



ORGANIZACION LATINOAMERICANA
DE ENERGIA



BANCO INTERAMERICANO
DE DESARROLLO

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



**Quito - Ecuador
Abril de 1994**



ORGANIZACION LATINOAMERICANA
DE ENERGIA



BANCO INTERAMERICANO
DE DESARROLLO

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



**Quito - Ecuador
Abril de 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,
Facsimile: 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
Facsimile: 593-2-539684, Télex: 2-2728 OLADE ED

ISBN 9978-70-048-X
OLADE 009G/94

PRESENTACION

Basado en los objetivos de: a) promover acciones para el aprovechamiento y defensa de los recursos naturales de los Países Miembros y de la Región en conjunto, y b) fomentar una política para la racional explotación, transformación y comercialización de los recursos energéticos, OLADE, ante la crisis del petróleo en la década de los 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 geotérmico de América Latina y del Caribe, se presenta en este documento que contiene la guía para la Evaluación del Potencial Energético en Zonas Geotérmicas Durante las Etapas Previas a la Factibilidad, con el objetivo de poner a la disposición de los países de la Región un instrumento que les permita estimar, en las etapas iniciales de la investigación geotérmica, el potencial de este recurso que eventualmente podría ser incluido en la planificación energética nacional.

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

INDICE

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. METODOLOGIA	2
2.1 Métodos de Evaluación del Recurso Geotérmico	3
2.1.1 Método del Flujo Térmico Superficial	3
2.1.2 Método de la Fractura Planar	4
2.1.3 Método del Calor Magmático o de la Cámara Magmática	4
2.1.3.1 Evaluación de la Fuente de Calor	5
2.1.3.2 Modelado de la Transferencia de Calor	6
2.1.4 Método Volumétrico	7
2.1.4.1 Recurso Base Accesible	7
2.1.4.2 Recurso Geotérmico	9
3. CONCLUSIONES	11
4. BIBLIOGRAFIA	12

TABLA

Tabla No. 1	Problemas geotécnicos que afectan los costos de un proyecto de explotación geotérmica	17
-------------	---	----

FIGURAS

Figura No. 1	Modelo conceptual del campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, que corresponde a un ejemplo de un sistema geotérmico asociado con un aparato volcánico	18
Figura No. 2	Concepto de Reserva Geotérmica de acuerdo con limitantes tecnológicas y económicas	19
Figura No. 3	Factores de Recuperación Geotérmicos teóricos (relativos a 40 °C) dados en función de la temperatura y porosidad del yacimiento	20
Figura No. 4	Factores de Recuperación Geotérmicos teóricos (relativos a 15 °C) dados en función de la temperatura y porosidad del yacimiento	20

Figura No. 5	Razón de trabajo útil y la energía acumulada en el yacimiento versus su temperatura, para sistemas geotérmicos de tipo líquido dominante	21
Figura No. 6	Factor de Utilización para diferentes ciclos de trabajo eléctrico y temperaturas	21
Figura No. 7	Proceso global de evaluación del potencial energético	22

INTRODUCCION

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

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

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

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

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

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

Por ejemplo, los problemas geotécnicos que pudieran aparecer durante la exploración, desarrollo y/o explotación del proyecto (Tabla No. 1), podrían aumentar los costos relacionados con la construcción de obras civiles, la perforación de los pozos y la producción de fluidos geotérmicos en volúmenes suficientes. Estos costos adicionales podrían incidir negativamente en el aspecto económico de un proyecto de explotación geotérmica, pudiendo transformarlo en uno de poco interés comercial, a pesar de la gran cantidad de calor que pudiera estar presente en el subsuelo.

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

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

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

2. METODOLOGIA

La magnitud del potencial energético de un sistema geotérmico de tipo hidrotermal, se puede "estimar" en forma aproximada considerando las características del sistema observables desde la superficie. Al hacer este análisis se tiene que recordar que la existencia de un sistema hidrotermal se debe a la presencia de: a) una fuente de calor endógeno, b) fluidos que capturen y transporten dicho calor, c) estructuras geológicas (fallas, fracturas) que permitan el flujo de estos fluidos geotérmicos, d) formaciones geológicas permeables donde almacenar los fluidos (el yacimiento), y e) formaciones poco permeables cubriendo el yacimiento (capa sello) que prevengan o reduzcan el movimiento ascendente de los fluidos geotérmicos y la mezcla de los mismos con aguas subterráneas someras más frías.

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

1 Figuras al final de la guía

investigaciones específicas. Mayores detalles de los diferentes métodos se podrán obtener en los trabajos a los que se hace referencia más adelante.

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

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

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

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

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

2.1 Métodos de Evaluación del Recurso Geotérmico

Los principales métodos para evaluar los recursos geotérmicos de un sistema durante las etapas previas a la factibilidad de un proyecto, son los siguientes:

2.1.1 Método del Flujo Térmico Superficial

El método del flujo térmico superficial es muy simple y se basa en el cálculo de la cantidad de calor subterráneo que es transmitido a la superficie por unidad de tiempo

(Muffler y Cataldi, 1978). Esta transferencia térmica es por conducción y convección ($Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}}$). La Potencia Térmica Natural (PTN) es igual a la suma del calor transferido por medio de estos dos procesos,

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

donde,

A = superficie del área estudiada (m^2)

q_{cond} = calor transmitido por conducción por unidad de área (W/m^2)

q = caudal másico de fluido (kg/seg)

c_f = capacidad calorífica del fluido ($J/kg \cdot ^\circ C$)

T_f = temperatura del fluido fluyendo de las manifestaciones ($^\circ C$)

T_o = temperatura ambiente ($^\circ C$).

