



ORGANIZACION LATINOAMERICANA
DE ENERGIA



BANCO INTERAMERICANO
DE DESARROLLO

GULA PARA ESTUDIOS DE RECONOCIMIENTO Y PREFACTIBILIDAD GEOTERMICOS



**Quito - Ecuador
Abril, 1994**



ORGANIZACION LATINOAMERICANA
DE ENERGIA



BANCO INTERAMERICANO
DE DESARROLLO

GULA PARA ESTUDIOS DE RECONOCIMIENTO Y PREFACTIBILIDAD GEOTERMICOS



**Quito - Ecuador
Abril, 1994**

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.
Teléfonos: 550-011 / 562-141, Casilla 741A,
Facsímile: 593-2-564660, Quito - Ecuador.

OLADE

Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)
Edificio Olade, Av. Occidental, Sector San Carlos
Casilla: 17-11-6413, Quito-Ecuador, Teléfonos: 538-280 / 539-676
Facsímile: 593-2-539684, Télex: 2-2728 OLADE ED

ISBN 9978-70-049-8
OLADE 011GE/94

PRESENTACION

La "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 geotérmica, 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.

El presente documento 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 más significativos de la tecnología, señalando los métodos más efectivos 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 Retana, 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 a los Ingenieros Saúl Venegas y Luca Ferrari sus aportaciones 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	12
4.2 Fases del Estudio	13
4.3 Estudios Específicos	17
4.3.1 Geología	17
4.3.2 Geoquímica	28
4.3.3 Geofísica	39
4.3.4 Hidrogeología	47
4.3.5 Aspectos Ambientales	51
4.4 Integración Geocientífica	54
4.5 Resultados	55
4.5.1 Areas de Interés Geotérmico y Prioridades	55
4.5.2 Estimación Preliminar del Potencial Energético	56
4.5.3 Preparación de un Proyecto para la Etapa de Prefactibilidad	59
4.6 Infraestructura Requerida	61
5. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	62
5.1 Objetivos Generales	62
5.2 Metodología	63
5.2.1 Planificación, Organización y Supervisión	65
5.2.2 Revisión de Resultados del Reconocimiento	67
5.2.3 Aspectos Logísticos	67
5.2.4 Definición de Puntos de Revisión y Toma de Decisiones	68
5.3 Estudios Específicos	69

5.3.1	Geología	69
5.3.2	Geoquímica	81
5.3.3	Geofísica	87
5.3.4	Hidrogeología	101
5.4	Integración Geocientífica Preliminar	106
5.5	Perforación Exploratoria de Diámetro Reducido	108
5.5.1	Pozos de Gradiente	109
5.5.2	Perforación Profunda de Diámetro Reducido	111
5.5.3	Tiempos y Costos de la Perforación	119
5.6	Integración Geocientífica	120
5.7	Resultados	121
5.7.1	Modelo Conceptual del Sistema Geotérmico	121
5.7.2	Evaluación del Potencial Energético Probable	121
5.8	Consideraciones Ambientales	124
5.8.1	Examen Inicial Ambiental	125
5.8.2	Alcances y Actividades	125
5.8.3	Resultados	126
5.8.4	Requerimiento de Personal, Tiempo y Costos	127
5.9	Preparación de un Documento de Proyecto para la Etapa de Factibilidad	128
5.10	Infraestructura Requerida	129
5.10.1	Recursos Humanos	129
5.10.2	Recursos Físicos	131
5.11	Tiempo y Costos	131
6.	BIBLIOGRAFIA	133

FIGURAS

Figura No. 1	Esquema de un Yacimiento Geotérmico Asociado con una Estructura Volcánica Alimentada por una Intrusión Ignea Cuaternaria	3
Figura No. 2	Esquema de un Yacimiento Geotérmico en una Caldera Volcánica Asociada con una Cámara Magmática Cuaternaria	4

Figura No. 3	Etapas en la Ejecución de un Proyecto Geotérmico	10
Figura No. 4	Proceso de la Exploración Geotérmica a Nivel de Reconocimiento	13
Figura No. 5	Mapa de Información Geoquímica.....	36
Figura No. 6	Esquema del Proceso de Evaluación del Potencial Energético	57
Figura No. 7	Proceso de Exploración Geotérmica en la Etapa de Prefactibilidad	65
Figura No. 8	Mapa Geológico de Amatitlán, Guatemala.....	73
Figura No. 9	Mapa Aeromagnético de la Región de Los Humeros, México	89
Figura No. 10	Mapa de Anomalía de Bouguer de la Caldera La Primavera	91
Figura No. 11	Interpretación Estructural del Levantamiento Gravimétrico del Campo Geotérmico La Primavera, México	92
Figura No. 12	Mapa de Iso-resistividad Aparente para $AB/2 = 2,000$ m en el Campo Geotérmico Los Humeros, México	94
Figura No. 13	Secciones de Iso-resistividad Aparente y Electrostratigráfica del Campo Geotérmico Los Humeros, México	94
Figura No. 14	Mapa de Información Geofísica Integrada	99
Figura No. 15	Cálculo de la Temperatura Estabilizada o de Equilibrio en un Pozo	117
Figura No. 16	Sección del Modelo Geotérmico Preliminar de Amatitlán, Guatemala	122

TABLAS

Tabla No. 1	Resumen de Requerimientos de Recursos Humanos y Materiales para la Etapa de Reconocimiento	29
Tabla No. 2	Resumen de Tipos de Aguas Naturales, de su Origen y de la Información Obtenible.....	31
Tabla No. 3	Resumen de Tipos de Aguas Naturales y Requerimientos de Observación y Análisis.....	33
Tabla No. 4	Estudio Geoquímico. Resumen de la Información a Generar durante la Etapa de Reconocimiento	37
Tabla No. 5	Información a ser Considerada en un Examen Inicial Ambiental	53

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 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". 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 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 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 coadyuvó a incrementar el conocimiento de los países de la Región sobre sus recursos geotérmicos, al grado que para fines de la década de los años ochenta 20 de los 26 países miembros de OLADE contaban ya con estudios de reconocimiento, 17 habían ejecutado estudios de prefactibilidad, 8 tenían 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 los documentos de OLADE, esta Organización y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) decidieron mediante el Convenio de Cooperación Técnica ATN/SF-3603-RE, revisar las guías existentes

y elaborar seis nuevas 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 (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.

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 energético de América Latina y del Caribe, se presenta 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, 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.

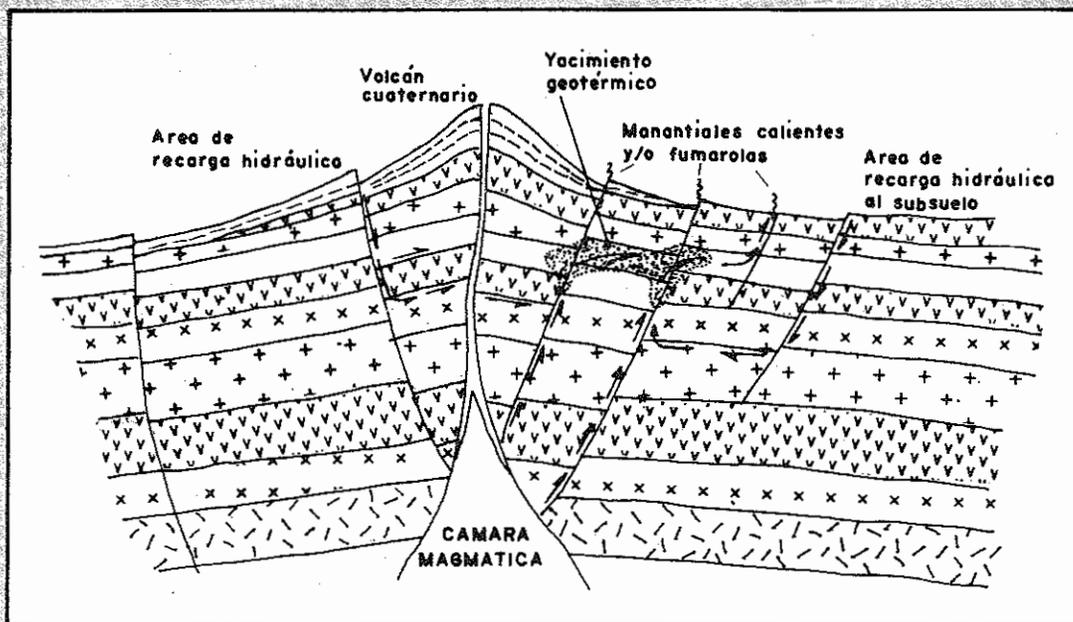
Si bien se conocen diversas fuentes generadoras de calor en el interior de la Tierra (debidas al decaimiento de minerales radioactivos, reacciones químicas, fricción, presión mecánica, etc.), la tectónica de placas y ciertos procesos que dan lugar a la formación y flujo de magma hacia la superficie (creando 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, 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 (Figuras Nos. 1 y 2).

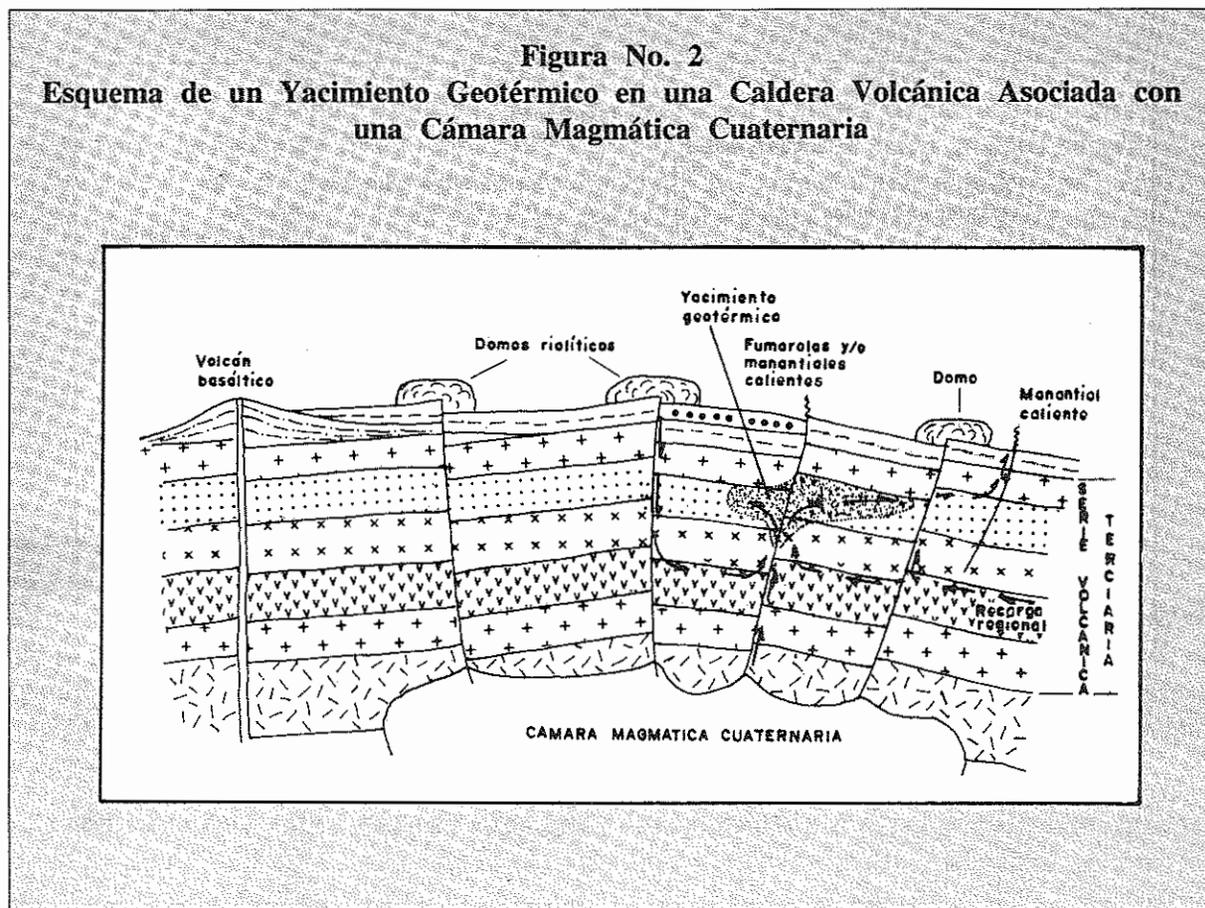
Figura No. 1
Esquema de un Yacimiento Geotérmico Asociado con una Estructura Volcánica Alimentada por una Intrusión Ignea Cuaternaria



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 el flujo de calor generado por las 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 y otros, 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 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 entalpía) 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 (magmas ácidos diferenciados), 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 desde el manto de manera directa y rápida 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 período de estadía del magma en una cámara. En la mayoría de los casos las cámaras son grandes depósitos de magma que alimentan complejos volcánicos centrales, en los que las estructuras volcánicas se forman alrededor de una chimenea central, con productos de varias erupciones 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, La Primavera en México y Campi Flegrei en Italia).

