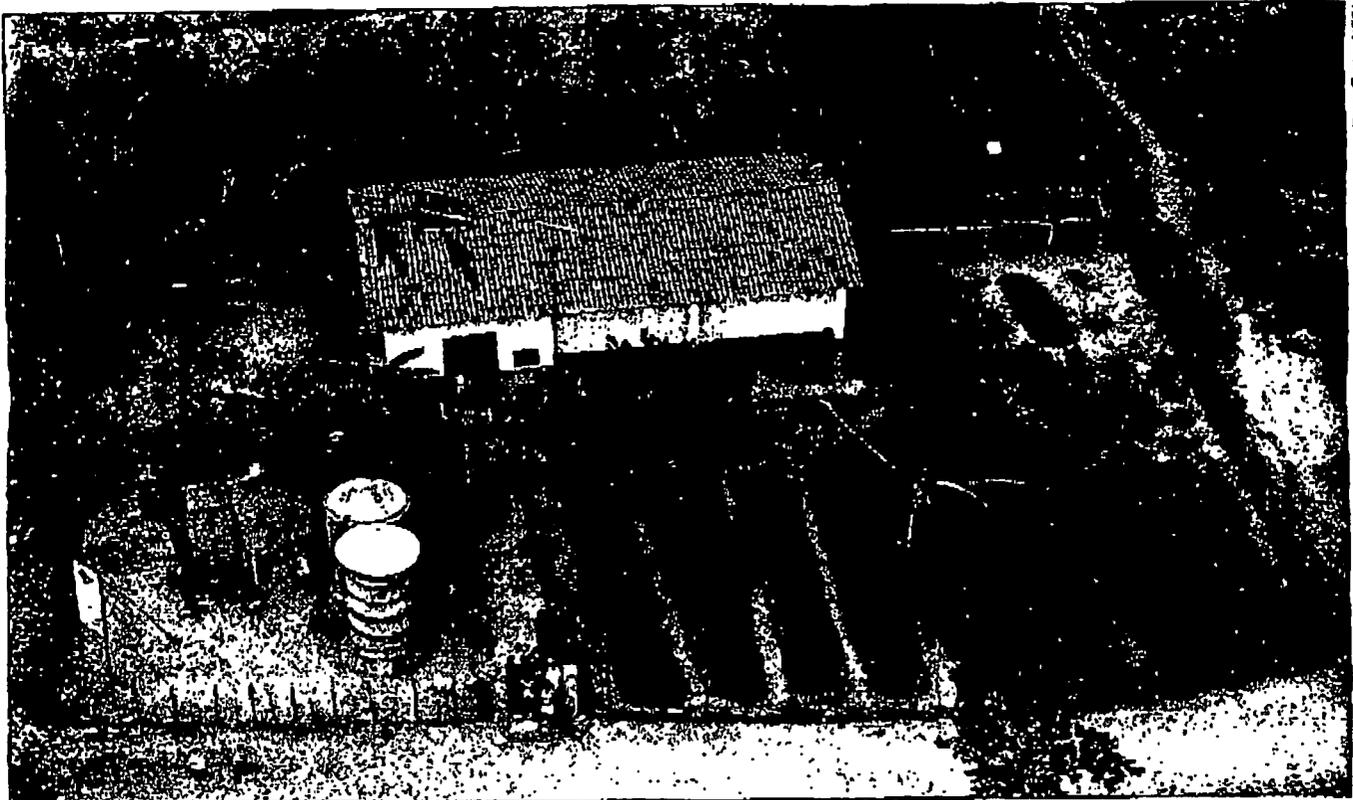
In another technical assistance project, a prototype for remote living centers began operating in 1992 in Arizona. When the National Park Service needed electricity for its isolated Cholla Campground in the Tonto

National Forest, the agency asked DOE's assistance with a design using renewable energy. PV proved to be a cost-effective option with environmental benefits. The cost of constructing utility power lines would have been three times that of the PV systems. In addition, utility power would have cost \$1,000 per month (for demand charges). The PV systems power water pumps, lights, fans, and communication equipment. Sandia's Design Assistance Center helped the Park Service and received a Special Federal Energy Efficiency Award for its contribution to the project.

