

Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG)

Diplomado de especialización en geotermia-2015

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Unidad de Postgrados

La Geo



METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO CONCEPTUAL A PARTIR DE DATOS GEOLÓGICOS, GEOFÍSICOS Y GEOQUÍMICOS EN LA FASE DE RECONOCIMIENTO Y PREFACTIBILIDAD DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO

Presentado por:

Yeimy Carolina Coronado Triviño
(Colombia)

Ana Melva Garciadiego Martínez
(México)

Asesor: Arturo Quezada Muñoz

30 de octubre 2015

Tabla de contenido.

Tabla de contenido.....	1
1. Resumen.....	4
2. Introducción.....	4
3. Planteamiento del problema.....	5
4. Justificación del estudio.....	5
5. Objetivos.....	6
Objetivo General.....	6
Objetivos específicos.....	6
6. Metodología.....	6
7. Antecedentes.....	7
7.1 Guías y métodos en la exploración geotérmica.....	7
7.2 Etapa de un proyecto geotérmico según OLADE.....	7
7.3 Desarrollo de un proyecto geotérmico tipo de acuerdo a OLADE.....	9
8. Marco teórico.....	13
8.1 Características generales de campos geotérmicos.....	13
8.2 Clasificación de los sistemas geotérmicos.....	17
9. Resultados.....	18
9.1 Fase de reconocimiento y exploración de un proyecto geotérmico.....	18
9.2 Exploración geológica.....	19
9.3 Actividades y alcances de la geología en etapas de reconocimiento y prefactibilidad.....	20
9.4 Geología en fase de reconocimiento geotérmico.....	20
9.4.1 Recopilación bibliográfica.....	20
9.4.2 Exploración geológica regional.....	21
9.4.3 Reconocimiento de campo.....	21
9.4.4 Trabajo de laboratorio.....	21
9.5 Geología en la fase de prefactibilidad.....	22
9.5.1 Estudio geológico a detalle.....	22
9.6 Integración de datos e interpretaciones.....	26
9.7 Elaboración de modelo geológico conceptual preliminar.....	27
9.8 Modelo geológico conceptual después de la perforación de pozos exploratorios.....	29
9.9 Exploración geoquímica.....	30
9.9.1 Origen de los fluidos geotérmicos y estudios geoquímicos de exploración..	30
9.9.2 Geotermómetros e isotopos.....	35

9.9.3 Modelado de mezclas	37
9.9.4 Aplicación de nuevas tecnologías en las etapas de un modelo geoquímico	38
9.10 Utilización de software para modelización geoquímica.....	40
9.11 Modelo geoquímico conceptual preliminar.....	41
9.12 Actualización del modelo conceptual geoquímico.	42
9.13 Exploración geofísica.....	43
9.13.1 Métodos geofísicos en la etapa de reconocimiento y/o exploración.....	44
9.13.2 Gravimetría y magnetometría.....	45
9.13.4 Magnetotelúrica y audiomagnetotelúrica.....	47
9.13.2 Método TDEM (Time domain electromagnetic).....	50
9.14 Técnicas de integración de datos para selección de áreas favorables para la explotación y/o elaboración de modelo conceptual integrado.	51
9.14.1 Método TDEM (Método de integración de datos por superposición de capas (Noorollahi et.al (2008)).....	51
9.14.2 Método de integración de datos booleano (Noorollahi et.al (2008)).....	52
9.15 Modelo conceptual integrado.....	54
10. Conclusiones.....	57
11. Recomendaciones.....	57
12. Agradecimientos	57
13. Referencias bibliográficas	58
14. Anexos	60