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. Más 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 termales. 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 el subsuelo.

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 otras rocas en las que se encuentran yacimientos geotérmicos, la permeabilidad primaria suele ser escasa y sólo es posible que lleguen a ser productoras de fluidos gracias a la incorporación de la permeabilidad secundaria de origen tectónico. De hecho, en la mayoría de los campos 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 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 yacimiento. 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 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 Zelandia; o una roca cerrada por autosellamiento debido a efectos prolongados de la actividad geotérmica o 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 subsuperficiales, y este problema generalmente se resuelve sobre bases puramente geológicas, con el apoyo de estudios geofísicos para determinar los espesores y la posible permeabilidad 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 existencia de un yacimiento geotérmico, pero éstas no siempre se presentan y pueden existir yacimientos sin dichas manifestaciones (Heber y East Mesa, U.S.A.). También hay emanaciones calientes que no tienen relación con yacimientos 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 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, 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 superficial. La perforación de pozos de gradiente será conveniente y económica solamente si la cima de las rocas impermeables que cubren al yacimiento 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. 3): una de alto riesgo (incertidumbre) asociado a la exploración del energético, cuyo objetivo es la identificación del yacimiento (incluyendo un estudio de su posible utilización); y otra de menor riesgo que se relaciona con el desarrollo y explotación del mismo. La primera 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.

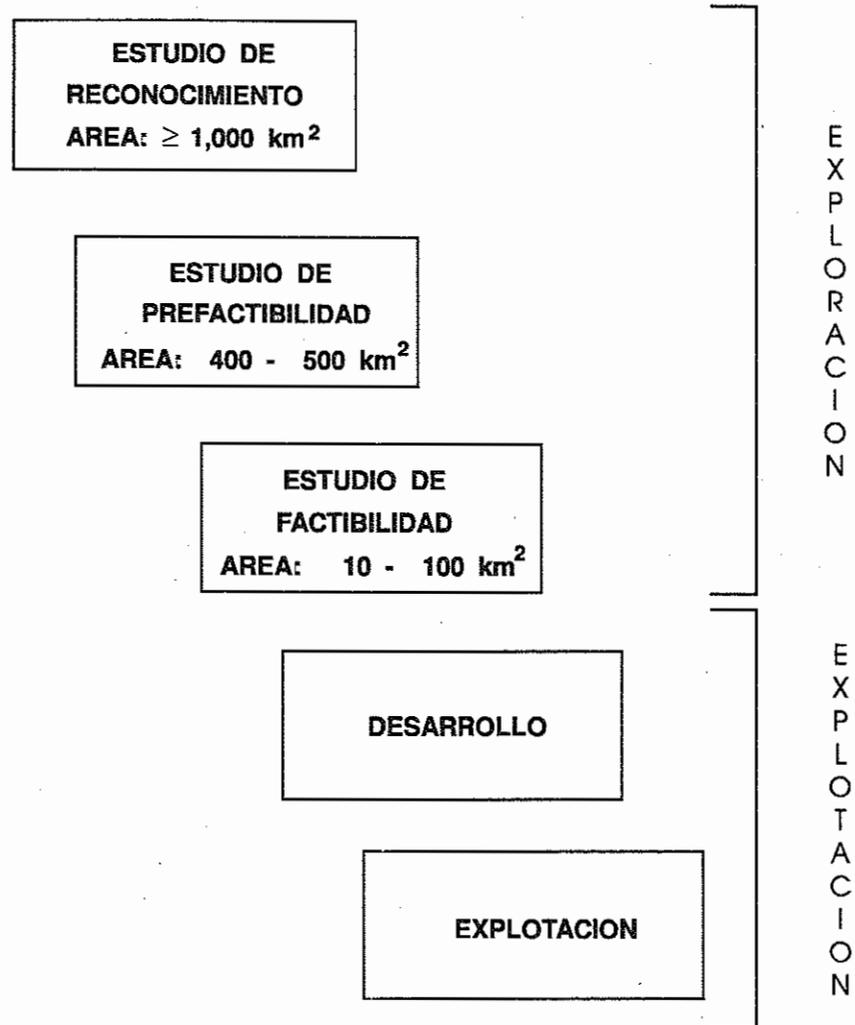
Desde el punto de vista práctico el estudio de un proyecto geotérmico tipo se puede dividir en cinco etapas, de las cuales las tres primeras: 1) estudio de reconocimiento, 2) estudio de prefactibilidad y 3) estudio de factibilidad, se refieren a la parte propiamente exploratoria del proyecto; y las otras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

La metodología que se expone en esta guía para el reconocimiento y estudio de prefactibilidad geotérmicos, 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 es resultado de la revisión de las guías previamente elaboradas por OLADE, actualizadas con base en experiencias adquiridas en 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.

Este documento tiene como principal objetivo el orientar a los países en la investigación geotérmica en sus primeras etapas, poniendo énfasis en la aplicación de las técnicas más efectivas y de menor costo. En la definición de la secuencia de los trabajos por realizar, se ha hecho un esfuerzo especial por precisar el orden de ejecución de los diversos métodos que inte vienen 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 la exploración en cierto momento. En las primeras etapas de la investigación, se ha tratado

Figura No. 3

ETAPAS EN LA EJECUCIÓN DE UN PROYECTO GEOTERMICO



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 la exploración y que permita 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 aquí

expuestas. Sin embargo, la experiencia obtenida en varios países permite recomendar el orden de ejecución de los estudios que se presenta en esta guía.

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 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 expuesta se enfoca al ambiente geológico y geográfico de América Latina y del Caribe.

3.2 Desarrollo de un Proyecto Geotérmico Tipo

La experiencia acumulada a la fecha demuestra que las dimensiones de los yacimientos geotérmicos se hallan comprendidas entre 10 y 100 km², y que en América Latina y el Caribe tales yacimientos se localizan en las márgenes de las placas litosféricas (por ejemplo, en el Sistema Andino, la Cordillera Centroamericana, el Arco del Caribe, el Eje Neovolcánico Mexicano, etc.), especialmente en regiones que se caracterizan por tener una actividad tectónica y magmática de edad relativamente 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 de interés comercial. Por consiguiente, para poder desarrollar un proyecto geotérmico en una región geológicamente poco estudiada, será necesario iniciar la actividad exploratoria con un estudio de reconocimiento que cubra un área 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 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 km², 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 km² (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 en cualquier 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 o en 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 se realizará mediante la recopilación, análisis y procesamiento de la información geocientífica y técnica existente, y la ejecución de investigaciones de campo geológicas, hidrogeológicas y geoquímicas, de carácter regional.

4.1 Objetivos Generales

El estudio de reconocimiento tendrá como objetivos:

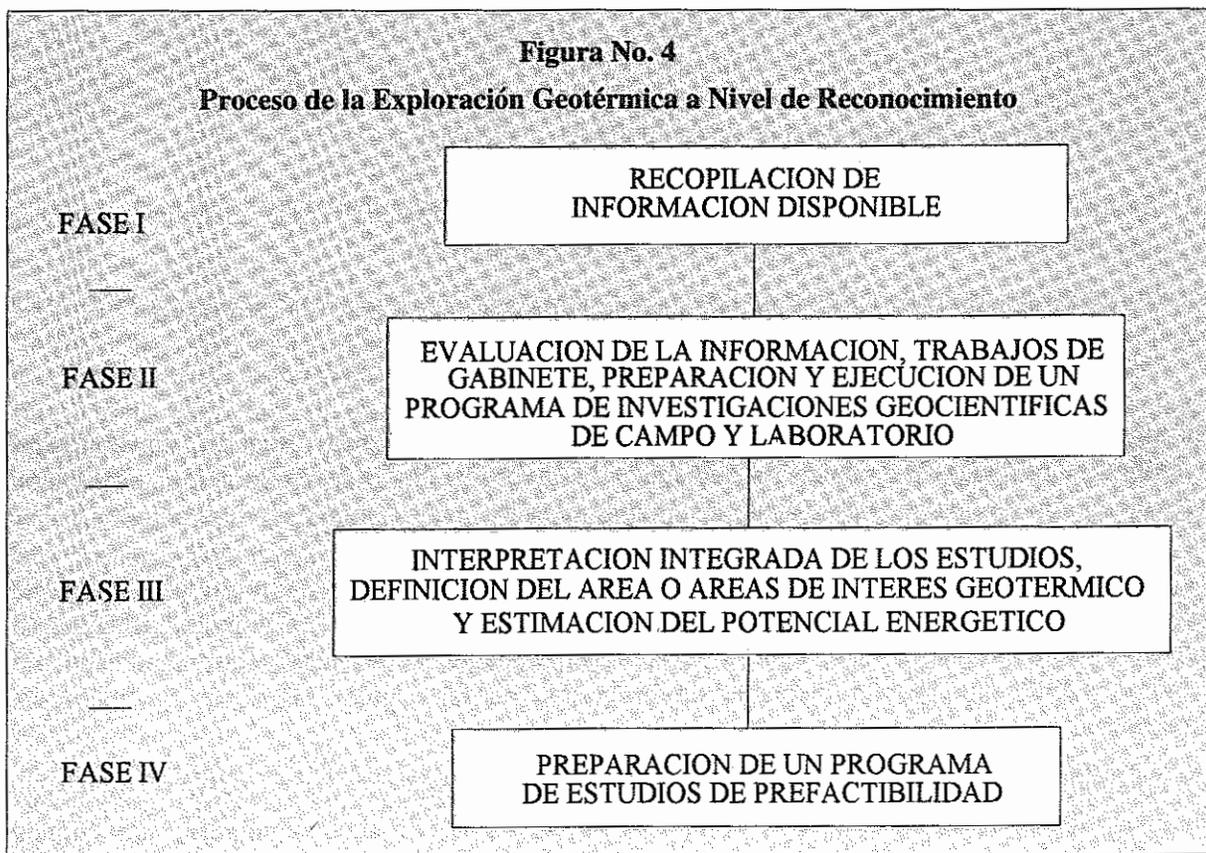
- Evaluar en forma preliminar las posibilidades geotérmicas a nivel nacional o regional.
- Identificar las áreas de interés geotérmico.
- Definir un esquema geotérmico preliminar de cada área identificada y seleccionar las más atractivas para la ejecución de estudios de prefactibilidad.
- Elaborar un 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 debe 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, 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 (Figura No. 4): 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 gabinete y campo; la tercera a la integración de tales estudios, la definición de las áreas de interés geotérmico y la estimación del potencial energético; y la cuarta a la preparación de un documento de proyecto para el estudio de prefactibilidad. La descripción de cada una de estas actividades se presenta a continuación.