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

2.1.2 Método de la Fractura Planar

El método de la fractura planar se basa en el modelo de una fractura plana que recibe calor por conducción de la roca vecina impermeable (Bodvarsson, 1974). La cantidad de energía térmica que se puede extraer de la fractura por unidad de área es función de la temperatura de la roca circundante y de la temperatura inicial y final (después de 25 ó 50 años) del fluido en la fractura.

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

2.1.3 Método del Calor Magmático o de la Cámara Magmática

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

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

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

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

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

Primero se desarrolla un modelo de la cámara, o sea se estima su profundidad, volumen, edad y temperatura inicial y final, luego se calcula la distribución de temperaturas (o del gradiente térmico) en la corteza considerando sólo la conducción. Tal como lo indican Barberi y Marinelli (1987), este método de evaluación de la fuente de calor es muy rudimentario y un modelo conductivo-convectivo estaría más acorde con la realidad. Desafortunadamente en las etapas iniciales de un proyecto, donde generalmente no se tienen pozos profundos, no hay datos suficientes para un cálculo preciso de la transferencia térmica por convección.

2.1.3.1 Evaluación de la Fuente de Calor

Determinación del Volumen y Profundidad de la Cámara Mágica

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

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

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

Determinación de la Edad de la Cámara Mágica

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

Temperatura de la Cámara Mágica

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

2.1.3.2 Modelado de la Transferencia de Calor

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

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

La distribución de temperaturas en la región localizada sobre la cámara magmática cambia con el tiempo a medida que la cámara se enfría y el calor es transferido hacia la superficie. En base a la edad y la temperatura inicial de la cámara magmática, se

podrán calcular las temperaturas actuales en los niveles superiores de la corteza donde se supone la existencia del yacimiento geotérmico. Esto a su vez permitirá estimar la cantidad de calor actualmente acumulado en dicho yacimiento.

2.1.4 Método Volumétrico

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

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

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

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

2.1.4.1 Recurso Base Accesible

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

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

Al estimar el RBA se considera sólo el calor almacenado actualmente en el yacimiento y no se incluye la recarga térmica que pudiera existir. Esto se debe a la falta de datos y a la incertidumbre que existe sobre la magnitud de dicha recarga durante la vida de un proyecto geotérmico. Una cuantificación de la recarga sólo se podrá obtener en etapas avanzadas del proyecto, una vez que se haya perforado un número apreciable de pozos y realizado estudios de modelado del yacimiento. Pero en dichas etapas, la estimación del RBA sólo es de interés secundario y es mucho más importante diseñar planes de manejo del yacimiento que optimicen la explotación del sistema geotérmico.

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

Cálculo del Recurso Base Accesible

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

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

donde,

q_y = Energía térmica acumulada en el yacimiento (J)

C_v = Capacidad calorífica del yacimiento por unidad de volumen, incluyendo roca y fluidos ($2.7 * 10^6$ J/m³ - °C)

A = Área del yacimiento (m²)

E = Espesor del yacimiento (m)

T = Temperatura del yacimiento (°C)

T_r = Temperatura base de referencia (15 °C)

La capacidad calorífica por unidad de volumen (C_v) se calcula considerando valores característicos para yacimientos geotérmicos, o sea utilizando una porosidad de 15% y una capacidad térmica volumétrica para la roca de $2.5 * 10^6$ J/m³ - °C. La temperatura base de referencia (15 °C) corresponde al promedio anual de la temperatura de la superficie de los EE.UU. (Brook y otros, 1979). Estos valores se pueden ajustar de acuerdo a las características del sistema que se vaya a evaluar.

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

En zonas geotérmicas donde la existencia del yacimiento está basada en la presencia de una sola manifestación (o grupo de manifestaciones restringidas a una zona pequeña),

se supone que el área más probable es de 2 km². Si se tiene información sobre varias manifestaciones que presenten características químicas similares, localizadas en una zona con geología superficial que sugiera que provienen del mismo yacimiento, se considera el área que incluye a dichas manifestaciones.

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

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

En la etapa de prefactibilidad la localización de la cima del yacimiento se podría inferir con base a resultados de estudios geofísicos o a datos obtenidos en pozos de usos múltiples, si los hubiera. Los registros de la temperatura de los pozos de gradiente son también muy útiles para este propósito. Si no se tuviera este tipo de información, Brook y otros proponen que se considere como la profundidad más probable de la cima, 1.5 km.

Basándose en lo anterior y suponiendo que el yacimiento se extiende hasta los 3 km de profundidad, Brook y otros indican que 1.5 km es el espesor más probable para el yacimiento. Hay que indicar que la incertidumbre que existe sobre el espesor normalmente es menor que la correspondiente al área del yacimiento.