Tabla de Figuras

Figura 1. Etapas en la ejecución de un proyecto Geotérmico, OLADE, 1994.....	8
Figura 2. Partes de la ejecución de un proyecto Geotérmico Tipo, OLADE, 1994.....	8
Figura 3. Fases de un estudio de reconocimiento, OLADE, 1994.	10
Figura 4. Procesos de exploración y desarrollo Geotérmico, IGA, 2014.....	11
Figura 5. Procesos de desarrollo de proyectos geotérmicos, IGA, 2014.	13
Figura 6. Mapa mundial de los límites de placas tectónicas, tomado de servicio geológico (USGS).	14
Figura 7. Esquema de un sistema geotérmico ideal, tomado de Dickson y Fanelli, 2004.....	15
Figura 8. Esquema de un área geotérmica de alta temperatura en una caldera, campo geotérmico Nesjavellir, Islandia. Orkuveita Reykjavíkur (2005).....	16
Figura 9. Esquema de un área geotérmica de baja temperatura en una caldera, campo geotérmico Nesjavellir, Islandia. Orkuveita Reykjavíkur (2005).....	16
Figura 10. Modelo de un campo de alta temperatura dentro de un sistema de cordillera (A), Esquema de una cuenca sedimentaria con un yacimiento geotérmico a una profundidad de 2-4 km (B). Tomado de <i>Saemundsson, Axelsson y Steingrímsson 2011</i>	18

Figura 11. Técnicas aplicadas en las etapas de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico.	19
Figura 12. Actividades y alcances de la geología en las etapas de reconocimiento y factibilidad de un proyecto geotérmico (<i>OLADE, 1994</i>).	20
Figura 13. Vista en planta del Modelo vulcanológico del campo volcánico de los Azufres (México), a partir de estudios litoestratigráficos, vulcanológicos y estructurales. (Tomado de Perez et.al 2010).	23
Figura 14. Vista en perfil del Modelo vulcanológico del campo volcánico de los Azufres (México), a partir de estudios litoestratigráficos, vulcanológicos y estructurales. (Tomado de Perez et.al 2010).	24
Figura 14. Mapa geológico del campo geotérmico Sabalan en Irán (Tomado de Noorollahi et.al (2008).	27
Figura 15. Modelo conceptual geológico preliminar (Tomado de guías de estudio diplomado de especialización en geotermia – Modelo geológico conceptual 2015).	29
Figura 16. Modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Krafla, Iceland. (2009). Recuperado de Short Course on Geothermal Exploration, Los Azufres, Nov, 2014.	30
Figura 17. Esquema de clasificación de sistemas geotérmicos en base al origen de sus fluidos.	31
Figura 18. Características de un sistema geotermal activo.	33
Figura 19. Mapa de manifestaciones termales, GNS Science, New Zealand, IFC-IGA, 2014.	33
Figura 20. Tipos de aguas naturales su origen y la información obtenible, OLADE, 2014.	35
Figura 21. (A) Equipo de Radón (^{222}Rn); (B) equipo de Torón (^{220}Rn); (C) equipo de vapor de Mercurio, (D) analizador de ácido sulfhídrico; (E) toma de muestras para concentración de gases.	40
Figura 22. Criterios geoquímicos para la elaboración de un modelo conceptual preliminar.	41
Figura 23. Henley y Ellis (1983). Modelo conceptual de un volcán andesítico,	42
Figura 24. Modelo conceptual geoquímico. Recuperado de curso de exploración geoquímica, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.	43
Figura 25. Propiedades físicas medidas en el subsuelo.	44
Figura 26. Modelo de despliegue del equipo V8 – 6R en campo (modificado de Phoenix Geophysics 2006).	49
Figura 27. Modelo geofísico de resistividades obtenido.	49
Figura 28. Modelo de despliegue del equipo V8 – 6R en campo para técnica TDEM.	51
Figura 29. Esquema de representación del modelo de integración de datos por superposición de capas. (Modificado de <i>Noorollahi et.al 2008</i>).	52
Figura 30. Ejemplo de implementación del método de integración de datos por superposición de capas aplicado en el campo geotérmico de Sicilia en Italia. (Modificado de <i>Trumpy et. al 2015</i>).	52
Figura 31. Diagrama de flujo de integración Booleana, que implica la combinación lógica de mapas binarios y se aplica el condicional “Y” e “O” para encontrar el área más favorable (Modificado de <i>Noorollahi et.al 2008</i>).	54
Figura 32. Esquema de elaboración de un modelo conceptual integrado.	55
Figura 33. Aspectos geocientíficos que aportan las disciplinas de geología, geofísica y geoquímica al modelo conceptual integrado.	56
Figura 34. Modelo conceptual integrado de un campo geotérmico.	56

1. Resumen

Se presenta una metodología para la elaboración de un modelo conceptual integrado haciendo uso de las diferentes técnicas y métodos de las disciplinas de geología, geoquímica y geofísica utilizando como base las diferentes guías que se han elaborado para el desarrollo de las etapas de reconocimiento y prefactibilidad en proyectos geotérmicos y complementando esta información con los conocimientos académicos y profesionales de cada una de sus autoras, y con resultados de estudios investigativos recientes, que revelan nuevas tecnologías y métodos de trabajo que se pueden implementar en las primeras etapas de un proyecto geotérmico.