Fase 1. Recopilación de Información Existente

La primera 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), 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, minería, 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 multispectral 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, a veces no será necesaria

la simplificación (portabilidad) de los equipos de investigación y podrían reducirse 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 realizar 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 procederá a evaluar el potencial energético probable de cada una de ellas y se hará 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 con 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 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 geoquímicos, hidrogeológicos y geofísicos recopilados y analizados por los especialistas en esos sectores, y elaborar el esquema vulcanológico regional y geotérmico de las áreas de interés.

No obstante que el objetivo primario de la exploración sea en la mayoría de los casos encontrar condiciones propicias para la existencia de campos de alta entalpía, 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 entalpía. Áreas con yacimientos de baja entalpía 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 entalpía) 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 sus esquemas preliminares
- 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, clasificarlos según su edad relativa y determinar 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 desplazamiento 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 vulcano-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 km²), la escala que se utilizará para la carta geológica podrá ser 1:50,000.

4.3.1.2.2 Reconocimiento de Campo

Previa 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, determinar sus relaciones en el tiempo y para reconstruir el desarrollo del ciclo volcánico correspondiente. Esto permitirá establecer en cual etapa de 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 magmático.

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 interstratificados 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 colectados 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 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 paragenésis 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: SiO₂, AlO₃, FeO total, Na₂O, CaO, MnO, TiO₂, P₂O₅, 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 Sr⁸⁶/Sr⁸⁷.
- Dataciones radiométricas por:
 - . El método de K/Ar.
 - . El método de C¹⁴, con base en el carbón en suelos fósiles

4.3.1.2.4 Interpretación de Datos, Compilación de Mapas e Individualización de Areas 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 la o las zonas geotérmicas 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 identificar 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, la petrología de los productos efusivos recientes y 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 argilización de las rocas y depositación de minerales en los poros, las fracturas y las diaclasas, imprimiéndoles una impermeabilidad 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 entalpía 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:

- Áreas 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.

- Áreas 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.
- Áreas 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.
- Áreas en depresiones ligadas a estructuras distensivas (grabenos) 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 relativamente 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 incluirá 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 señalará la importancia de las anomalías termales e indicará el orden prioritario de los estudios geológicos que se deberán llevar a cabo en las áreas de mayor interés geotérmico, en la siguiente etapa de prefactibilidad. El informe presentará 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 Petrografo-petrologo

Para la coordinación del estudio:

1 Especialista en geotermia

El tiempo total para la ejecución de las investigaciones geológicas 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.

A manera de información, a continuación se presentan los costos unitarios de los análisis más frecuentemente requeridos en los estudios geotérmicos.

COSTO UNITARIO U.S. DOLARES

Análisis petrográfico	\$ 60-100
Análisis químico de rocas.....	\$ 75-100
Difracción de Rayos X	\$ 65-130
Datación con el método K/Ar .	\$ 400-500
Datación con el método de C ¹⁴	\$ 100-225
Datación por trazas de fisión...	\$ 150-200

4.3.2 Geoquímica

4.3.2.1 Objetivos

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 zona determinada, 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 las 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 en la etapa de reconocimiento se presentan en la tabla No. 1.

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 un 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.

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 temperatura (manantiales y fumarolas), así como muestras representativas de las aguas no termales (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 límpidas 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 límpidas 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 NaHCO_3 . La tabla No. 2 presenta una lista de los tipos de agua característicos de áreas geotérmicas, con un breve comentario sobre su origen y de la información que pueden proporcionar.

Muestreo de Aguas de Manantiales

Las aguas termales 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 colectar 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.

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.

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.

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 (por ejemplo: 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 y otros, 1985; Watson, 1978).

4.3.2.2.3 Trabajo de Laboratorio

Análisis Químicos e Isotópicos

El laboratorio que lleve 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 éstos 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.

Tabla No. 3
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 ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , SiO ₂ , ¹⁸ O, ² H.	Ubicación, elevación, temperatura, flujo.
Manantiales ebullentes con aguas cloruradas, con alta sílice y pH neutro.	Análisis completo: pH, Li ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , F, AlO ₂ ⁻ , B, ¹⁸ O, ² H, ³ H.	Ubicación, elevación, temperatura, flujo, depósitos minerales asociados.
Manantiales calientes/tibios.	Completo en caso de alto flujo. Parcial (pH, Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , SiO ₂) 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 ₂ .	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 ₂ .	Ubicación, elevación, temperatura, flujo.
Fumarolas.	Cociente agua/gas incondensable en condensado de vapor, CO ₂ , H ₂ S, H ₂ , CH ₄ , N ₂ , NH ₃ , Ar, He. En el vapor condensado: ¹⁸ O, ² H.	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.

En la etapa de reconocimiento podría parecer innecesario el análisis de todos los constituyentes indicados, pero en etapas subsiguientes, cuando se deseen comparar las nuevas evidencias con la información preexistente, 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.

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).

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 reequilibrio 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 reequilibrada 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 reequilibrio.

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 reequilibrio como los de dilución con aguas frías, generalmente llevan a subestimaciones 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 sobreestimaciones 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).

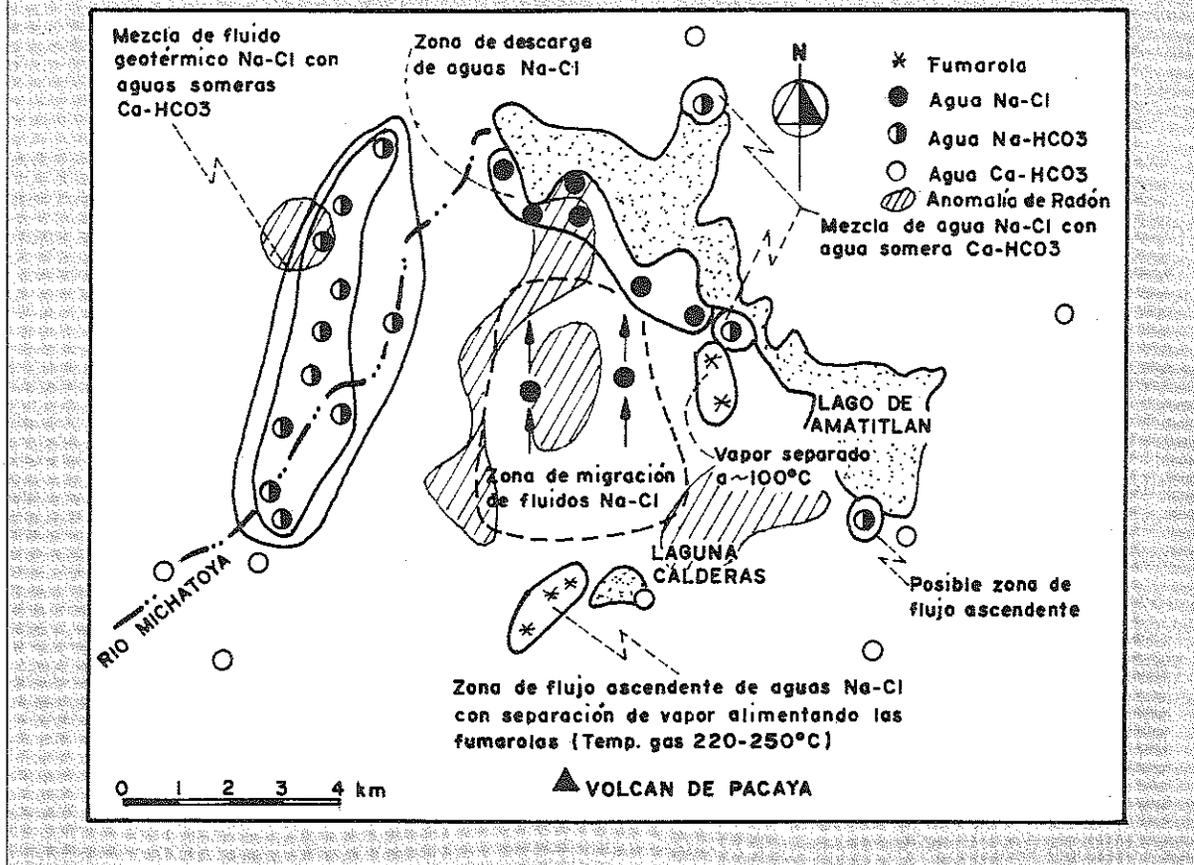
Se han desarrollado algunos geotermómetros basados en la composición de la fase gaseosa (D'Amore y Panichi, 1980; Arnorsson y Gunnlaugsson, 1985). Estos son difíciles de aplicar a muestras de manifestaciones naturales (fumarolas o manantiales), debido a que la mayoría de ellos requiere el conocimiento 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 etapas subsecuentes de 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 y otros, 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 hídricas o gaseosas (fumarolas, manantiales con

Figura No. 5
 Mapa de Información Geoquímica (INDE, 1989)



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 (Figura No. 5), 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

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.

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 etapa 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 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, de 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 químico completo de 30 a 60 muestras, análisis parciales de 10 a 15 muestras, la colección y análisis de gases en 10 a 30 muestras, el análisis de oxígeno-18 y deuterio de 30 a 60 muestras y el análisis de tritio de 6 a 15 muestras, dicho costo podría variar entre US\$ 15,000 y US\$ 50,000 dólares.

El costo unitario de los análisis tomados en cuenta para tal estimación se obtuvieron de laboratorios especializados en la Región (México), siendo éstos los siguientes:

Costo en US dólares

Análisis químico completo de líquidos.....	\$ 100-200
Análisis químico parcial.....	\$ 50-100
Análisis de gases completo.....	\$ 50-100
Análisis de oxígeno-18 y deuterio.....	\$ 90-100
Análisis de tritio.....	\$ 100-200

4.3.3 Geofísica

4.3.3.1 Objetivos

La geofísica es una técnica 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 el 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 reflejen 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, las curvas de campo de los sondeos, los mapas y/o secciones de resistividad y los 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 Análisis y Procesado de la Información Geofísica

El análisis y procesado de la información recopilada se efectuará únicamente sobre la que cumpla los siguientes aspectos: 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 será 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 geológicos 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 rocas 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 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 primera etapa, se procesarán las curvas de sondeos eléctricos verticales o de sondeos magnetotelúricos, a partir de las gráficas de campo de resistividad contra la separación electródica en los primeros, y de resistividad contra frecuencia en los segundos, para determinar los espesores y resistividades reales de los estratos geoelectrónicos 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 así como los datos de registros geofísicos de pozos que existan; graficar las secciones de interpretación eléctrica y representarlas sobre el mapa geológico, para tratar de generar un modelo geoelectrónico tridimensional del área. Por último, si se cuenta con suficientes sondeos magnetotelúricos, interpretarlos mediante modelos de 2 dimensiones, empleando programas de cómputo.

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 físico-químicas en una misma unidad; esto se realiza de la siguiente manera:

- Se ubicarán 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 isoresistividad aparente, con los valores de resistividad y la ubicación de los puntos de atribución de esos valores; y se analizará la posición y forma de las áreas de mínimos resistivos, para evaluar su relación con la columna geológica inferida y con posibles 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 y 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 sismica pasiva, se generará un mapa de la sismicidad de la región, ubicando los focos de sismos que hayan ocurrido dentro de un radio del orden de 250 km, definiendo las áreas de mayor actividad sísmica y los alineamientos de 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 la sección 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 alineamientos tectónicos. Mediante la interpretación conjunta de la gravimetría, magnetometría y la sísmica pasiva, la identificación de estructuras regionales pudiese 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 magnetoteléuticos 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 magnetoteléuticos.
- 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 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 período 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

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 de mayor detalle y sistemáticos guiados por una metodología adecuada, se desarrollarán en las siguientes etapas 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.
- Conocer los aforos de los ríos y fuentes importantes.
- Elaborar el mapa hidrogeológico preliminar de la región en estudio.
- Elaborar un esquema preliminar de la hidrogeología en las área geotérmicas prioritarias.