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

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

2.1.4.2 Recurso Geotérmico

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

Estimación del Recurso Geotérmico

Debido a razones físicas, técnicas y económicas no toda la energía térmica acumulada en el yacimiento puede ser aprovechada. El Recurso Geotérmico (RG) de un sistema de tipo líquido dominante, se calcula utilizando un Factor de Recuperación Geotérmico

(FRG) que se define como la razón entre la energía que se puede extraer a nivel boca de pozo (q_{bp}) y la energía contenida originalmente en el yacimiento (q_y), o sea:

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

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

Para sistemas dominados por líquido, el valor del FRG se calcula basándose en modelos de extracción térmica de tipo flujo intergranular o de barrido (Bodvarsson, 1974; Nathenson, 1975). En las figuras Nos. 3 y 4 se presentan valores teóricos para el FRG, en función de la temperatura y porosidad del yacimiento. Debido al comportamiento no ideal de los sistemas geotérmicos, en la práctica los factores de recuperación son menores; Nathenson y Muffler (1975), y Brook y otros (1979) proponen que el valor del FRG sea 0.25.

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

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

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

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

El resultado de los cálculos realizados por Brook y otros y los obtenidos mediante la fórmula anterior están dados en la figura No. 5, en la que se gráfica la razón entre el trabajo útil (W_u) y la energía térmica acumulada en el yacimiento (q_y) contra la temperatura del yacimiento (T). En la figura se muestra una curva para una profundidad (promedio) del yacimiento (Z_y) de 3 km y otra para 1 km (de Brook y otros, 1979), y curvas para temperaturas de referencia (T_r) de 15 y 40 °C, respectivamente (Paolo Liguori, com. pers., 1993). Hay que recalcar que en dichos cálculos se incluyó un factor de recuperación (FRG) igual a 0.25.

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

$$E = FU * W_u$$

Este factor es menor que 1 debido a las pérdidas que ocurren durante el proceso de conversión, aún respecto a la conversión ideal (FCI). El valor de FU depende de la

temperatura del fluido y del ciclo de trabajo utilizado. Brook y otros calcularon el valor de FU para diferentes ciclos y temperaturas del yacimiento o a boca de pozo (Figura No. 6). Para sistemas de líquido dominante con temperaturas mayores de 150 °C, un valor de FU de 0.4 se considera representativo. Para dichas temperaturas y utilizando ciclos de vapor, el valor de FU varía entre 0.5 y 0.6 (Paolo Liguori, com. pers., 1993).

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

3. CONCLUSIONES

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

Sin embargo, en las etapas iniciales de un proyecto (reconocimiento y prefactibilidad) cuando la cantidad de información del sistema geotérmico es limitada, el potencial de un posible yacimiento sólo puede evaluarse mediante métodos basados en "estimaciones" sobre las dimensiones, temperaturas, porosidades y otros parámetros del mismo, que generalmente no se conocen con precisión o se desconocen durante las etapas previas a las de factibilidad y desarrollo del campo.

En las etapas de reconocimiento o de prefactibilidad, con la poca información disponible del sistema geotérmico, el potencial energético se puede "estimar" mediante la aplicación de alguno o algunos de los métodos descritos en este documento, utilizando datos preliminares sobre las condiciones geológicas y ciertos parámetros físico-químicos del sistema.

De acuerdo con algunos autores como Muffler y Cataldi, cualquiera de los cuatro métodos aquí descritos, si bien son simples en su aplicación, no son totalmente satisfactorios. De ellos, en general parece existir una mayor preferencia por emplear el método volumétrico por ser el más riguroso y el más utilizado.

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

4. BIBLIOGRAFIA

- Barberi, F. y Marinelli, G., 1987. Recientes Progresos en la Vulcanología Aplicada a la Exploración Geotérmica. *Revista Energética, OLADE*, Vol. 11, No. 2, pp. 91-115.
- Barberi, F., Cataldi, R. y Merla, A., 1987. Resources and Development Perspective of Geothermal Energy in Central and South America. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 5, No. 2, pp. 245-265.
- Barker, B.H. y McBirney, A.R., 1985. Liquid Fractionation. Part III: Geochemistry of Zoned Magmas and the Compositional Effects of Liquid Fractionation. *Journal Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 24, pp. 55-81.
- Bodvarsson, G., 1974. Geothermal Resource Energetics. *Geothermics*, Vol. 3, No. 1, pp. 83-92.
- Brook, C.A., Mariner, R.H., Mabey, D.R., Swanson, J.R., Guffanti M. y Muffler, L.J.P., 1979. Hydrothermal Convection Systems with Reservoir Temperatures > 90 °C, en *Assessment of Geothermal Resources of the United States* (L.J.P. Muffler, editor). U.S. Geological Survey Circular 790, pp. 18-85.
- Carmichael, I.S.E., Turner, F.J. y Verhoogen, J., 1974. *Igneous Petrology*. McGraw-Hill, New York, 739 p.
- Cortini, M., Lima A. y De Vivo B., 1985. Trapping Temperatures of Melt Inclusions from Ejected Vesuvian Mafic Xenoliths. *Journal Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 26, pp. 167-172.
- De Boer, J., 1979. Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes Volcanic Domes in the Northern Part of the Gulf of California Rhombochasm. *Actas Segundo Simposio sobre el Campo de Cerro Prieto, Baja California, México, Octubre 17-19, Mexicali, BCN, México, Comisión Federal de Electricidad*, pp. 91-102.
- Donnelly-Nolan, J.M., 1988. A Magmatic Model of Medicine Lake Volcano, California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. B5, pp. 4412-4420.
- Dorn, R.I. y otros, 1990. Dating Rock Varnishes by the Cation Ratio Method with PIXE, ICP, and the Electron Microprobe. *International Journal of PIXE*, Vol. 1, pp. 157-195.
- Elders, W.A., Bird, D.K., Williams, A.E. y Shiffman, P., 1984. Hydrothermal Flow Regime and Magmatic Heat Source of the Cerro Prieto Geothermal System, Baja California, México. *Geothermics*, Vol. 13, pp. 27-47.
- Faure, G., 1986. *The Principles of Isotope Geochemistry*, 2nd. Edition. John Wiley and Sons, New York.