La elaboración de modelos conceptuales preliminares sirve como base para determinar la localización y objetivos de perforación de pozos exploratorios, lo cual se constituiría como una segunda etapa de la fase de exploración, una vez se obtienen resultados de litología y temperatura de pozos exploratorios se correlaciona esta información con el modelo preliminar para darle mayor validez.

2. Introducción

El presente trabajo aborda temas relacionados con aspectos metodológicos que apoyan estudios de reconocimiento y prefactibilidad, a las etapas iniciales de un proyecto geotérmico, así como la actualización de un modelo conceptual en áreas geotérmicas ya exploradas, utilizando herramientas valiosas como es la exploración geológica que nos permite conocer el marco geológico regional y local de la zona de interés, realizando la cartografía a detalle, seleccionando las áreas con mayor potencial geotérmico, utilizando la geología estructural regional para entender los rasgos estructurales a menor escala y analizar los sistemas que rigen el comportamiento de la zona con potencial geotérmico en superficie y en subsuelo, así como cartografiar las zonas de manifestaciones termales lo cual proporciona información cualitativa sobre la extensión del sistema hidrotermal.

El análisis geoquímico de las aguas y gases de las manifestaciones hidrotermales y la determinación de geotermómetros ayuda a estimar la temperatura en el subsuelo del posible reservorio geotérmico.

La importancia de la geofísica en el reconocimiento de un proyecto geotérmico es esencial ya que nos permite caracterizar zonas en donde se presentan anomalías en las propiedades físicas del subsuelo tales como conductividad eléctrica, propiedades elásticas, densidad y susceptibilidad magnética, las cuales pueden observarse mediante las diferentes técnicas geofísicas empleadas y podrían estar relacionadas a elementos importantes de un sistema geotérmico tales como: capa sello, fuente de calor, reservorio, patrón de flujo, límites del sistema etc.

Utilizando en la fase de prefactibilidad las diferentes técnicas de las disciplinas de geología, geoquímica y geofísica, se pueden tener herramientas para realizar una interpretación integrada del área de interés y así estimar el potencial energético en áreas nuevas, y la elaboración de un modelo geotérmico conceptual, que sirva de

apoyo para el inicio de la planificación, organización y la toma de decisiones para la elaboración de un programa de perforación de pozos exploratorios para la comprobación de la existencia del recurso.

Para áreas donde el potencial ya es comprobado por medio de estas técnicas, el modelo conceptual debe ser actualizado, para conocer los límites y posibles zonas de expansión de la reserva geotérmica, para un mejor aprovechamiento y administración que permita su explotación a largo plazo de una manera sustentable.

3. Planteamiento del problema

Actualmente existen una serie de guías metodológicas y trabajos de investigación enfocados en la exploración de recursos geotérmicos, entre los más reconocidos se encuentran la guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos publicada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) en 1994, también se encuentra información más reciente como la guía de buenas prácticas de exploración geotérmica “Geothermal exploration best practices: A guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects” elaborada por la Asociación Internacional de Geotermia (International Geothermal Association (IGA)) en el 2014. Estas guías constituyen una buena fuente de información en cuanto al desarrollo de proyectos geotérmicos desde sus primeras etapas, sin embargo, los métodos usados deben ser complementados con técnicas recientes que mejoren y conjunten de una manera oportuna los estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmico, que disminuyan el riesgo durante la etapa de perforación exploratoria y que las posibilidades de desarrollo geotérmico en las primeras etapas sea viable desde un punto de vista técnico-económico.

Es importante mencionar que este trabajo solo es de índole metodológico, donde se analizan las guías existentes, integrando nuevos criterios que permiten una integración de resultados más compleja para la elaboración de un modelo conceptual integrado, complementando las metodologías con nuevas herramientas tecnológicas que facilitan el estudio de reconocimiento para la etapa de prefactibilidad de un proyecto geotérmico.