The PV Program also worked with the Navajo Nation on several successful pilot projects using PV for remote homes. In 1992, the Navajo Tribal Utility Authority decided to expand its use of PV as an alternative to line extensions in rural areas. It estimates that more than 4000 rural homes currently have no electricity. The tribal authority will work with DOE's Western Area Power Administration and Sandia to design, select, and install PV systems that bring electricity to more people. An important element of the program is to train local personnel to install, operate, and maintain the equipment.

### **Helping U.S. Industry Tap International Markets**

International markets are important to the PV industry today, and they have the potential for tremendous growth. Revenue from these markets helps the U.S. PV industry expand.



Roger Taylor, NREL

*International PV projects, such as this one, which supplies power to a rural home in Ceará, Brazil (partially sponsored by DOE and Brazilian utilities), are often financed through utilities, banks, or other governmental organizations. The PV Program works with international financial organizations to ensure that they provide realistic technical specifications to the PV industry.*

Electricity demand in the developing world is projected to grow at 7% per year during the next 20 years. Today, approximately half the population of the developing world lives without adequate power supplies.

PV systems, with their moderate capital cost, modularity, low maintenance costs, and low environmental impact, are well suited to the needs of people in these areas.

Rural areas of a developing country are often poor, so PV installations are usually financed through a central organization, such as the

World Bank, a foreign government, or utilities. U.S. PV companies must be aware of these organizations and be able to comply with their requirements. The PV Program works with financing organizations to ensure realistic technical specifications and to relay information to the PV industry.

One organization working to help U.S. industry in foreign markets is called Financing Energy Services for Small-Scale Energy Users (FINESSE). As a result of FINESSE activities, the World Bank agreed to bring alternative energy technologies into its mainstream lending operations. The

PV Program supports FINESSE and the World Bank by providing technical specifications and assessments for PV projects. This activity, initiated by the U.S. government, will ultimately assist both the U.S. PV industry and the developing world.

DOE and the U.S. Agency for International Development (US AID) are working with the Government of Mexico on an ambitious, multiyear program under which more than

10,000 PV systems have been installed since 1989. To further assist the Mexican government with this giant undertaking, DOE has enlisted the help of

the Committee on Renewable Energy Commerce and Trade (CORECT). CORECT coordinates the efforts of 14 U.S. government agencies. Early in FY 1992, DOE and CORECT sponsored a cooperative program with the Mexican government, called PROCER (*Programa de Cooperacion en Energia Renovable*). Under the technical management of Sandia, a U.S. team of organizations is working with counterparts in Mexico to provide technical resources, expertise, and interactions with U.S. renewable energy companies.

#### **Utilities Deploy PV in Brazil**

During the United Nations Conference on the Environment and Development, in Rio de Janeiro, Brazil (the "Earth Summit"), the U.S. government and the Federal Republic of

Brazil agreed to sponsor a project to install 2000 small residential PV systems in two rural Brazilian states. Ultimately, PV could serve more than 500,000 homes, schools, and health clinics throughout Brazil. DOE will contribute \$800,000 toward the estimated \$2.65 million cost of the project's first phase.

This project, managed by NREL with technical assistance from Sandia, is especially promising because it involves local Brazilian utilities in the specification, installation, maintenance, and financing of the systems. U.S. manufacturers will be able to market their products to knowledgeable people within these utilities.

#### **Design Assistance Center**

In addition to financial and informational activities, DOE programs help build technical expertise in PV systems in foreign countries. This is accomplished primarily by the Design Assistance Center at Sandia through targeted workshops, directed written materials, and technical assistance to in-country organizations. Feedback to the U.S. PV industry is an important element of these efforts. The PV Program conducted technical workshops in Guatemala, Honduras, Mexico, and Bolivia in 1992.

In Guatemala, the United States was asked by utilities, NRECA/ Central American Rural Electrification Support (CARES), and US AID to conduct a workshop for utilities, industry, and users of PV systems. Supported

**Electricity demand in the developing world is projected to grow at 7% per year during the next 20 years.**

by the Ministry of Energy and Mines, the workshop was attended by more than 200 people from five countries in Central America. This workshop was followed several months later by hands-on training at Sandia.