- Goldstein, N.E. y Flexer, S., 1984. Melt Zones Beneath Five Volcanic Complexes in California: An Assessment of Shallow Magma Occurrences. Lawrence Berkeley Laboratory, Informe LBL-18232, 134p.
- González P., E. y otros, 1991. Informe Final del Estudio Geovulcanológico sobre Ahuachapán-Chipilapa. Informe VNG-IF-OO3-C5-2 Preparado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, abril 1991.
- Grigsby, C.O., Goff, F., Trujillo, P.E., Jr., Counce, D.A., Dennis, B., Kolar, J. y Corrales, R., 1989. Resultado de las Investigaciones en el Campo Geotérmico de Miravalles, Costa Rica. Parte 2: Muestreo de Fluidos Pozo Abajo. Los Alamos National Laboratory, Informe LA-11510, 51 p.
- Harjono, H. y otros, 1989. Detection of Magma Bodies Beneath Krakatau Volcano (Indonesia) from Anomalous Shear Waves. Journal Volcanology and Geothermal Research, Vol. 39, pp. 335-348.
- Henley, R.W. y Ellis, A.J., 1983. Geothermal Systems Ancient and Modern: A Geochemical Review. Earth Sciences Review., Vol. 19, pp. 1-50.
- Henley, R.W., Truesdell, A.H., Barton, P.B., Jr. y Whitney, J.A., 1984. Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, Vol.1, 267 p.
- ICE, 1991. Evaluación del Potencial Geotérmico de Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad, Informe Interno, Noviembre 1991.
- Muffler, L.J.P. y Cataldi, R., 1978. Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources. Geothermics, Vol. 7, pp. 53-90.
- Nathenson, M., 1975. Physical Factors Determining the Fraction of Stored Energy Recoverable from Hydrothermal Convection Systems and Conduction-Dominated Areas. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-525, 35 p.
- Nathenson, M., 1978. Methodology of Determining the Uncertainty in the Accessible Geothermal Resource Base of Identified Hydrothermal Convection Systems. U.S. Geological Survey Open-File Report 78-1003, 51 p.
- Nathenson, M. y Muffler, L.J.P., 1975. Geothermal Resources in Hydrothermal Convection Systems and Conduction-Dominated Areas, en Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975 (D.E. White y D.L. Williams, Edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 104-121.
- Renner, J.L., White, D.E. y Williams, D.L., 1975. Hydrothermal Convection Systems, en Assessment of Geothermal Resources of the United States - 1975 (D.E. White y Williams, D.L., edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 5-57.

- Rieck, H.J., Sarna-Wojcicki, A.M., Meyer, C.E. y Adam, D.P., 1992. Magnetostratigraphy and Tephrochronology of an Upper Pliocene to Holocene Record in Lake Sediments at Tulare, Northern California. Geological Society of America Bulletin, Vol. 104, pp. 409-428.
- Rivera R., J., 1983. Aplicaciones de la Ingeniería de Yacimientos en la Evaluación de un Campo Geotérmico. Trabajo Presentado Durante el Seminario Latinoamericano sobre Exploración Geotérmica, Quito, Ecuador, 5-9 de septiembre.
- Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol. 12, Mineralogical Society of America, 644 p.
- Smith, R.L. y Shaw, H.R., 1975. Igneous-Related Geothermal Systems, en Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975: (D.E. White y D.L. Williams, edits.). U.S. Geological Survey Circular 726, pp. 58-83.
- Smith, R.L. y Shaw, H.R., 1979. Igneous-Related Geothermal Systems, en Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978: (L.J.P. Muffler, editor). U.S. Geological Survey, Circular 790, pp. 12-18.
- Steen-McIntyre, V., 1977. A Manual for Tephrochronology. Colorado School of Mines, 167 p.
- Tsukui, M., 1985. Temporal Variation in Chemical Composition of Phenocrysts and Magmatic Temperatures at Daisen Volcano, Southwest Japan. Journal Volcanology and Geothermal Research, Vol. 26, pp. 317-336.
- UNITAR/UNDP, 1991. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (F. D'Amore, coordinador). UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Roma, Italia, 408 p.
- White, D.E. y Williams, D.L., edits., 1975. Assessment of Geothermal Resources of the United States-1975. U.S. Geological Survey, Circular 726, 155 p.