4. Justificación del estudio

La energía geotérmica ha crecido a un 16% (por capacidad instalada) en los últimos cinco años, y la potencia instalada para uso directo se ha incrementado en un 45%, a nivel mundial, y se predice para los próximos años un incremento importante en la capacidad instalada en el mundo, y en consecuencia de la generación y aporte de la energía eléctrica. Se considera que casi 40 países en todo el mundo poseen suficiente potencial geotérmico que podría desde una perspectiva económica satisfacer la demanda de electricidad.

En una pequeña escala geotérmica estos recursos son capaces de resolver numerosos problemas locales y de elevar el nivel de vida de pequeñas comunidades aisladas, por lo cual es necesario promover el desarrollo y aprovechamiento de este tipo de energía, con este proyecto se pretende proporcionar una guía para la elaboración de un modelo conceptual que permita estimar el potencial energético y que sirva de apoyo para el inicio de la planificación, organización y toma de decisiones en la elaboración de un programa de perforación de pozos exploratorios para la comprobación de la existencia del recurso, principalmente en los países en los que existe la probabilidad de explotar económicamente la geotermia debido a sus condiciones geológicas favorables, y aún no se ha llevado a cabo la exploración.

Este trabajo pretende hacer una complementación a las guías de exploración geotérmica ya existentes, incorporando resultados personales de experiencia profesional y académica, y de investigaciones recientes que aportan nuevas herramientas de trabajo en las primeras etapas de desarrollo de un proyecto geotérmico, y de esta manera generar un aporte que sirva como base para la generación de un esquema de trabajo en las áreas en las que aún no se ha realizado exploración geotérmica.

5. Objetivos

Objetivo General

Realizar una guía metodológica para la elaboración de un modelo conceptual en las fases de reconocimiento y prefactibilidad para el aprovechamiento de recursos geotérmicos mediante técnicas geológicas, geofísicas y geoquímicas, integrando la información de las diferentes guías ya existentes y complementando esta información con el conocimiento profesional y académico adquirido, e incluyendo estudios recientes que involucren el uso de nuevas tecnologías y métodos que se puedan implementar en las primeras etapas de desarrollo de un proyecto geotérmico.

Objetivos específicos

- Integrar la información más útil y pertinente de cada uno de los documentos consultados, y complementarla con conocimientos académicos y profesionales adquiridos.
- Describir cada uno de los métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos que se llevan a cabo durante las etapas de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico.
- Investigar la implementación de nuevas tecnologías y métodos que no estén incluidos en las guías metodológicas existentes, y aplicables en las fases de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico.

6. Metodología

La metodología usada para la elaboración de este documento se basó inicialmente en una búsqueda bibliográfica en donde se recolectaron los principales documentos

existentes referidos a guías y procedimientos llevados a cabo durante las primeras etapas de un proyecto geotérmico, se identificaron las ideas principales de cada fuente consultada y se integraron en un mismo documento, posteriormente se consultaron diferentes fuentes bibliográficas relacionadas con información actualizada de nuevos métodos y tecnologías llevadas a cabo en etapas de reconocimiento y prefactibilidad, con el objetivo de complementar y actualizar la información de las guías metodológicas ya existentes.

7. Antecedentes

7.1 Guías y métodos en la exploración geotérmica

En la actualidad se han elaborado una serie de guías que sirven como instrumento para conocer, analizar e investigar los recursos geotérmicos como una fuente alterna de energía, sin embargo las más completas y que brindan aspectos técnicos muy útiles son:

- ✓ La guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos OLADE, 1994, en esta guía se pueden analizar las diferentes metodologías para las etapas de exploración y explotación para países de América Latina y el Caribe.
- ✓ Guía para la evaluación del potencial energético en zonas geotérmicas durante las etapas previas a la factibilidad, OLADE, 1994, fue un complemento para incrementar el conocimiento de los países sobre recursos geotérmicos, sin embargo el rápido desarrollo tecnológico de la geotermia mostro la necesidad de actualizar estas metodologías.