With continuing help from the PV Program, Enersol Associates supported PV-based rural electrification in Honduras. Enersol conducted workshops and trained Peace Corps volunteers who have gone on to promote PV in the country. As a result, several U.S. companies are now marketing products in Honduras.

### Developing Near-Term, Value-Added Markets

The PV Program is helping industry reach markets where PV is, or soon will be, cost effective. The Solar 2000 collaborative strategy guides the PV Program's efforts to accelerate the commercial use of U.S. PV products. Market-conditioning projects, joint ventures among stakeholders, and technology development are combined to synchronize the final stages of product development with end-user design and construction requirements.

### Potential Applications of Photovoltaics in Buildings

**Demand-side management**

Photovoltaics can reduce the peak load of a building to the electric utility.

**Control**

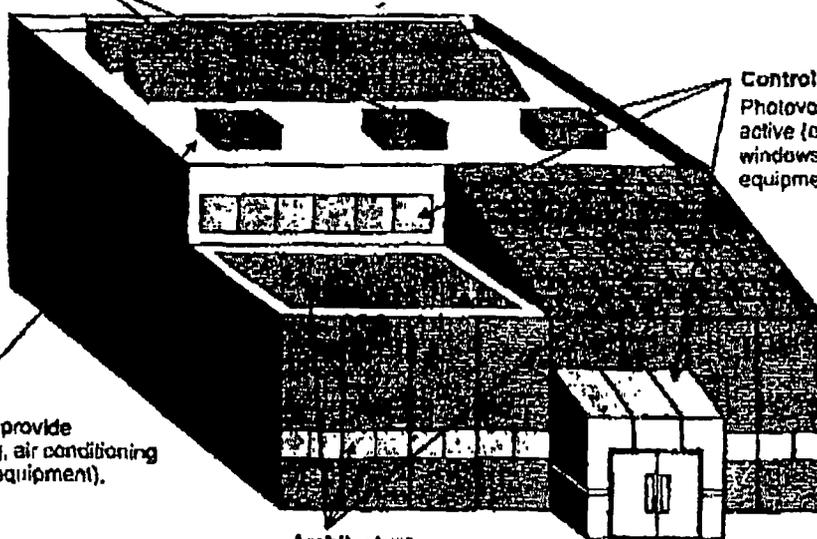
Photovoltaics can control active (electrochromic) windows and HVAC equipment.

**Multiple use**

Photovoltaics will provide energy for lighting, air conditioning and fans (HVAC equipment), and/or storage.

**Architecture**

Photovoltaics can form part of the roof, wall, or windows of a building.



EDS-CENTRO

*In the future, PV will provide power to many different types of energy-consuming equipment and will control other energy-related functions in buildings.*

UNIVERSITY OF UTAH RESEARCH INSTITUTE

**UURI**

391 CHIPETA WAY, SUITE C  
SALT LAKE CITY, UTAH 84108-1295  
TELEPHONE 801-584-4422

Mr. William White  
Deputy Director  
U.S. Department of Energy  
1000 Independence Ave., S.W.  
Washington, DC 20585

February 3, 1994

Dear Bill,

The geothermal industry is very much interested in developing easier and more successful methods of doing business in Latin America. As a result of your interest in the potential for geothermal power development to displace a large, environmentally damaging hydro project in Costa Rica, several of our member companies have gotten together to submit a proposal to DOE for geothermal work in that country. The proposed project would blaze a trail for other U.S. companies to follow in (1) negotiating a geothermal concession, (2) complying with environmental and other regulations, (3) negotiating a power-purchase agreement with the Costa Rican utility ICE, and (4) exploration, drilling and construction of a geothermal power plant in Costa Rica. As you know, the Costa Ricans in the past have given U.S. companies only relatively small pieces of geothermal projects, with the major portions usually being contracted to Italian geothermal companies. The Italian government has been very aggressive in pursuing geothermal projects for its industry in countries throughout the world.

Development of geothermal power generation has been extremely slow in Costa Rica, especially given the enormity of the resource. We believe that the process could be speeded up considerably using U.S. expertise and the new business environment for developing private power in that country. However, the first geothermal project to actually navigate the complete path will be the most difficult and, if successful, will form a model that other U.S. companies can follow.