Para ello se efectuará la evaluación de la información recopilada en la primera 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 manifestaciones termales (fuentes y pozos, zonas de alteración, fumarolas, etc.).
- Datos de pozos perforados.

Esta información permitirá conocer la infraestructura hidrometeorológica existente y definir el alcance del conocimiento hidrogeológico de la región en 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 espesores aproximados de los estratos que eventualmente podrían ser elementos del sistema geotérmico, esto es, la cobertura impermeable, el yacimiento y el 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 ambiental, 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 un inventario y muestreo representativo de las 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 del ambiente, pH, conductividad eléctrica, etc.; adicionalmente se tomará una muestra del agua.

En el caso de pozos, sean éstos excavados a cielo abierto o contruídos 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 escorrentía 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 condiciones 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 la roca.

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: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , B, Cl, SO_4^{2-} , NH_4^+ , HCO_3^- , 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 hidrogeología de las áreas de interés geotérmico. Dicho informe deberá ir acompañado del material generado como soporte del estudio, esto es: secciones geológicas, figuras y mapas.

4.3.4.4 Requerimientos de Personal, Tiempo y Costos

Siendo la etapa de reconocimiento el período de la investigación 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, de dibujo y de servicios.

El tiempo para la ejecución de un estudio hidrogeológico 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 $\geq 1,000$ km², 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 H₂S 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 la explotación del yacimiento geotérmico, principalmente para justificar algunas decisiones ya tomadas en cuanto a la ejecución u operación del proyecto, o para resolver (mediante medidas de mitigación) problemas ambientales que se estaban presentando incluso desde 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, en los que se hayan tratado 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 etapa de factibilidad, será la base para el desarrollo del Estudio del Impacto Ambiental (EIA) 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; y
- 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. Tal 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.
- 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.).

Tabla No. 5
INFORMACION A SER CONSIDERADA EN
UN EXAMEN INICIAL AMBIENTAL

CLASIFICACION SEGUN EL MEDIO	RECURSO AMBIENTAL A SER EVALUADO
MEDIO FISICO (NIVEL 1)	
Agua	Agua superficial: - Hidrología - Calidad Agua subterránea: - Hidrología - Calidad
Aire	Atmósfera: - Calidad - Ruido
Tierra	Geología: - Recursos minerales - Sismicidad - Deslizamientos - Asentamientos Suelos: - Erosión - Fertilidad
MEDIO BIOTICO (NIVEL 2)	
Acuático	Piscicultura Biología acuática
Terrestre	Cubierta vegetal Fauna silvestre
MEDIO HUMANO (NIVEL 3)	
Sociodemográfico	Población
Económico	Uso del suelo en: - Agricultura - Industria forestal - Ganadería - Recreacional y turismo - Minería - Arqueología - Areas Urbanas
Servicios e Infraestructura	Abastecimientos de agua Vías de comunicación

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 Inicial Ambiental 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 integrado con base en el uso de la información disponible y/o la información que obtenga fácilmente el grupo de investigadores que intervenga 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. 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 uno o dos meses y su costo de US\$ 10,000-20,000 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 ejemplo, 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 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

La integración geocientífica en 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 estratigráfico, 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 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 (1994), 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 cualitativamente 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.

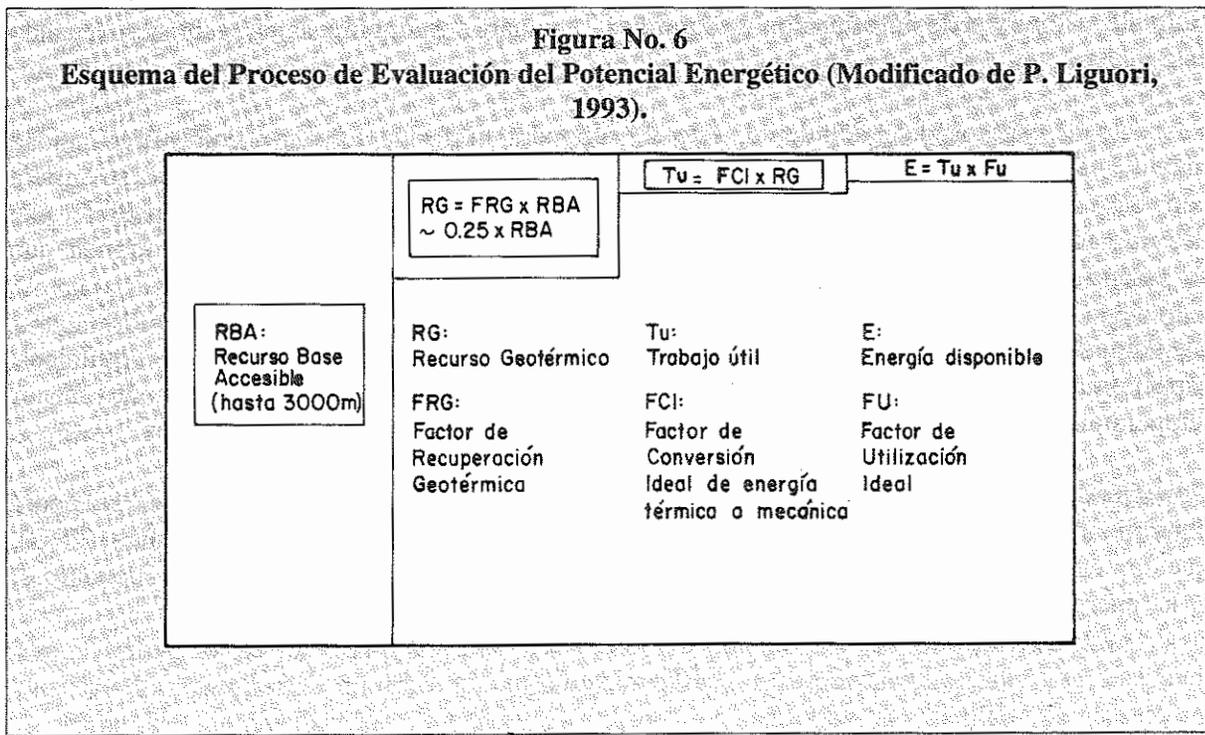
En una forma preliminar el potencial del sistema geotérmico se podrá calcular considerando las características geológicas y físicas observadas desde la superficie, utilizando para ello cualquiera de los métodos que existen para tal propósito y de los cuales los más frecuentemente aplicados son el Método 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 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 misma. A continuación se desarrolla el cálculo de la distribución de la temperatura en la corteza, considerando sólo la conducción térmica, por medio de modelos matemáticos, analíticos o numéricos.

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. Una descripción detallada de este método se puede consultar en el trabajo de Barberi, F. y Marinelli, G., 1987.

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 (Figura No. 6).



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:

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

donde,

q_y =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 otros yacimientos geotérmicos.

A =Area del yacimiento (m²)

E =Espesor del yacimiento (m)

T =Temperatura del yacimiento (°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 “estimaré” 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 y otros (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_{BP}) y la energía contenida originalmente en el yacimiento (q_y), esto es:

$$FRG = q_{BP} / q_y$$

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 y otros (1979) 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, comunicación personal, 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 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 y dar la localización de sitios para perforar pozos profundos de exploración que permitan la identificación del recurso.

En el proyecto se delinearé el área de estudio reducida a unos 400 ó 500 km², 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 de financiamiento para los 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 de los trabajos, así como la disponibilidad de cartas a escalas adecuadas (1:20,000, 1:25,000 ó 1:50,000) 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 de gente no local en la región.

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.

Señalando 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 prefactibilidad. 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 podría ser la base para la consecución de financiamiento proveniente 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 de 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 período 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 detallado 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 técnicos 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 la continuación de las investigaciones en el área aludida, dependerá de la estrategia energética prevalenciente al momento de la estructuración del proyecto.

5.1 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 de más alto 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 aporte 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 detallado 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 (Figura No. 7).

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.

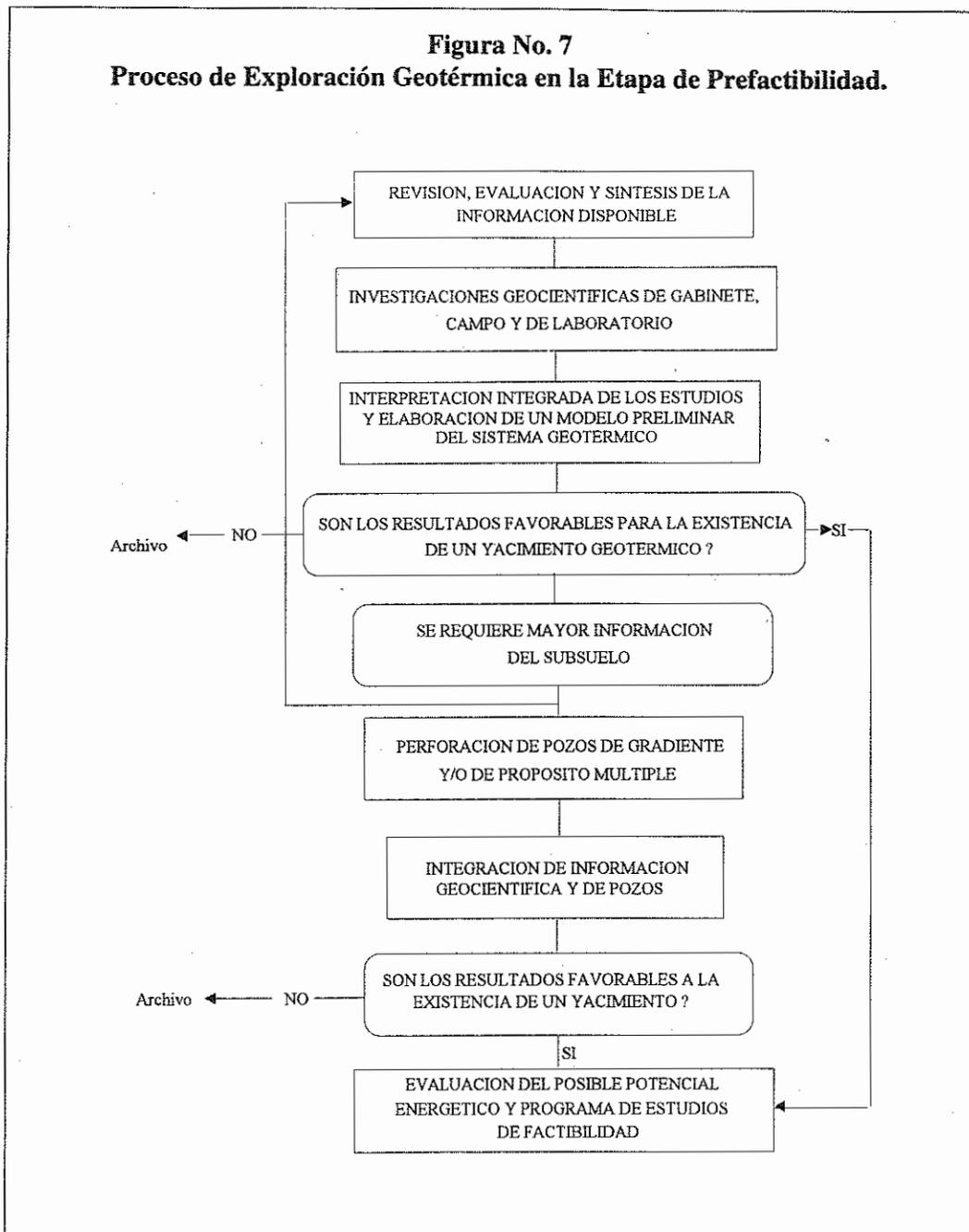
Los estudios de geología y geoquímica comenzarán por ratificar o determinar en forma más precisa el modelo preliminar del sistema geotérmico, especialmente la parte que se relaciona con la ubicación del yacimiento inferido, para seleccionar el área y objetivos de las investigaciones geofísicas.