ANEXOS

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

LOCALIZACION DE LAS OBRAS

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

PERFORACION Y/O TERMINACION DE POZOS

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

FLUIDOS

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

CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO

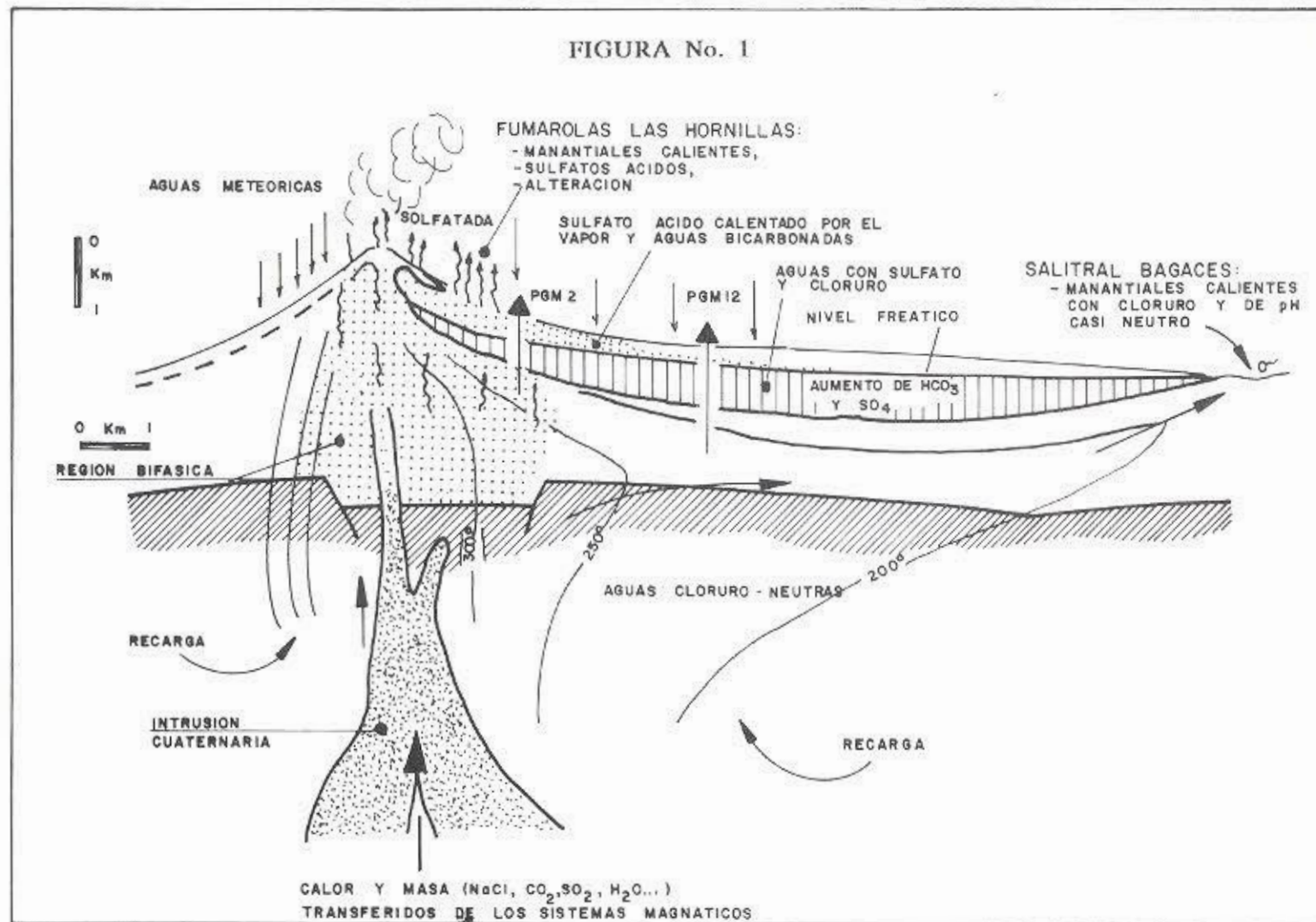
- Baja permeabilidad de la formación (bajos índices de productividad y/o inyectividad de los pozos).
- Recarga rápida de aguas subterráneas frías (entrada de aguas frías en los pozos productores).
- Precipitación de minerales en los poros y/o fracturas del yacimiento (reducción de porosidad y permeabilidad).

POZOS Y SUS TUBERIAS

- Incrustación.
- Corrosión.
- Colapsos y fracturas.