The proposed project has been discussed with Tom Hall in DOE's CORECT program who suggested that we present the proposal to the U.S. ECRE office. We have been given strong encouragement by Judy Siegel at ECRE and John Ryan who runs their IFREE program. They have indicated that a cost-shared project may be funded if we have support from your office. These organizations made funding available to organize a trip to Costa Rica and other Central American countries to examine project feasibility first hand. Such a trip is

tentatively planned for early June, 1994, after installation on the new government in Costa Rica following February elections. Our project has also been discussed with Gary Ward, who I understand accompanied you on your trip to Costa Rica, and who is enthusiastic and supportive.

It would help us greatly if you would be willing to do two things:

1. Indicate your support for our project to Gary Ward and ask him to pass on this support to the CORECT and ECRE people; and,
2. Designate Ward as your representative to accompany us on our forthcoming trip to Costa Rica and other Central American countries, and to maintain cognizance of this project.

The geothermal industry is certain that several goals of the Clinton Administration can be furthered through your support. Installation of geothermal power generation can be accomplished in Latin America in the short term, helping to alleviate environmental problems, maintaining 1990 levels of CO<sub>2</sub> emissions and creating jobs for Americans through export of our goods and services. We thank you for your help.

Sincerely,

A handwritten signature in cursive script that reads "Mike". A long horizontal line is drawn across the signature, extending to the right.

Phillip Michael Wright, President  
National Geothermal Association

UNIVERSITY OF UTAH RESEARCH INSTITUTE

# UURI

391 CHIPETA WAY, SUITE C  
SALT LAKE CITY, UTAH 84108-1295  
TELEPHONE 801-584-4422

MEMO TO: SCOTT SKLAR

FROM: MIKE WRIGHT *pmw*

SUBJECT: PROPOSAL FOR GEOTHERMAL DEVELOPMENT IN COSTA RICA

December 30, 1993

Dear Scott,

Next week, on Monday, 3 January 1994, Marshall Reed will be meeting with Judy Siegel, and perhaps others including yourself, to explain a proposal for spurring private development of geothermal resources in Costa Rica by U.S. companies. The proposal is being submitted to CORECT. In summary, the proposal would fund activities aimed at running the gauntlet for the first time in getting a private geothermal power plant on line. To date, U.S. companies have had only a small part of the action in Costa Rica -- the Italians have been the big players, and all development has been done by the government utility. Bill White, on a recent trip to Costa Rica, became aware of the large geothermal potential and asked the Geothermal Division, through Bob San Martin, to come up with an action plan for working with the Costa Ricans in securing a much larger portion of developments for U.S. companies. This proposal responds to Bill's request.

I would appreciate any good words you could lend to this process to help secure funding of the proposal.

On another note, the merging of the National Geothermal Association and the Geothermal Resources Association seems to be proceeding on schedule. The GRA Board voted to approve such a merger. I am now working with the NGA Board to get their approval. Lastly, the Board of the Geothermal Resources Council must approve the merger, since the NGA was spawned by the GRC. I hope to have all approvals by the end of January, 1994.

Cheers, and a very happy New Year!

## DEPARTMENT OF ENERGY

PAGE 01 OF 02 CSN = 4200 13/1719Z  
 PRECEDENCE = RFORMAT = ACP127CLASS = UNCLAS CODEWORD (S) =  
 CAVEAT (S) =  
 COMP =  
 HANDLE VIA  
 AUTO = ARM  
 MATCH = RHEBDOE, ENVIRONMENT, ENVIRONMENT, SENV, SENV  
 ACTION = [DOE]CMS (1), EP (4), ER (1)  
 [DOE]IDD (-), EETID (-)  
 INFO = \*\* UNASSIGNED \*\*  
 MLN = 14740DAN = 402-127400OSRI = RUEHGT DTG = 131522Z DEC 93  
 RATUZYUW RUEHGT 3499 3471522-UUUU--RHEBAAA.  
 ZNR UUUUU ZZH  
 R 131522Z DEC 93  
 FM AMEMBASSY GUATEMALA  
 TO SECSTATE WASHDC 0598  
 BT  
 UNCLAS GUATEMALA 13499