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

Figura No. 7
Proceso de Exploración Geotérmica en la Etapa de Prefactibilidad.



perforación exploratoria profunda de diámetro comercial, estudios de ingeniería de yacimientos, un estudio ambiental y otros tópicos especiales.

5.2.1 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 km² y se elaborará el programa idóneo de investigaciones, poniendo especial atención en la secuencia de los trabajos por realizar así como en los períodos 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 ésta podría 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 obtenidos en 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 del sistema geotérmico generado en la etapa anterior deberá utilizarse como una hipótesis de trabajo para la planificación detallada de los estudios. 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 movilizadado 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.
- 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 períodos 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 del área por no ser técnicamente sustentable la existencia de un yacimiento geotérmico.

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 expuesta en esta guía, los puntos obvios para la toma de decisiones se sitúan: a) al final de la síntesis geocientífica preliminar de la fase 3, b) al término de la

perforación de uno o más pozos de propósito múltiple en la fase 4 y c) 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 edad y posible extensión y profundidad.
- Estimar el posible 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.
- Determinar la posible 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 las secciones que se presentan a continuación.

5.3.1.2 Trabajo de Gabinete

Durante esta etapa se analizará la información proveniente tanto de trabajos geológicos ajenos a la geotermia como de los trabajos realizados en el reconocimiento.

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 superficial y del subsuelo; por lo tanto, habrá que analizar los estudios realizados recurriendo a los bancos de información.

La herramienta más importante para caracterizar el subsuelo durante esta etapa será la información geológica, 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 preliminar coherente con 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 determinar 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 incluso en etapas posteriores a la investigación del proyecto en la planeación de la infraestructura del campo geotérmico.

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, de existir éstas, 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. Comúnmente 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 comúnmente 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 afloran 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 importante 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.

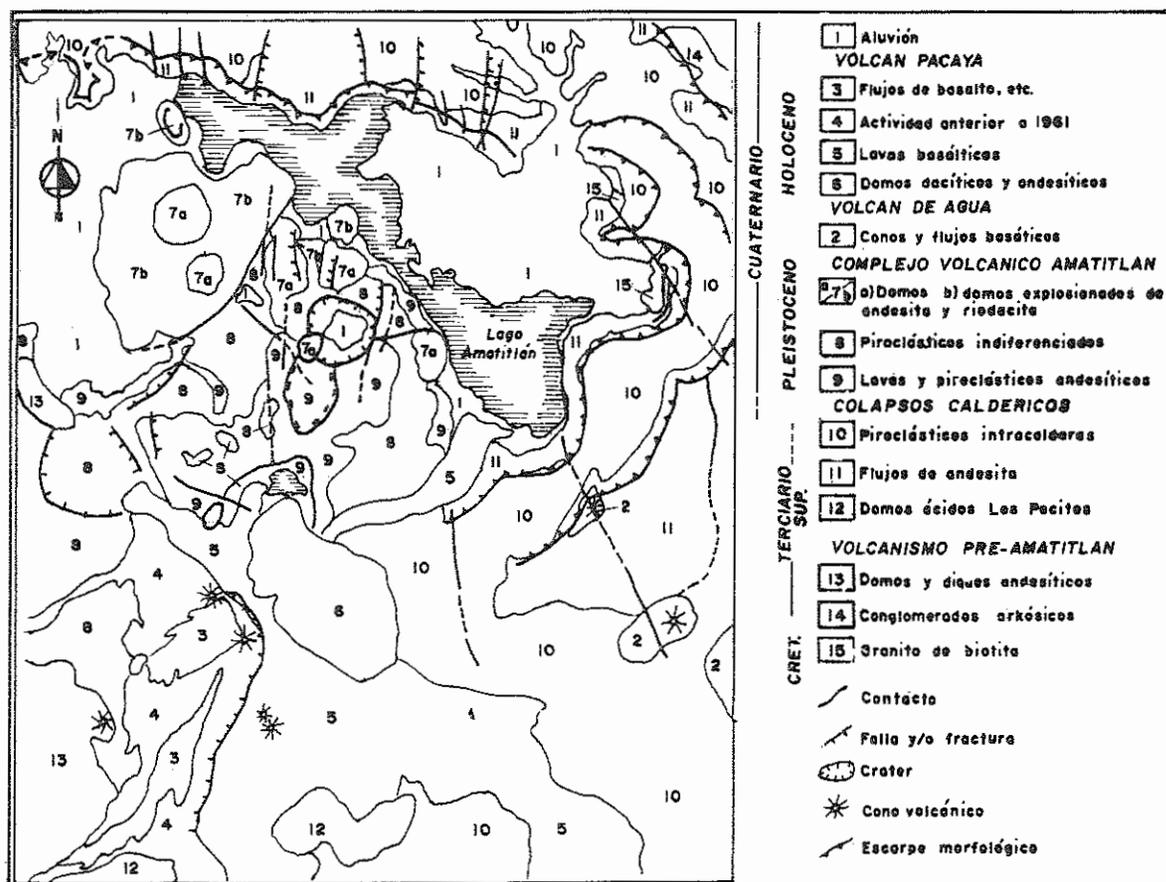
Particularmente se pondrá atención a los productos provenientes de eventos volcánicos explosivos, desarrollando el muestreo y análisis de los xenolitos para la reconstrucción e identificación de la geología del subsuelo y de los procesos hidrotermales profundos.

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 (Figura No. 8). 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).

Figura No. 8
Mapa Geológico de Amatitlán, Guatemala (INDE, 1989)



En primer lugar se elaborará una carta geológica de afloramientos, es decir, una representación convencional sobre una base topográfica de las unidades que afloran 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 efectuara 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 rocas, 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 el posible volumen del eventual yacimiento.

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 los 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 $\approx 60^\circ$; de rumbo $\approx 90^\circ$), 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 estratigráfico 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 físicas. 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 SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO , MnO , MgO , TiO_2 , P_2O_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 hídrica 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 entalpía 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 forman 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 estructuraismogénica 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 efusivo.

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 no consolidados 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 presenten 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, de 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, 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 incluirán 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 mostrarán las correspondientes correlaciones entre éstas y las formaciones aflorantes.

De existir información de otras disciplinas geocientíficas que hayan intervenido en la prefactibilidad, 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, los resultados de la determinación del campo de esfuerzos y cualquier otro dato que lo haga lo más completo posible.

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

5.3.1.8 Recursos Humanos, Tiempo y Costo

Los estudios de geología en la etapa de prefactibilidad 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 se detallan a 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 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, 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.

El equipo de campo que se requieren para su realización, normalmente se reduce a la brújula, martillo, lupa, altímetro, termómetro, estereoscopio portátil, 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 requerimientos de equipo también 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 afloran de manera natural en el área bajo estudio, y determinar de manera clara su distribución geográfica. Con este propósito 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 la sección 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 la sección 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 varios 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 casi-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 °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

En la etapa de prefactibilidad como en la de reconocimiento, 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 la sección 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: el enfriamiento adiabático (separación de vapor), la mezcla con aguas de menor temperatura y el 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 y otros, 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}O y deuterio), es decir la proporción de especies moleculares DHO y H_2^{18}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 éste 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}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 la 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}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 y otros, 1977). Esto ha permitido desarrollar metodologías para dilucidar la relación genética con el líquido del yacimiento de aguas termales emanantes en la superficie (Truesdell y otros, 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 geovulcanológico. 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 US\$ 30,000 y un máximo de US\$ 75,000 dólares, distribuidos de la siguiente manera:

(Costo en US\$ dólares)

	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
Total	\$ 30,000	\$ 75,000

Los precios unitarios de los análisis tomados en cuenta en esta estimación, son los mismos señalados en la parte correspondiente a la geoquímica en la etapa de reconocimiento, variando únicamente el número de muestras. Los costos de los estudios geoquímicos que se presentan en el párrafo anterior, consideran el análisis químico completo de 40-80 muestras de aguas y el parcial de 10-20 muestras, el análisis de gases en 15-25 muestras de fumarolas, el análisis de oxígeno-18 y deuterio en 50-100 muestras de aguas, y el análisis de tritio en 5-10 muestras de aguas.

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, por lo tanto, es importante programar oportunamente la intervención de los laboratorios que se vayan a encargar de estos 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, 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:

- Esté 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, 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. Eventualmente se utilizan el potencial natural (SP), la sísmica activa (reflexión y refracción), la sísmica pasiva (microsismicidad 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, 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 determinar 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.

5.3.3.2.2 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 interpretado 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 (Duprat, 1987; Wright y otros, 1985 y Goldstein, 1988).

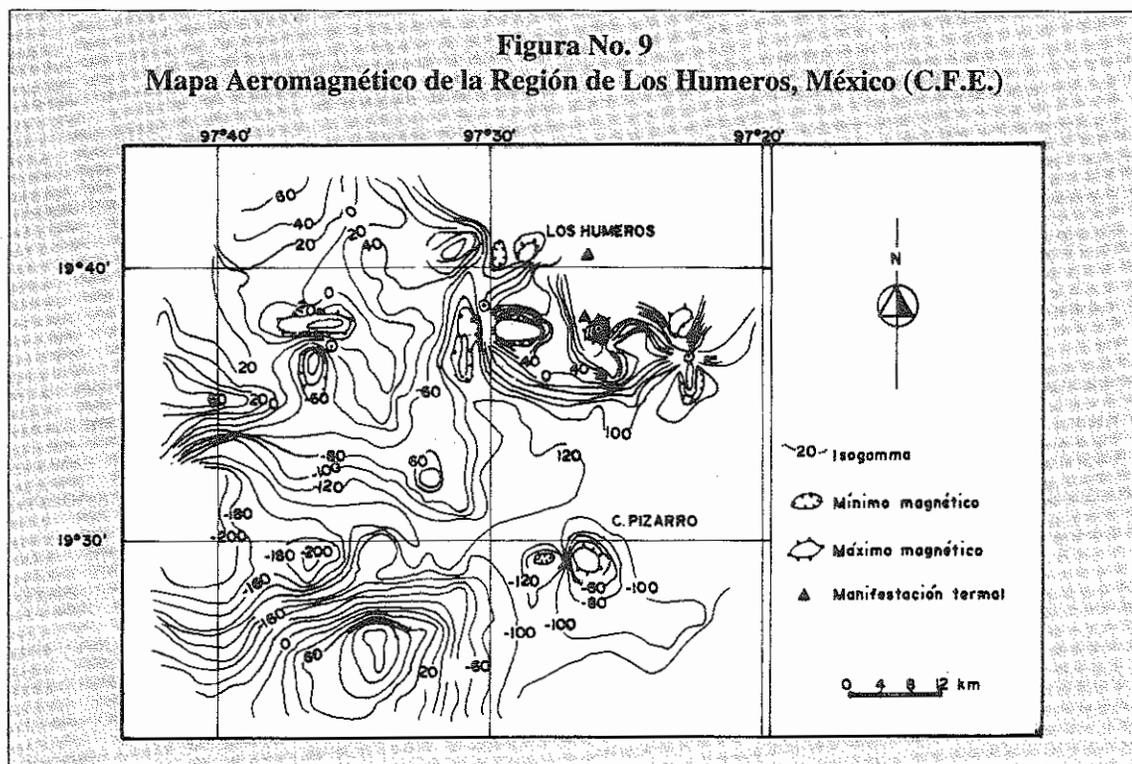
Prospección Aérea

Debido a economías de escala los reconocimientos aéreos son más efectivos en términos de costos si el área de interés geotérmico es grande, si un mismo levantamiento involucra dos o más áreas geotérmicas cercanas y si 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 proveen 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 (Figura No. 9).