7.2 Etapa de un proyecto geotérmico según OLADE

De acuerdo a la metodología OLADE la ejecución de un proyecto tipo se divide en dos partes, la primera de alto riesgo o incertidumbre se asocia a la exploración del energético cuyo objetivo es identificar el yacimiento, en esta parte implica notables niveles de riesgo económico, que deben ser enfrentados con inversiones progresivamente crecientes, pero que son relativamente de bajo costo. La segunda parte es de menor riesgo, está relacionada con el desarrollo y explotación del proyecto, implica riesgos menores, pero requiere de inversiones más elevadas (Figura 1).

El estudio de un proyecto geotérmico se divide en dos etapas: exploración y explotación y a su vez en cinco subetapas que se observan en el diagrama (Figura 2).

Las sub etapas de exploración se refieren a la parte exploratoria del proyecto, las etapas de explotación, se basan en la explotación y a la preparación del campo para aprovechar el fluido geotérmico, a la producción del fluido, utilización industrial etc.

Estas etapas de reconocimiento y prefactibilidad son de utilidad para aquellos países que inician su investigación geotérmica en la fase inicial, así como también es de importancia para los países que han adquirido experiencia y cuentan con un campo en explotación, realizar la actualización de los procedimientos que tienen establecidos con base en los criterios que sugieren las guías OLADE.



Figura 1. Etapas en la ejecución de un proyecto Geotérmico, OLADE, 1994.



Figura 2. Partes de la ejecución de un proyecto Geotérmico Tipo, OLADE, 1994.

7.3 Desarrollo de un proyecto geotérmico tipo de acuerdo a OLADE

Conforme a la experiencia adquirida se ha demostrado que las dimensiones de los yacimientos geotérmicos tienen una extensión de entre 10 y 100 km², en América Latina y Caribe los yacimientos se encuentran localizados en las márgenes de las placas litosféricas, especialmente en regiones que se caracterizan por contar con actividad tectónica y magmática con edades recientes (< 1 000 000 Ma), es importante mencionar de que el hecho que un país se encuentre en estas márgenes no garantiza un yacimiento de interés comercial .

Por consiguiente para desarrollar un proyecto geotérmico en una región geológicamente poco estudiada es necesario empezar la actividad exploratoria con un estudio de reconocimiento que cubra un área de aproximadamente 1000 km², los resultados del estudio inicial permitirán formular las primeras hipótesis sobre las posibilidades geotérmicas de la región, para así poder seleccionar las áreas favorables para estudios de prefactibilidad como una segunda etapa del proyecto.

Un estudio de reconocimiento de acuerdo a las guías OLADE, consiste en la evaluación preliminar de los recursos geotérmicos ideales para ser aprovechados con fines de generación eléctrica o en otros usos en una región determinada, delimitando las áreas de mayor interés para así plantear las líneas de acción a seguir en la etapa de prefactibilidad.

Los objetivos principales del estudio de reconocimiento son:

- Evaluar preliminarmente 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 áreas de interés para la ejecución de estudios de prefactibilidad.
- Elaborar un programa de exploración detallado o prefactibilidad para áreas de interés geotérmico.

Tienen el propósito de reunir información técnica que junto con consideraciones socio-económicas y políticas constituyan las bases para toma de decisiones.

Un estudio de reconocimiento a nivel nacional o regional se divide en cuatro fases (ver Figura 3).



Figura 3. Fases de un estudio de reconocimiento, OLADE, 1994.

- ✓ Best practices guide for geothermal exploration, segunda edición, 2014, IGA (International Geothermal Association), el objetivo de esta guía son la promoción, aplicación, desarrollo y la investigación a nivel mundial de la energía geotérmica a través de la celebración de congresos, talleres, para el intercambio de conocimientos y mejores prácticas en la investigación. En la guía se presenta un capítulo que ofrece una visión general de ocho fases para el programa de exploración y desarrollo geotérmico con referencia a diferentes experiencias a nivel mundial (ver Figura 4).



Figura 4. Procesos de exploración y desarrollo Geotérmico, IGA, 2014.

El desarrollo de un proyecto para la extracción de un recurso geotérmico, ha sido realizado de acuerdo a diferentes metodologías y guías que brindan una mejor categorización en cada etapa del proyecto, como las guías de OLADE e IGA, esta última divide el proceso de desarrollo de proyectos geotérmicos en ocho fases relacionadas con las fases del manual de ESMAP (Gehring y Loksha, 2012).