E. O. 12356: N/A  
 TAGS: SENV, ECIN, GT  
 SUBJECT: CENTRAL AMERICAN PRESIDENTIAL ENVIRONMENTAL  
 - PROPOSAL

REF: STATE 338805

1. THIS IS AN ACTION REQUEST. PLEASE SEE PARAGRAPH 5.

2. SUMMARY: DURING THEIR NOVEMBER 30 MEETING WITH PRESIDENT CLINTON, THE CENTRAL AMERICAN PRESIDENTS PROPOSED CONDUCTING A PILOT PROJECT ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE REGION. THE HEAD OF THE CENTRAL AMERICAN COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (CCA01), JORGE CABRERA, HAS NOW ASKED FOR MORE INFORMATION ON THE US RESPONSE TO THEIR PROPOSAL. CABRERA IS DEVELOPING A SPECIFIC PROPOSAL FOR AN ENVIRONMENTAL JOINT PROGRAM AND WANTS TO BE SURE OF THE US RESPONSE. END SUMMARY.

3. ON DECEMBER 1, CABRERA CALLED EMBOFF TO ASK IF THERE WERE ANY OFFICIAL STATEMENTS OR OTHER DOCUMENTS COMING OUT OF THE CA PRESIDENTS' MEETING WITH CLINTON. CABRERA CLAIMED THAT HE WAS RESPONSIBLE FOR THE CENTRAL AMERICAN PROPOSAL TO CONDUCT JOINT ENVIRONMENTAL PROJECTS - A PILOT PROGRAM IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT - IN THE REGION. PRIOR TO THE MEETING, CABRERA, WITH THE SUPPORT OF THE WIFE OF THE COSTA RICAN FOREIGN MINISTER, WROTE TO EACH OF THE 7 PRESIDENTS SUGGESTING THAT THEY MAKE SUCH A PROPOSAL. IN LIGHT OF WHAT THEY PERCEIVE TO BE A FAVORABLE REACTION BY PRESIDENT CLINTON AND VICE PRESIDENT GORE, CABRERA HAS BEEN TASKED WITH PREPARING AN OFFICIAL PROPOSAL ON BEHALF OF THE GOVERNMENTS OF THE REGION. TO AVOID ANY CONFUSION OVER WHAT HAD BEEN DISCUSSED OR AGREED, CABRERA HAS ASKED FOR CLARIFICATION OF THE US RESPONSE. HE WOULD APPRECIATE A COPY OF ANY PRESS RELEASE OR OTHER OFFICIAL STATEMENT RELATED TO THE ENVIRONMENTAL PROPOSAL. CABRERA ALSO STRESSED THAT THE CA PROPOSAL IS, TO THE BEST OF HIS KNOWLEDGE, AN UNIQUE PROPOSAL, MADE AT AN HISTORIC MEETING, AND COMING AT A CRUCIAL POINT FOR CENTRAL AMERICA.

4. COMMENT AND ACTION REQUEST: IMPLEMENTING A JOINT ENVIRONMENTAL PROJECT IN THE AREA WOULD KILL SEVERAL BIRDS WITH ONE STONE. IN ADDITION TO BEING A CONCRETE RESULT OF THE SUMMIT, INCREASED COOPERATION ON ENVIRONMENTAL ISSUES NOW COULD HELP LAY THE GROUND WORK FOR A FREE TRADE AGREEMENT LATER. AS IN THE NAFTA DEBATE, ENVIRONMENTAL CONCERNS ARE SURE TO FIGURE IN FUTURE FREE TRADE AGREEMENTS. SOME GUATEMALAN ENVIRONMENTALISTS ARE ALREADY RAISING SUCH CONCERNS ABOUT AN EXPANDED NAFTA. FINALLY, A JOINT PROJECT IN

ROUTINE

UNCLASSIFIED  
DEPARTMENT OF ENERGY

PAGE 02 OF 02 CSN = 4200  
CENTRAL AMERICA WOULD BE ANOTHER WAY FOR THE US TO  
DEMONSTRATE ITS SERIOUSNESS ABOUT COOPERATING ON  
INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL ISSUES. THE ENHANCED  
CREDIBILITY THIS WOULD BRING CAN ONLY HELP THE US IN  
MULTILATERAL NEGOTIATIONS OVER JOINT PROJECTS TO ADDRESS  
CLIMATE CHANGE, THE MONTREAL PROTOCOL MULTILATERAL FUND,  
AND THE GLOBAL ENVIRONMENTAL FACILITY.