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 al 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 vuelos a baja altura.

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. En las fotografías estas zonas se manifiestan como anomalías que se caracterizan por su color o tonalidad, debido a la destrucción/oxidación de la magnetita, hematita o minerales de hidróxido férrico; y en los mapas magnetométricos algunas veces pueden distinguirse por la presencia de bajos magnéticos después que los datos iniciales se han procesado para remover el campo principal terrestre y la deriva diurna.

Si en la zona por investigar 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.

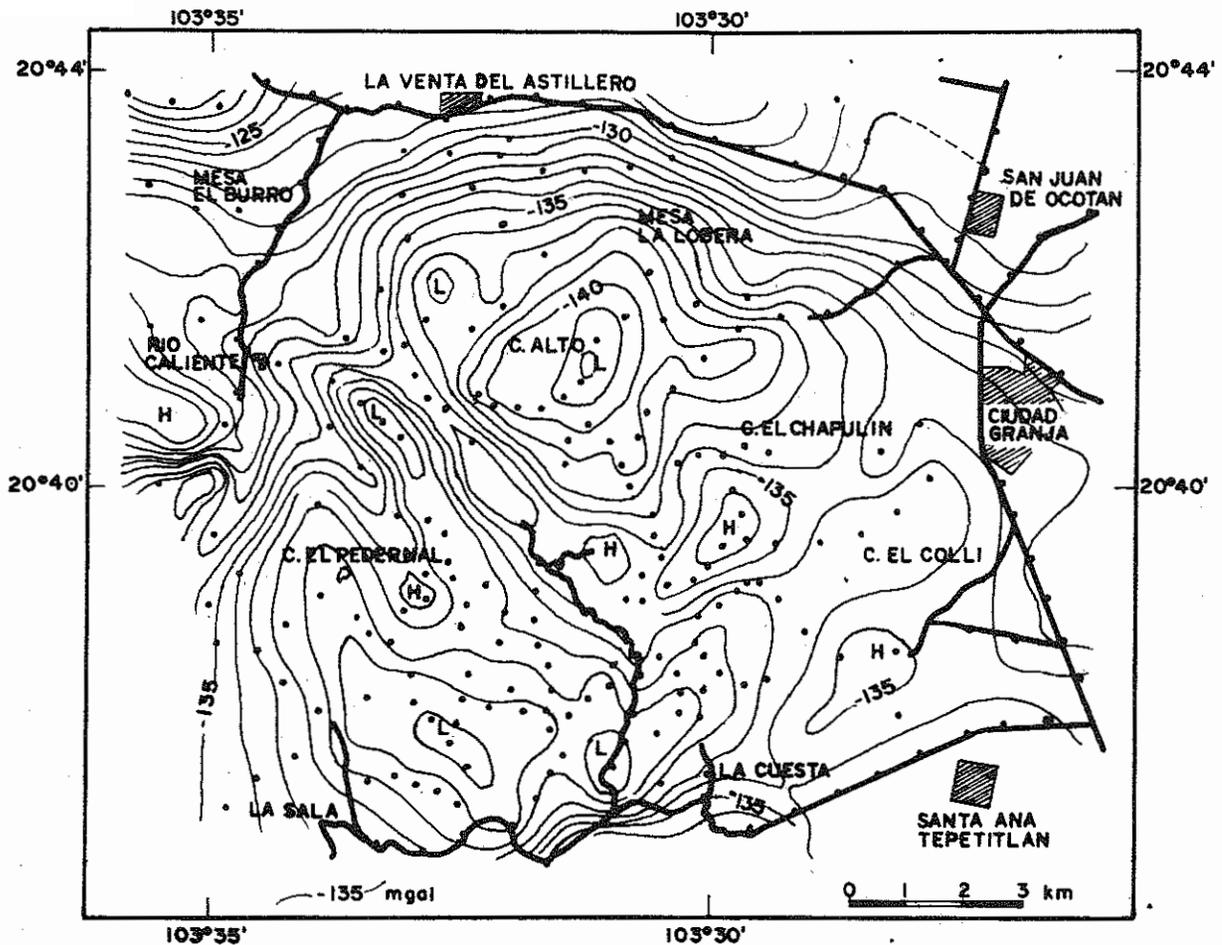
Ya que la técnica del infrarrojo detecta anomalías debidas al tipo de roca, a la vegetación y a la humedad y temperatura del suelo, por mencionar algunos factores que influyen en las mediciones, el infrarrojo térmico como método de exploración resulta útil sólo para detectar las anomalías de mayor flujo de calor. La aeronave que se utiliza para los reconocimientos magnéticos generalmente se puede usar 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 el área de interés, con el fin de contar con una base confiable de datos para la interpretación estructural (Figuras Nos. 10 y 11). 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 son siempre 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 cuan tortuosa sea ésta. En las zonas donde se requiere un mayor detalle, las estaciones de medición se ubican con intervalos del orden de 100 a 200 m en los levantamientos de gravimetría, y del orden de los 250 m en los de magnetometría, incrementándose 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. Normalmente para el estudio de un área geotérmica se requieren entre 500 y 1,000 estaciones de gravimetría y magnetometría. La precisión

Figura No. 10
 Mapa de Anomalía de Bouguer de la Caldera La Primavera (C.F.E., 1989)

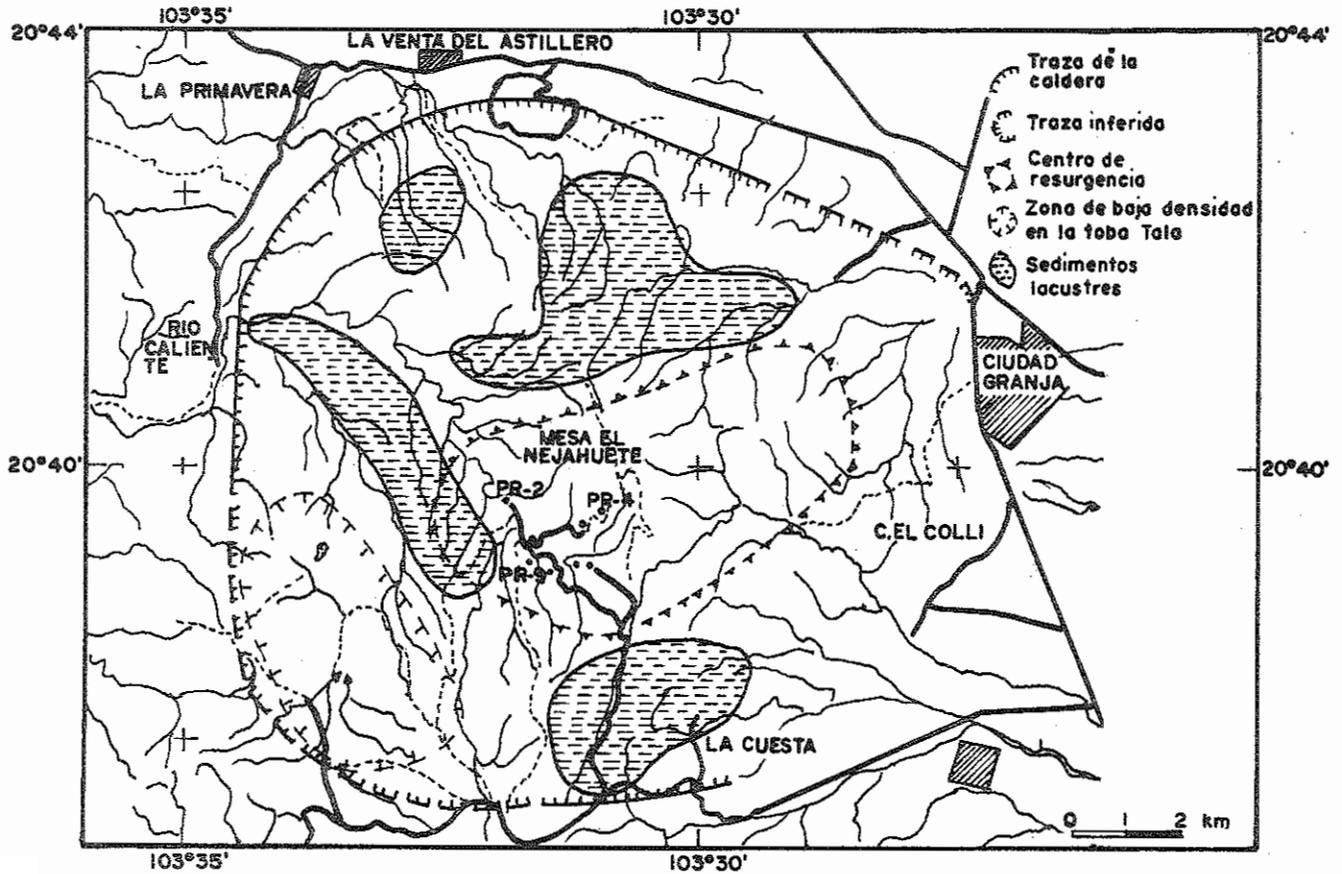


típica para las mediciones de magnetometría y gravimetría son de 1 nT y 0.1 mgal, respectivamente.

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 las estaciones utilizando un sistema receptor portátil de localización por satélite del tipo GPS (Global Position System). El GPS provee la posición tridimensional de un punto, con una aproximación hasta de 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 efectue la gravimetría y magnetometría, aún cuando la densidad de las estaciones sea distinta. Las mediciones eléctricas y/o electromagnéticas proveen estimaciones

Figura No. 11
Intérpretación Estructural del Levantamiento Gravimétrico del Campo Geotérmico
La Primavera, México (C.F.E., 1989)



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 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 (Figuras Nos. 12 y 13). 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 magnetotelúricos (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 que se ubicarán empleando grandes separaciones entre ellas (de 2 a 5 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-Magnetotelúrico 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.

Figura No. 12
Mapa de Iso-resistividad Aparente para $AB/2 = 2,000$ m en el Campo Geotérmico Los Humeros, México (C.F.E.)