En la primera fase del proceso, las guías de OLADE e IGA se enfocan en la recopilación de información bibliográfica, como son mapas, imágenes satelitales y todo lo referente a la zona de interés.

En la segunda fase la guía de OLADE enfatiza en la evaluación de los datos recopilados para definir un área mediante métodos geoestadísticos, así como realizar nuevos estudios de geohidrología, geología y geoquímica. En esta fase la guía de IGA realiza una recopilación de datos y recolección de nuevas muestras de geología, geoquímica, datos de manantiales y manifestaciones, estudios geofísicos, para reducir la incertidumbre relacionada con estimaciones de parámetros del yacimiento clave como son temperatura profundidad, extensión y permeabilidad, antes de la exploración exploratoria.

En la tercera fase en la guía OLADE, se menciona la integración de información obtenida de campo y laboratorio acompañada con levantamientos geofísicos, para realizar un esquema preliminar, la guía de IGA en esta etapa da inicio a la perforación exploratoria profunda, lo que permite dar información directa del yacimiento y del recurso, realizando de 2 a 3 pozos para contar con más información del yacimiento, en esta fase el riesgo financiero es alto.

La fase cuatro, la guía OLADE, recomienda preparar un programa de estudios señalando los estudios específicos que se realizaran para realizar la etapa de perforación exploratoria. La guía de IGA menciona que el riesgo financiero se reduce

una vez confirmado con la perforación exploratoria el recurso, se prepara el informe de viabilidad para inversión.

Posteriormente la guía de IGA presenta cuatro fases más, las cuales se enfocan al desarrollo del campo mediante la perforación comercial de pozos productores e inyectores, así como la construcción de plantas y la puesta en marcha y operación del campo.

Con el conocimiento adquirido en la extracción del recurso geotérmico se han elaborado manuales que permiten visualizar de forma rápida los aspectos importantes durante la exploración geotérmica, entre los más relevantes son:

- ✓ Manual de Geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad, ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program 2012), este manual está dedicado a la energía geotérmica como una fuente de energía eléctrica para los países en desarrollo que cuentan con gran recurso geotérmico, sin embargo algunos factores han obstaculizado el desarrollo de estos países, estos factores están relacionados principalmente con los altos costos iniciales y el riesgo involucrado en la exploración de recursos geotérmicos, incluida la perforación.

La confirmación del recurso es vital para solicitar el interés del sector privado para construir y operar plantas de energía geotérmica. Este manual está escrito en un esfuerzo para ayudar a los países en desarrollo de todo el mundo en la ampliación de la utilización de la energía geotérmica en sus estrategias de desarrollo del sector eléctrico.

Este manual contempla siete fases de desarrollo de un proyecto geotérmico cada fase del desarrollo del proyecto consiste en varias tareas (ver Figura 5). Después de cada logro, el desarrollador -ya sea una empresa de proyectos o una institución del país- tendrá que decidir si continuar desarrollando el proyecto o no. Las primeras tres fases, o logros, llevan al desarrollador desde los primeros pasos de reconocimiento hasta la exploración del campo hasta las perforaciones de prueba. La primera parte del desarrollo del proyecto (a la que podría llamarse en términos generales la fase de exploración) confirma la existencia, o ausencia, de un yacimiento geotérmico adecuado para la generación de electricidad; usualmente se ve como la parte más riesgosa del desarrollo del proyecto. Si el resultado de las primeras tres fases, incluidas las perforaciones de prueba, es positivo y se confirma el potencial geotérmico, se da inicio a la fase 4 con el diseño real del proyecto de electricidad, lo que incluye el estudio de factibilidad, la ingeniería de los componentes y la finalización de todos los trámites de financiación. Las Fases 5 a 7 abarcan el desarrollo del proyecto en sí, y consisten en la perforación de los pozos geotérmicos de producción, la construcción de tuberías, la construcción de la central eléctrica y la conexión de la central a la red eléctrica.