13/1719Z

5. POST WOULD APPRECIATE A RAPID RESPONSE TO THE  
REQUEST FOR ANY EXISTING POLICY STATEMENT AND THE  
SUBSTANTIVE US RESPONSE TO THE PROPOSAL. END COMMENT  
AND ACTION REQUEST.

MCAFEE  
BT  
#3499  
NNNN

UNCLASSIFIED

ROUTINE -- UNCLASSIFIED -- WIRE SERVICE -- 5845 CHARACTERS  
ZCZCLBY984REULB

EZ02:

R 011647Z DEC 93

FM REUTERS

UNCLASSIFIED

SUBJ: MEXICO-GORE 12-01 0628

EZ05:

BC-MEXICO-GORE 1STLD (SCHEDULED)@

GORE CALLS FOR SUMMIT OF WESTERN HEMISPHERE@

(EDS: ~~UPDATES WITH FURTHER DETAILS ABOUT SUMMIT IN PARAS 7-9~~)

BY LAURENCE MCQUILLAN

MEXICO CITY, DEC 1 (REUTER) - VICE PRESIDENT AL GORE, CALLING THE NORTH AMERICAN FREE TRADE AGREEMENT A NEW BEGINNING IN U.S. RELATIONS WITH LATIN AMERICA, INVITED THE LEADERS OF MOST WESTERN HEMISPHERE DEMOCRACIES WEDNESDAY TO A SUMMIT NEXT YEAR TO EXPLORE ECONOMIC AND OTHER ISSUES.

SAYING THE NAFTA REFLECTS A MAJOR CHANGE IN U.S. POLICY, GORE TOLD SOME 5,000 BUSINESS LEADERS AT MEXICO'S NATIONAL AUDITORIUM: IT IS CLEAR TO US THAT WE MUST RETHINK THE WAY WE DEAL WITH THE NEW LATIN AMERICA THAT HAS EMERGED."

PRESIDENT CLINTON VIEWS NAFTA AS A STARTING POINT FOR DEALING WITH THE COMMON CHALLENGES OF THE AMERICAS," HE SAID.

I WISH TO ANNOUNCE TODAY THAT NEXT YEAR THE UNITED STATES WILL INVITE TO A WESTERN HEMISPHERE SUMMIT MEETING THE DEMOCRATICALLY ELECTED HEADS OF STATE OF NORTH, CENTRAL AND SOUTH AMERICA," HE ADDED.

IT WILL BE A MEETING THAT WE HOPE WILL CODIFY OUR SHARED PRINCIPLES AND SET FORTH A VISION OF ECONOMIC AND CULTURAL PROGRESS THAT COULD SERVE US WELL IN THE CENTURY AHEAD."

GORE SAID THE SUMMIT WOULD FOCUS ON HOW TO WORK IN PARTNERSHIP WITH OUR NEIGHBOURS TO FIND CREATIVE SOLUTIONS TO REGIONAL PROBLEMS," INCLUDING PROMOTING TRADE AND INVESTMENT, ENSURE COLLECTIVE SECURITY AND EXPAND DEMOCRACY.

A SENIOR ADMINISTRATION OFFICIAL TRAVELLING WITH THE VICE PRESIDENT SAID LEADERS OF DEMOCRACIES IN THE HEMISPHERE WOULD BE CONTACTED TO ARRANGE A DATE AND LOCATION IN THE UNITED STATES THAT WOULD BE PREFERRED BY MOST OF THEM.

THE OFFICIAL SAID CUBA AND THE CURRENT REGIME IN HAITI WOULD NOT BE INVITED TO THE SUMMIT, BUT THAT VIRTUALLY ALL OF THE COUNTRIES OF THE HEMISPHERE WOULD BE ASKED TO PARTICIPATE."