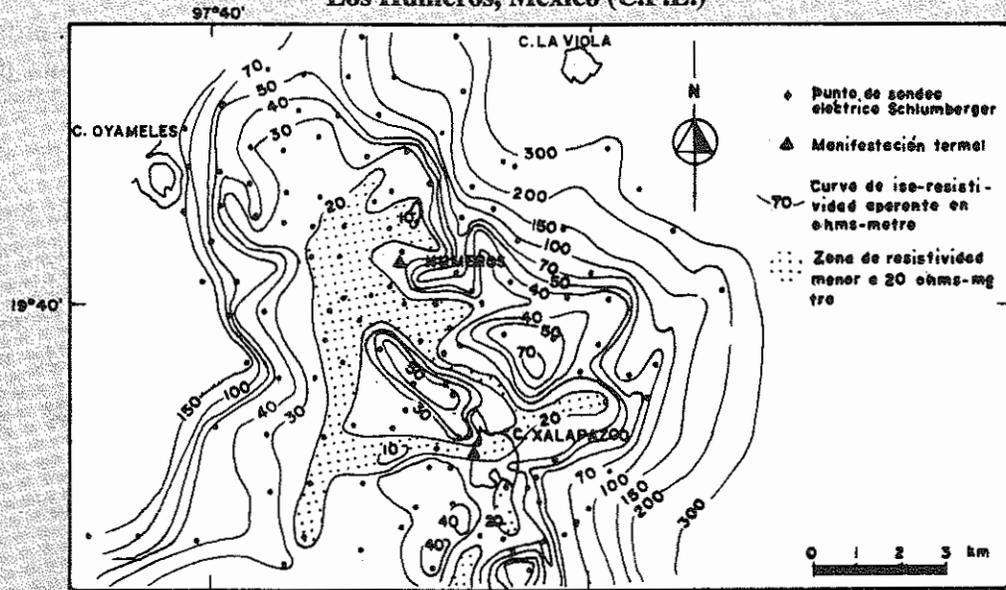
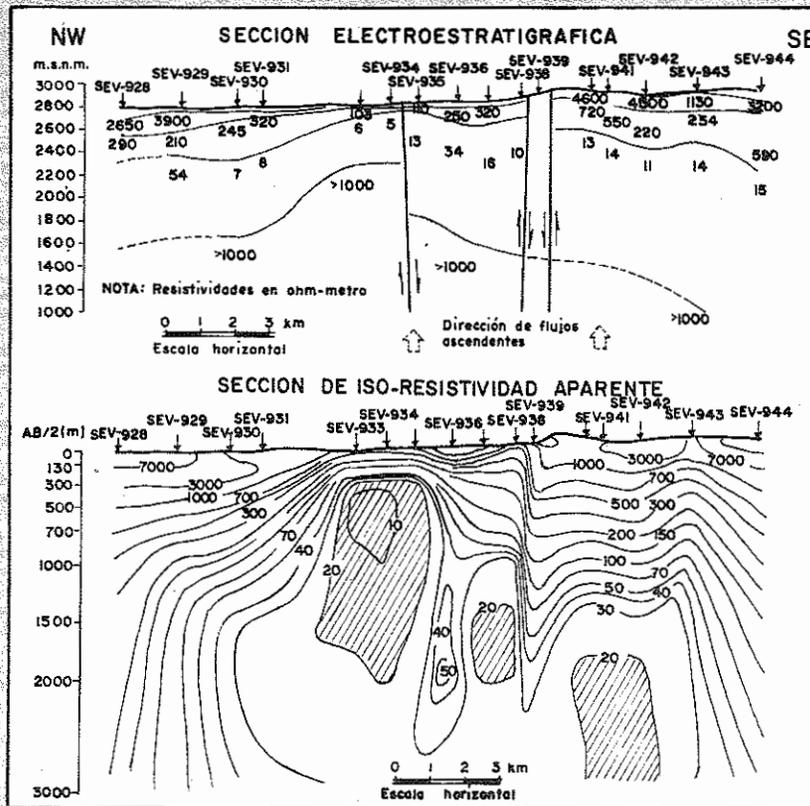


Figura No. 13
Secciones de Iso-resistividad Aparente y Electroestratigráfica del Campo Geotérmico Los Humeros, México (C.F.E.)



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 1,000 a 1,500 metros, con un espaciamiento entre sondeos del orden de 1,000 a 1,500 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 comúnmente se obtiene con ellos.

Dado que en algunas zonas termales 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 sismicidad en varios sitios durante períodos 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 pasan 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 (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 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 la anomalía 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

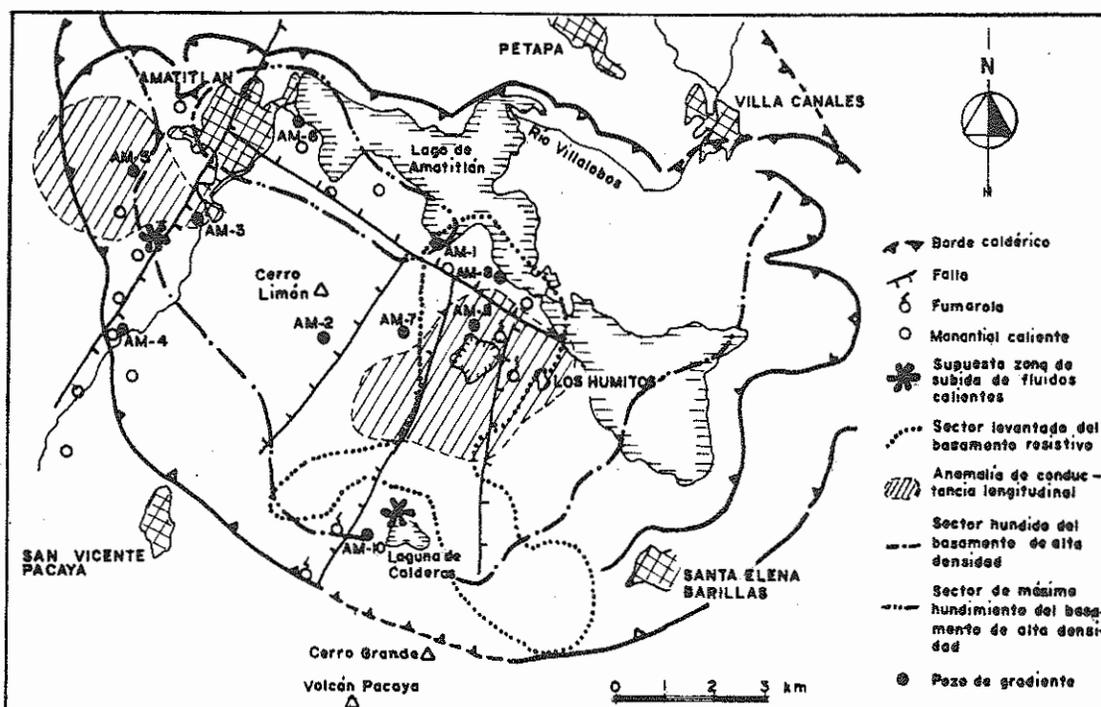
Los estudios de geofísica deben dar como resultados un modelo geológico del sistema geotérmico elaborado con mayor detalle y la identificación, por medio de las anomalías, del posible yacimiento.

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 procesado 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 (Figura No. 14), 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.

Figura No. 14
 Mapa de Información Geofísica Integrada (INDE, 1989)



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 espaciamiento 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, dos pares de radioreceptores portátiles, cables y el soporte informático necesario para el procesado de los datos 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 la empresa equipos para levantamientos eléctricos o magnetotelúricos.

El costo de los estudios considerando la ejecución de levantamientos eléctricos, magnetotelúricos, 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.

De acuerdo con un reporte de la actividad geofísica mundial (The Leading Edge, Vol. 12, No. 11) publicado en noviembre de 1993 por The Society of Exploration Geophysicist, los costos unitarios de algunas de las técnicas geofísicas utilizadas en la exploración geotérmica, son los siguientes:

TECNICA	COSTO UNITARIO (US\$ DOLARES)
Magnetometría Terrestre	\$ 8-20/estación
Gravimetría	\$ 10-24/estación
Magnetometría Aérea	\$ 17-30/km
Infrarrojo Térmico	\$ 8-16/km
Potencial Natural	\$ 5-8/estación
Sondeo Eléctrico Vertical	\$ 300-1,000/sondeo
Sondeo Audio-Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT)	\$ 200-1,500/sondeo
Sondeo Electromagnético de Transitorios en el Dominio del Tiempo (TEM)	\$ 800-2,500/sondeo
Sondeo Magnetotelúrico	\$ 1,500-3,500/sondeo
Calicata Eléctrica	\$ 600-2,000/km
Sísmica de Refracción	\$ 1,000-2,500/km
Sísmica de Reflexión	\$ 8,000-15,000/km
Monitoreo Sísmico	\$ 8,000-15,000/mes

Los costos más bajos en las distintas disciplinas corresponden a levantamientos que involucran grandes volúmenes de trabajo y que son realizados por instituciones o compañías de servicios nacionales. Los más altos corresponden a levantamientos llevados a cabo por empresas del extranjero y en volúmenes de trabajo reducidos. Dichos costos no incluyen los cargos por desplazamientos del personal ni de los equipos al área de trabajo.

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 en la que se realizan los levantamientos eléctricos, magnetoteléuticos, gravimétricos y magnéticos mencionados en párrafos anteriores, dicha investigación podría fluctuar entre 8 y 10 meses.

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.

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 en el subsuelo; 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 hidrológica subterránea del sistema geotérmico, elaborar el modelo preliminar hidrogeológico y, de ser factible, cuantificar la precipitación, la escorrentía, la infiltración, la evapotranspiración, elaborar el balance hídrico preliminar del área y estimar la recarga hídrica profunda del sistema geotérmico.

Tomando en cuenta los datos aportados por las eventuales estaciones hidrométricas existentes dentro y fuera del área involucrada en el reconocimiento, se planificará una red

hidrometeorológica que satisfaga las necesidades mínimas del estudio y, en el caso de ser positivos los resultados de la prefactibilidad, se preparará una red que en la etapa posterior de factibilidad cumpla con las exigencias del caso.

El estudio se realizará en forma coordinada con las investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas, y comprenderán esencialmente las siguientes actividades.

5.3.4.2.1 Trabajo de Gabinete

Haciendo uso de la información preparada en la etapa de reconocimiento, las actividades de gabinete consistirán en:

- 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.
- Preparación 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 y de imágenes de satélite.
- Planificación de una red básica hidrométrica y meteorológica para el área en estudio.

5.3.4.2.2 Trabajo de Campo

Esta fase de la investigación comprenderá:

- 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 obtener la porosidad y permeabilidad.
- Delimitación de la cuenca hidrogeológica incidente en el área de estudio.
- Comprobación de los sistemas de fracturas y fallas identificados mediante fotointerpretación, con el fin de determinar zonas con la mayor probabilidad de tener permeabilidad a profundidad.
- Elaboración del inventario de las fuentes y pozos de agua. Este trabajo se realizará en forma coordinada con el estudio geoquímico. Los datos de las fuentes y pozos de agua deberán contener: localización, caudal, naturaleza y origen, temperatura, pH, características geológicas, etc., y deberán ser acompañados por una muestra del fluido. El caudal, de ser posible, deberá ser medido mediante aforo con molinete o aforo volumétrico, según sea el caso.
- Obtención de información de los pozos existentes, consistente en: características geológicas de las formaciones interceptadas, niveles hidrostáticos, zonas de

fracturamiento, identificación de las formaciones que son acuíferos, 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}O , deuterio y tritio contenidos en los escurrimientos superficiales, manantiales y pozos.
- Implementación de una red mínima hidrométrica y meteorológica en el área de estudio, con la instalación de estaciones meteorológicas, construcción de limnografos 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 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 ella 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 físico-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 hidrológico 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 este estudio con el resultado del análisis de los xenolitos hidrotermalizados, permitirá determinar, a priori, algunas características hídricas del eventual yacimiento geotérmico y de 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. Tal definición se relaciona con:

- 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.- Consiste en una descripción completa de las investigaciones realizadas y sus resultados, así como también la correlación de éstos con otras disciplinas geocientíficas que hayan intervenido en el estudio de prefactibilidad.

El informe describirá las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del área. Contendrá todos los criterios técnicos y el soporte científico de los objetivos alcanzados. Será complementado con el cálculo matemático requerido para establecer el balance hidrológico 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 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 Factibilidad

De resultar positivo el estudio de prefactibilidad se elaborará un programa de estudios hidrogeológicos complementario para las etapas subsiguientes de factibilidad y desarrollo. Su propósito será 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 partes:

- 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 inicial de la información recolectada deberá ser realizada preferentemente por una persona calificada y experimentada en hidrogeología aplicada a la geotermia; dicha persona responsable de este trabajo deberá contar con el apoyo técnico necesario. Más tarde, para la ejecución del estudio de campo, se requerirá del mismo hidrogeólogo y de un auxiliar o técnico hidrólogo.