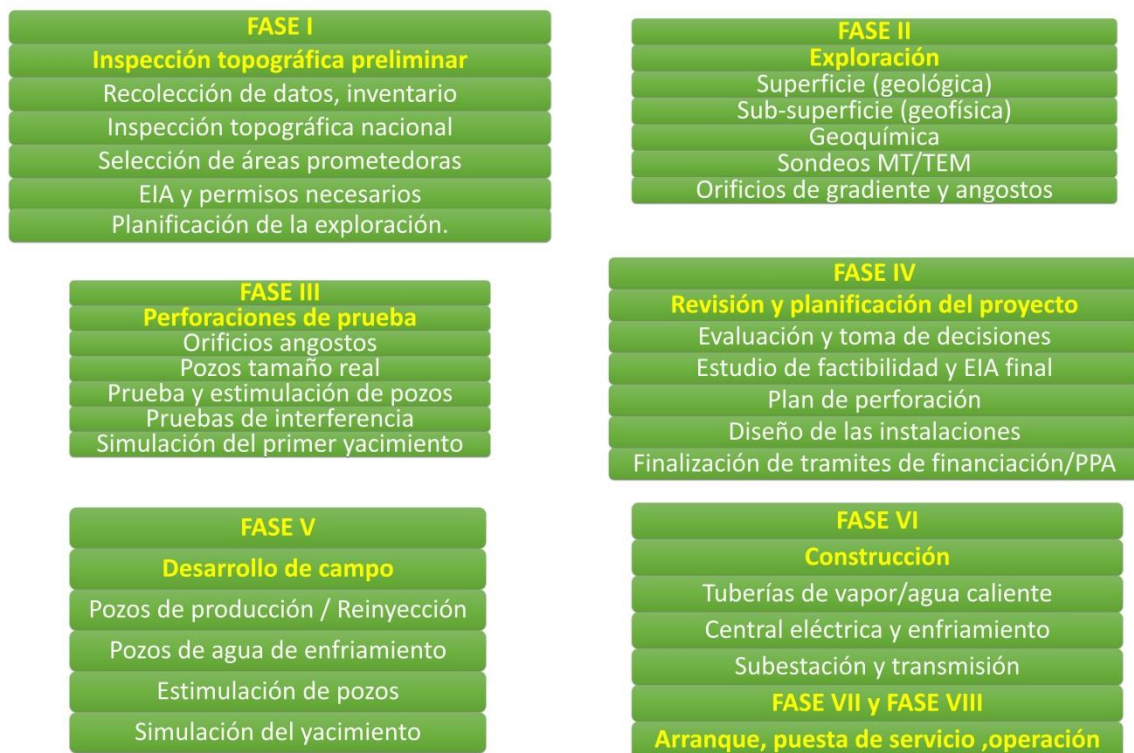


Figura 5. Procesos de desarrollo de proyectos geotérmicos, IGA, 2014.

- ✓ Manual de Geotermia, Quijano León José Luis, 2007, México, el objetivo de este manual es introducir a los profesionales en el tema de la utilización de energía geotérmica para la generación de electricidad, solo se enfoca a las disciplinas de las ciencias de la tierra y de ingeniería de yacimientos, de una forma general en base a los conocimientos adquiridos en la exploración y explotación de los campos geotérmicos de México.

El manual de ESMAP basa sus etapas en la guía de IGA, sin embargo hace uso de otros métodos geocientíficos en la segunda etapa, como son los sondeos geofísicos (MT/TDEM) y adquisición de datos sísmicos.

El manual de geotermia escrito por el ingeniero Quijano, hace uso de la experiencia adquirida en los campos geotérmicos de México desde la exploración hasta el monitoreo del yacimiento después de la perforación comercial, desde el punto de vista geocientífico y de Ingeniería de reservorios.

8. Marco teórico

8.1 Características generales de campos geotérmicos.

Para hablar sobre campos geotérmicos es importante entender el concepto de geotermia, esta palabra viene del griego geo («Tierra»), y thermos («calor»); literalmente «calor de la Tierra» y se refiere al estudio y utilización de la energía calorífica que por conducción a través de la roca se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia la superficie para la formación de yacimientos geotérmicos.

Al conjunto integrado por la fuente de calor, el fluido y la zona cortical donde se almacena el fluido se le llama sistema geotérmico.