HE DECLINED COMMENT ON PERU, WHERE THE DEMOCRATICALLY-ELECTED LEADER, ALBERTO FUJIMORI, HAS SUSPENDED HIS COUNTRY'S CONSTITUTION.

GORE SPOKE FOLLOWING TALKS WITH MEXICAN PRESIDENT CARLOS SALINAS DE GORTARI ON IMPLEMENTING NAFTA, WHICH CREATES A FREE TRADE ZONE AMONG THE UNITED STATES, MEXICO AND CANADA.

GORE SAID THE FREE-TRADE PACT REPRESENTS A FUNDAMENTAL DECISION OF THE PEOPLE OF THE UNITED STATES ABOUT TRADE."

THE DECISION BY THE UNITED STATES TO JOIN THE PACT REPRESENTS A BASIC CHOICE ABOUT THE FUTURE OF OUR RELATIONSHIP

\*\*\* UNCLASSIFIED \*\*\*

WITH MEXICO, OUR RELATIONSHIP TO THIS HEMISPHERE, AND A CHOICE ABOUT HOW WE WISH TO RELATE TO THE REST OF THE WORLD," HE SAID.

CLINTON NEXT WEEK IS EXPECTED TO SIGN IMPLEMENTING LEGISLATION APPROVED LAST WEEK BY THE U.S. CONGRESS AFTER A TOUGH POLITICAL FIGHT. THE WHITE HOUSE WAS PLANNING A MAJOR CEREMONY TO MARK THE OCCASION.

THE TWO-DAY VISIT BY GORE, ACCOMPANIED BY WHITE HOUSE CHIEF OF STAFF THOMAS MCLARTY, WAS INTENDED TO UNDERSCORE THE CLINTON ADMINISTRATION'S INTEREST IN LATIN AMERICA -- A REGION WHERE THE VICE PRESIDENT INTENDS TO BECOME HEAVILY INVOLVED.

NAFTA IS A BEGINNING," GORE SAID. IT IS THE HOPE OF THE UNITED STATES THAT WE CAN MOVE BEYOND 'GOOD NEIGHBOURS' AND 'ALLIANCE' -- AND BEYOND NAFTA -- TO A POINT IN HISTORY IN WHICH ALL OF US UNDER DEMOCRACY, ALL OF US WHO TREASURE DEMOCRACY CAN ADVANCE THE WELL-BEING OF OUR PEOPLE."

GORE HELD PRIVATE TALKS WITH SALINAS TO DISCUSS THE IMPLEMENTATION OF NAFTA, WHICH BEGINS TO TAKE EFFECT JANUARY 1 WITH THE ELIMINATION OF SOME TARIFFS. LEVIES ON MOST PRODUCTS WILL BE PHASED OUT OVER A 15-YEAR PERIOD.

CLINTON AND OTHER ADMINISTRATION OFFICIALS HAVE SAID THEY EXPECT THE PACT TO BE THE FIRST STEP IN CREATING A BROADER FREE-TRADE ZONE THAT EVENTUALLY WOULD ENCOMPASS MOST OF THE WESTERN HEMISPHERE.

EVERYONE'S GOT THAT IN THEIR HEAD THAT THAT'S WHAT WE WANT TO DO," SAID LORRAINE VOLES, GORE'S PRESS SECRETARY, BUT WE WANT TO SOLIDIFY WHAT WE HAVE FIRST."

REUTER

REUT16;49 12-01

NNNN

\*\*\* UNCLASSIFIED \*\*\*

WORKING PAPERS

**SCHEDULE OF PRESIDENTIAL ELECTIONS  
FOR  
CENTRAL AND LATIN AMERICA**

Central America

Belize: NONE; ruled by Monarch

Costa Rica: February 1994

El Salvador: March 1994

Guatemala: November 1995

Honduras: just held November 28

Nicaragua: February 1996

Panama: NA 1997

South America

Argentina: May 1995

Bolivia: just held June 1993

Brazil: November 1994

Chile: December 1993

Colombia: May 1994

Ecuador: August 1996

Guyana: NA

Paraguay: just held May 1993

Peru: April 1995

Suriname: May 1996

Uruguay: November 1994

Venezuela: December 1993

Mexico September 1994