El tiempo estimado para la realización del trabajo puede variar de acuerdo con el nivel de los estudios precedentes y el tamaño del área a cubrir con investigaciones de campo. Si bien la información necesaria para el estudio debe abarcar al menos un ciclo hidrológico, las actividades de campo del hidrogeólogo y su auxiliar, responsables de la recolección de los datos, no necesariamente tienen que ser continuas durante dicho período. Tomando en cuenta esto, se estima que el trabajo efectivo para realizar la hidrogeología podría ser de 4 a 6 meses en un período de 12 meses.

El costo del estudio considerando lo antes expuesto, 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 investigadas 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 responsable 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 ellos las de la cobertura o sello y las del basamento relativo.
- El modelo de circulación hídrica 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 aportar 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 1,500 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 la temperatura en la parte superior de una anomalía termal, con el propósito de coadyuvar a determinar la posible existencia de un yacimiento y delinear las 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 mW/m² hasta algunos watts/m² térmicos.

Normalmente los flujos de calor mayores de 160 mW/m² 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 los pozos varía normalmente entre 50 m y poco más de 100 m, dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas inferidas del 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 km².

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 una barrena de diamantes y de un barril muestreador especial.

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 registrarán por el interior del pozo, en dos o tres niveles situados a profundidades donde se encuentre 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 entonces 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.

Con la perforación de los pozos se podrá:

- Definir la estratigrafía en cada una de las perforaciones mediante el estudio 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 parte de la columna litológica que sobreyace al yacimiento.
- Calcular las temperaturas a la profundidad inferida del yacimiento.
- Inferir la extensión de la anomalía térmica de alta temperatura.

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 alcanzadas por las perforaciones y 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 1,500 m) existirá la posibilidad de definir la composición litológica de la capa sello y, en su caso, la del yacimiento, así como las temperaturas y las posibilidades de producción.

El objetivo de cada pozo de propósito múltiple tendrá que ser definido previamente para responder ciertas interrogantes relacionadas con la litología, permeabilidad y temperaturas subsuperficiales, especialmente de la cobertura y del yacimiento (cuando esto último sea posible), y determinar 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 profundos de diámetro reducido, cabe mencionar que éstos, cuando alcanzan el yacimiento, por lo general no producen; sin embargo, mediante pruebas de inyección de agua es posible 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 una "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 realizará un plan para perforar uno, dos o más pozos, especificando sus ubicaciones, profundidades y objetivos. El plan tendrá que ser flexible de modo que puedan cambiarse las ubicaciones, profundidades y objetivos de algunos pozos, con base en el resultados del primero o 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 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.

En cuanto se decida la construcción de los pozos tendrán que ser elaborados los diseños básicos de los pozos y los 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 utilizando 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 necesario 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 US\$ 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 los 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 a una profundidad determinada o hasta el fondo

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 varía 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 físicas 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 la producción de fluidos. 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 permitirá determinar las condiciones fisicoquímicas en el yacimiento y hacer un dictamen sobre sus posibilidades de producción y de los probables problemas de corrosión o de incrustación de tuberías del propio pozo y las superficiales, que pudieran presentarse durante la explotación. Este tema se discute con mayor detalle en la Guía para Estudios de Factibilidad de OLADE/BID, (1994).

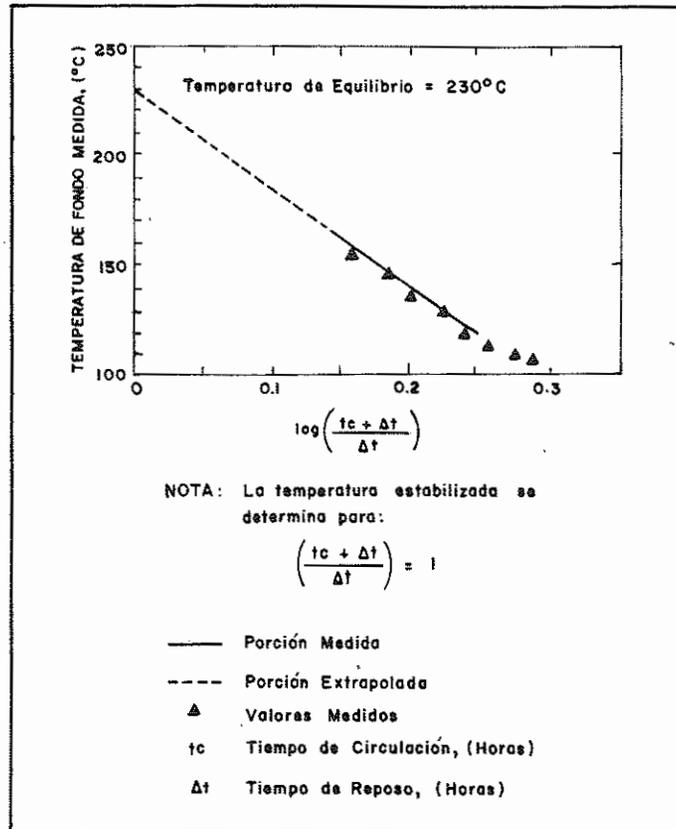
5.5.2.6.3 Estudios Geofísicos

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 la sección 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 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 detectar se incremente entre corridas. Una vez que se hayan completado estos registros y disponiendo de los tiempos de circulación 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. 15.

Figura No. 15
Cálculo de la Temperatura Estabilizada o de Equilibrio en un Pozo, con
Base en los Datos de Temperatura Obtenidos a una Profundidad
Determinada



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, etc.) 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, deberá 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. 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 pozo 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 inyektividad.- 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, de su terminación y del equipo usado en la perforación. La mayor parte del tiempo requerido para una investigación de gradiente de temperatura generalmente se lo lleva la perforación de los pozos. Un pozo de 40 metros de profundidad puede realizarse en un día o una semana, y uno de 200 metros en una semana o en un mes, dependiendo del equipo utilizado. Por lo tanto, tomando en cuenta el 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 período 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 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 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 que señale los aspectos fundamentales para la estimación del potencial del recurso 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, de ser posible, las 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 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.
- 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.

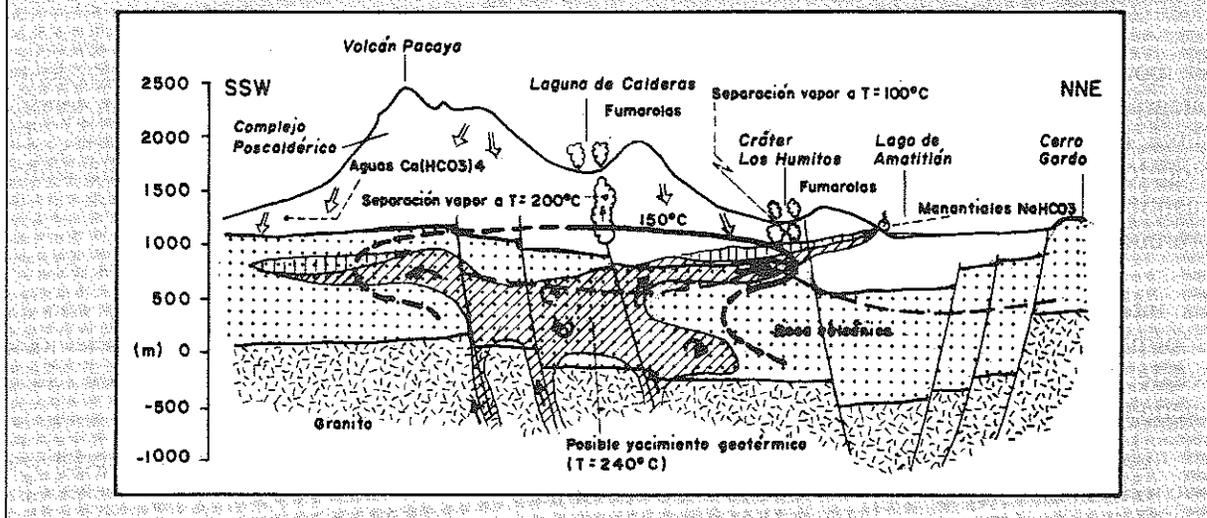
De ser positivos los resultados del estudio de prefactibilidad, especialmente en lo que se refiere a la existencia del yacimiento, el modelo conceptual del sistema geotérmico será la base para conducir exploraciones de factibilidad mediante la perforación profunda de diámetro comercial, cuyo objetivo será comprobar las condiciones geológicas y térmicas del subsuelo representadas en el modelo, y la propia existencia de un yacimiento geotérmico (Figura No. 16).

5.7.2 Evaluación del Potencial Energético Probable

Tomando como base el modelo geotérmico, 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 (1994), o el que se presenta más adelante.

Como se menciona en la etapa de reconocimiento, la magnitud del recurso geotérmico se puede inferir cualitativamente con base a los datos preliminares de la zona de interés. El

Figura No. 16
Sección del Modelo Geotérmico Preliminar de Amatitlán, Guatemala (INDE, 1989)



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.

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 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 de la Cámara Magmática y el Método Volumétrico, que se describen en forma resumida en la sección 4.5.2 de esta guía.

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. La 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 tal energía que es recuperable y convertible a energía útil. Como se menciona en la etapa de reconocimiento, cuando no se tiene suficiente información del subsuelo es el método más recomendable para estimar el potencial energético del posible yacimiento.

En esta sección se presenta una descripción alternativa del 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 proveniente de la perforación de varios pozos de propósito múltiple.

En la etapa de prefactibilidad, sí se perforan pozos de propósito múltiple que alcancen el yacimiento, se tendrá mayor información para formular una hipótesis más razonable sobre su capacidad. 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, y entre ellas las 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 geotérmica 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

Φ = porosidad de la roca

C = capacidad calorífica

σ = densidad

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 primera 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 y otros, 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:

$$e = H_r - T_d s$$

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:

- 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.
- 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, eliminación 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 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:

- . 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 explayarse 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, una zona arqueológica, un parque nacional, 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 podría ser el responsable de la ejecución del EIA, contando con la colaboración del geoquímico, del geofísico y del hidrogeólogo quienes aportarían información importante sobre las condiciones ambientales iniciales, y del ingeniero de perforación quien proporcionaría 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 uno o dos meses y su costo de US\$ 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, 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 períodos 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, la seguridad del 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 proveniente 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 (Guía para la Formulación de Solicitudes de Financiamiento de Proyectos Geotérmicos de Inversión de OLADE y el BID, 1993).

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 km², 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:

Dirección y 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:

Trabajo de campo y gabinete	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 espaciado eléctrico sea 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 una 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 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 del coordinador del proyecto y los supervisores es indispensable para la preparación del informe final.

5.10.2 Recursos Físicos

Los países con posibilidades de desarrollar ampliamente sus recursos geotérmicos y que no dispongan de la infraestructura adecuada, deberán considerar la factibilidad de adquirir 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.
- Microscopio 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 2,000 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 1-2 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 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\$ 4'000,000 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 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.
- 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 polaritation. *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., Sommaruga 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. Capítulo 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, Capítulo 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.
- Duprat, A., 1987. Geophysics in geothermal prospecting. *Applied Geothermics*. Chapter 4, pp.35-67
- 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. y Truesdell, A. H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, pp. 515-525.
- 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., 1981. Aplicacion 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. 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., 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., 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.
- 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. 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.
- 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.
- 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 solidificación 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 formulación de solicitudes de financiamiento de proyectos geotérmicos de inversión. Serie: Documentos de OLADE. Quito, Ecuador.
- OLADE/BID, 1994. 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.
- Watson 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. 2666-269.