MEDIO AMBIENTE

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



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

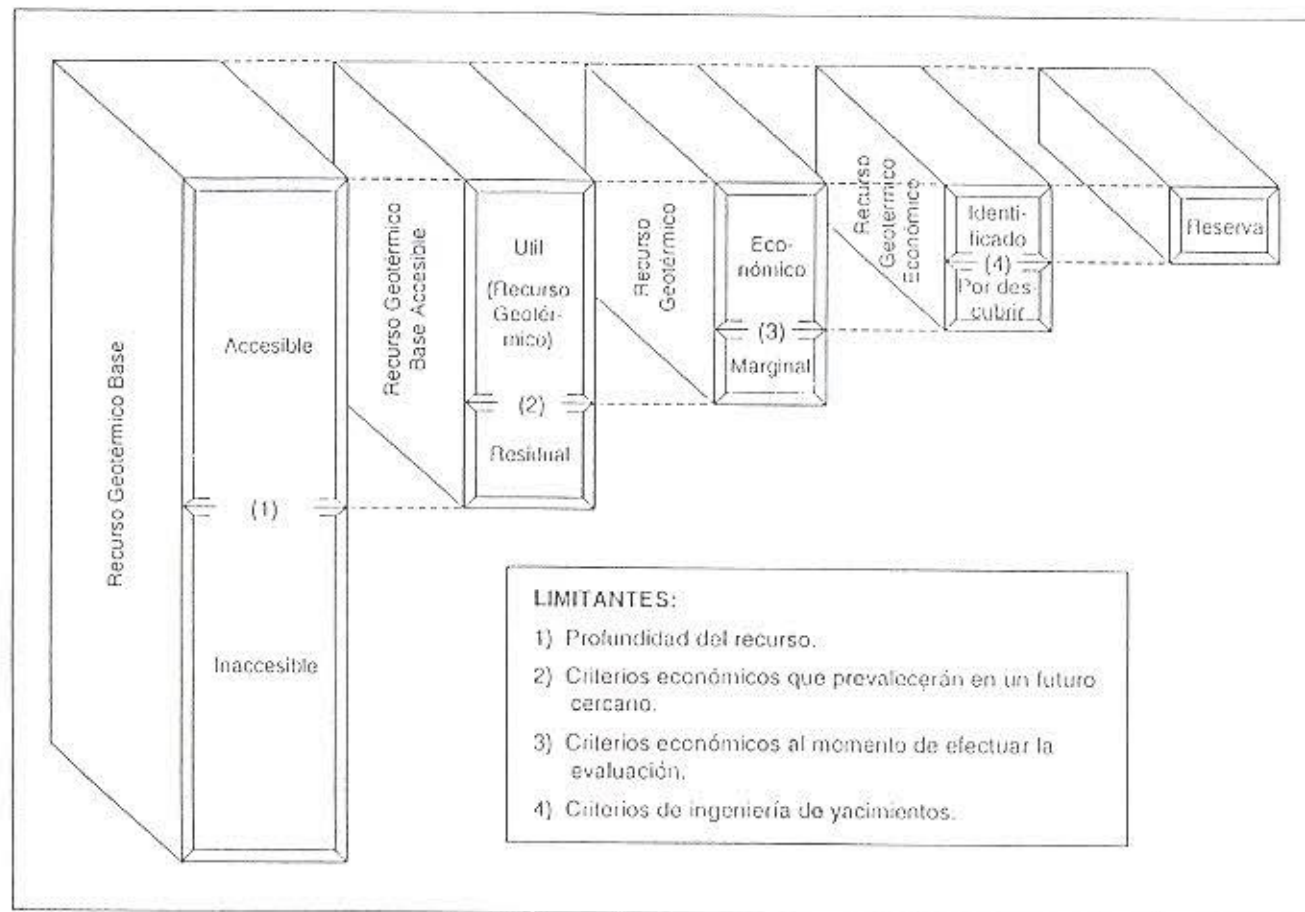


Figura No. 2

Concepto de Reserva Geotérmica de acuerdo con limitantes tecnológicas y económicas (de Rivera, 1983).

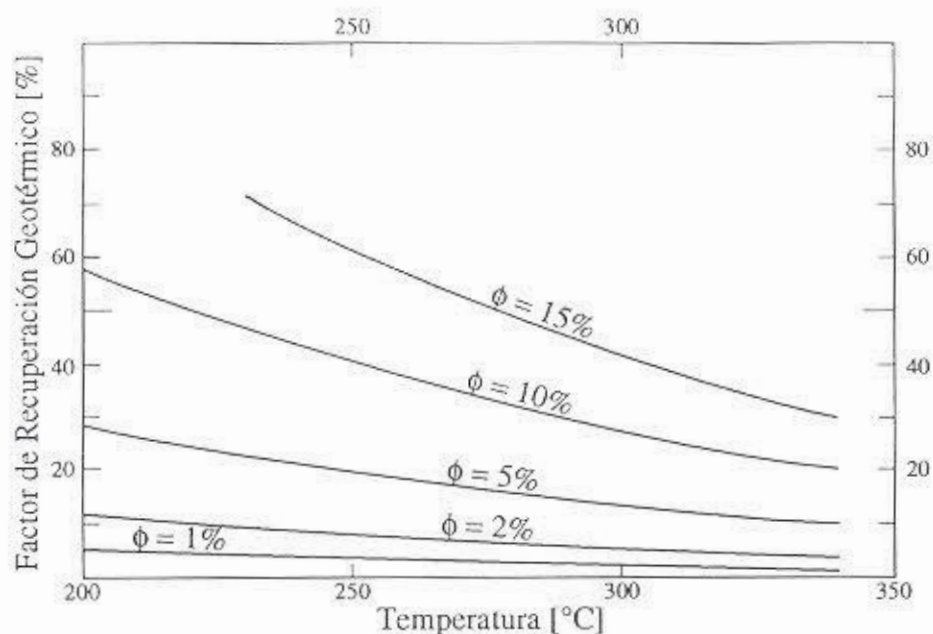


Figura No. 3

Factores de Recuperación Geotérmicos (FRG) teóricos (relativos a 40 °C) dados en función de la temperatura y porosidad (ϕ) del yacimiento (de Muffler y Cataldi, 1978). Estos valores deberán ser considerados como límites superiores, ya que los factores verdaderos que se obtiene en la práctica son inferiores.

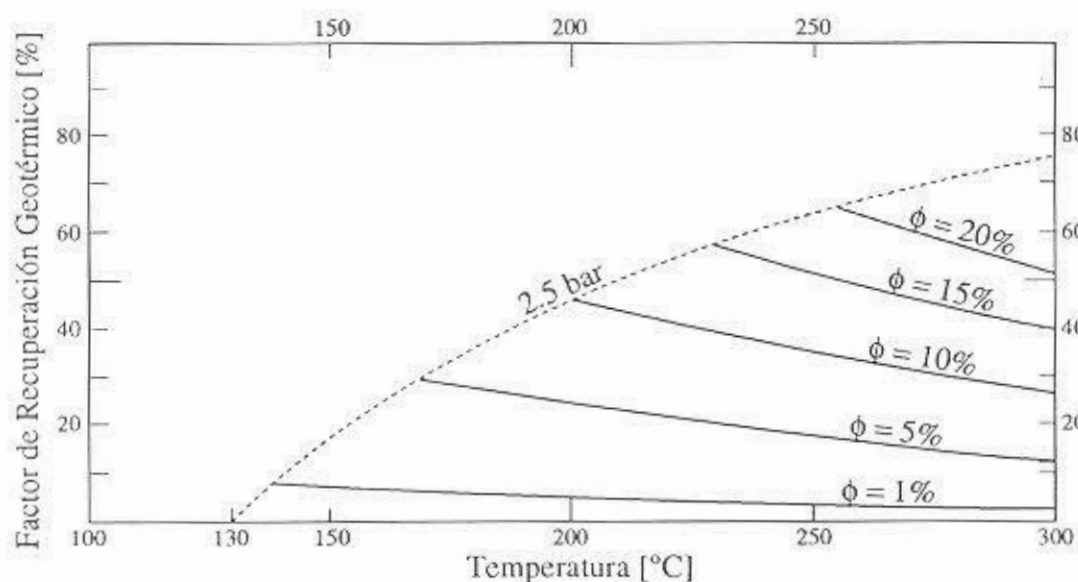


Figura No. 4

Factores de Recuperación Geotérmicos (FRG) teóricos (relativos a 15 °C) dados en función de la temperatura y porosidad (ϕ) del yacimiento. La curva punteada corresponde a una presión final límite de 2.5 bar (de Muffler y Cataldi, 1978). Estos valores deberán ser considerados como límites superiores, ya que los factores verdaderos que se obtiene en la práctica son inferiores.

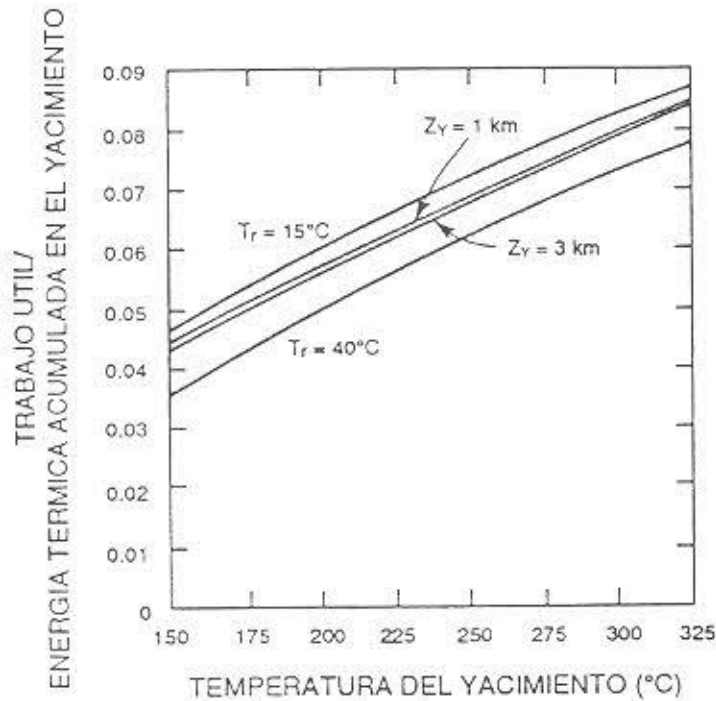


Figura No. 5

Razón de trabajo útil (W_u) y la energía acumulada en el yacimiento (q_v) versus su temperatura, para sistemas geotérmicos de tipo líquido dominante. Dos curvas corresponden a diferentes profundidades promedio del yacimiento (Z_Y ; de Brook y otros, 1979) y otras dos a diferentes temperaturas de referencia (T_r ; de Paolo Liguori, com. pers., 1993). Para calcular W_u fue utilizado un Factor de Recuperación Geotérmico igual a 0.25.

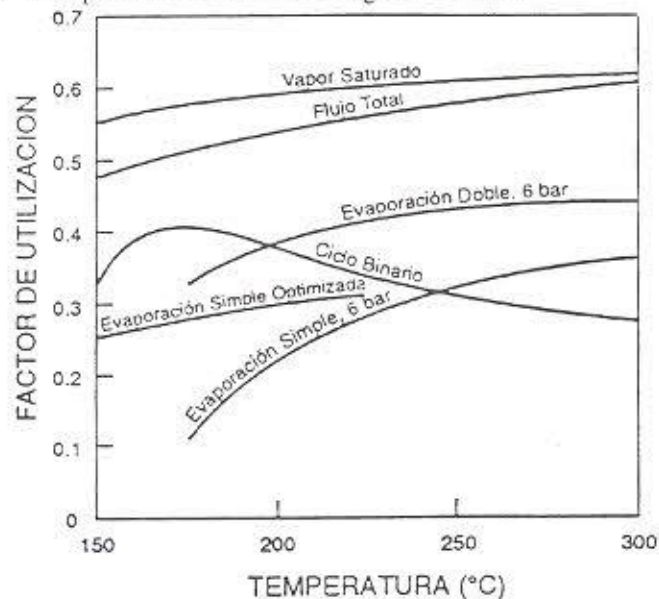


Figura No. 6

Factor de Utilización (FU) para diferentes ciclos de trabajo eléctrico y temperaturas (los distintos ciclos se muestran para ilustrar su comportamiento en general). Para vapor saturado la temperatura es la medida en el cabezal del pozo. Para sistemas de líquido dominante la temperatura corresponde a la entalpía en el cabezal del pozo, considerando que el fluido es agua líquida. Para todos los ciclos se supone que la temperatura de condensación es de 40 °C. Para los ciclos de evaporación instantánea simple o doble se considera que la primera etapa de separación se realiza a una presión 6 bars, o sea que dichos ciclos son sólo apropiados para temperaturas mayores de 200 °C, aproximadamente (de Brook y otros, 1979).

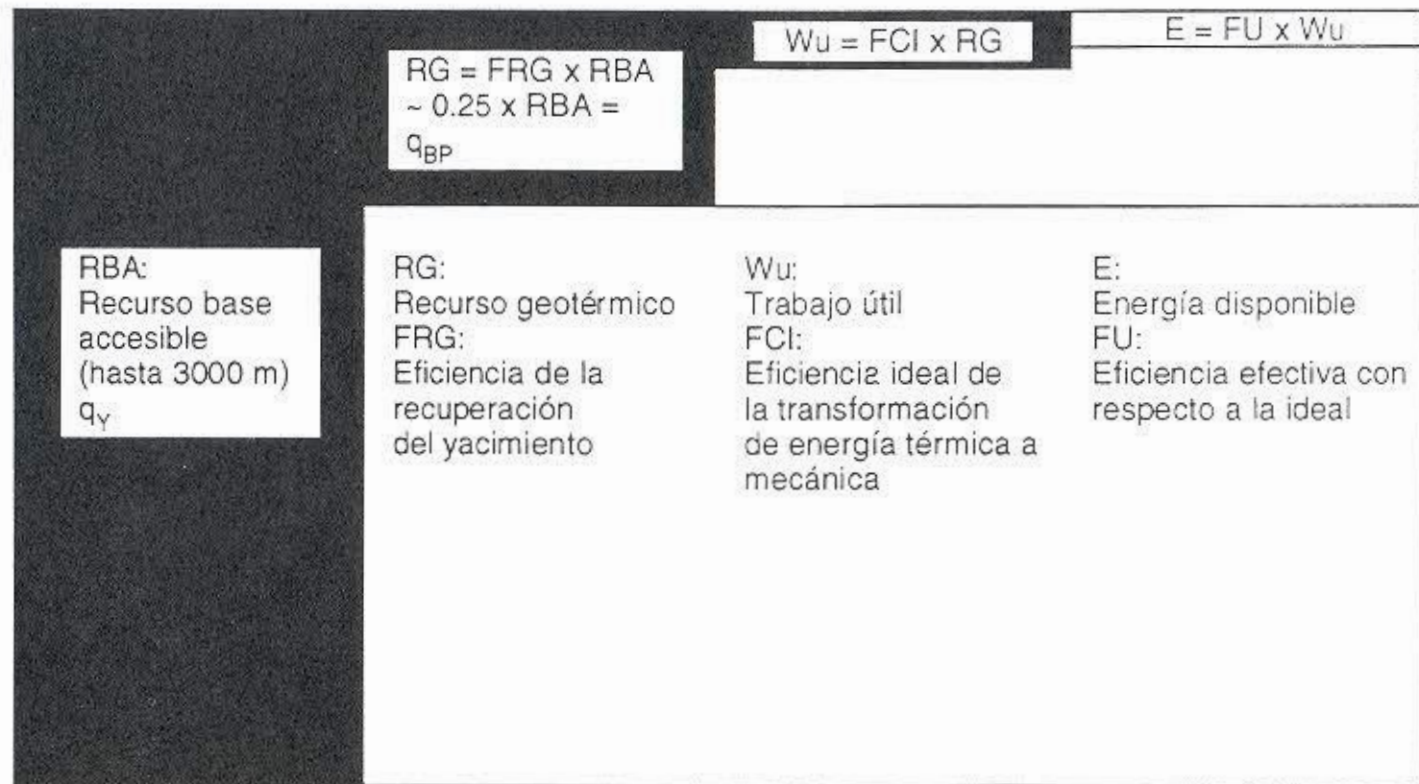


Figura No. 7

Proceso global de evaluación del potencial energético (de Paolo Liguori, com. pers., 1993).



Organización Latinoamericana de Energía
Latin American Energy Organization