Las fuentes generadoras de calor en el interior de la tierra se deben al decaimiento de minerales radioactivos, reacciones químicas, fricción, presión mecánica, 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, lo cual constituyen el mecanismo más importante en el cual se asocian genéticamente los yacimientos geotérmicos.

La energía almacenada en forma de calor en las rocas y en acuíferos situados cerca de la superficie, es susceptible a ser aprovechada para la generación de energía eléctrica, así como también para calefacción, refrigeración, agricultura, cuando se llevan a cabo estas actividades en condiciones rentables, el yacimiento y las instalaciones superficiales constituyen lo que se denomina campo geotérmico.

Los mejores campos geotérmicos se encuentran por lo general alrededor de áreas volcánicamente activas que a menudo se encuentran cerca de los límites de las placas tectónicas (ver Figura 6).

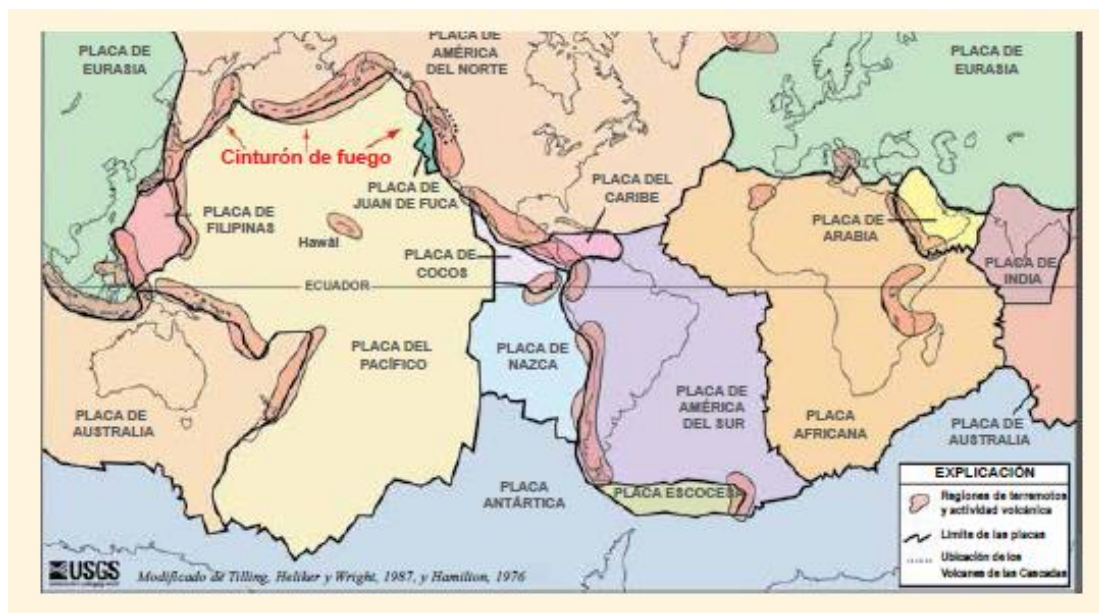


Figura 6. Mapa mundial de los límites de placas tectónicas, tomado de servicio geológico (USGS).

Un campo geotérmico si es aprovechado para generación de energía eléctrica o ya sea para fines de uso directo (baja entalpia), debe presentar ciertas características principales (véase Figuras 7, 8 y 9):

- ✓ Una anomalía térmica o fuente de calor: Puede ser suministrado por un magma de alta temperatura, situada en la corteza terrestre, como una intrusión en proceso de enfriamiento o como una cámara magmática que ha alimentado a un volcán o bien una caldera.
Se deben considerar áreas donde permanecen localmente grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental como magmas

ácidos diferenciados o donde existan manifestaciones volcánicas que indiquen la presencia de cámaras magmáticas, estas áreas son caracterizadas por presentar volcanes poligenéticos, es decir que han hecho erupción más de una vez, cuyos productos volcánicos sean magmas de composición básica-intermedia-acida, así como calderas y complejos dómicos, de composición acida.

- ✓ Un yacimiento conformado por rocas permeables, que permitan el ascenso de fluido desde el subsuelo a la superficie y que sea económicamente explotable.
- ✓ Es importante una barrera impermeable en el yacimiento que impida la pérdida de calor por circulación del fluido geotérmico hacia la superficie, es decir una capa sello.

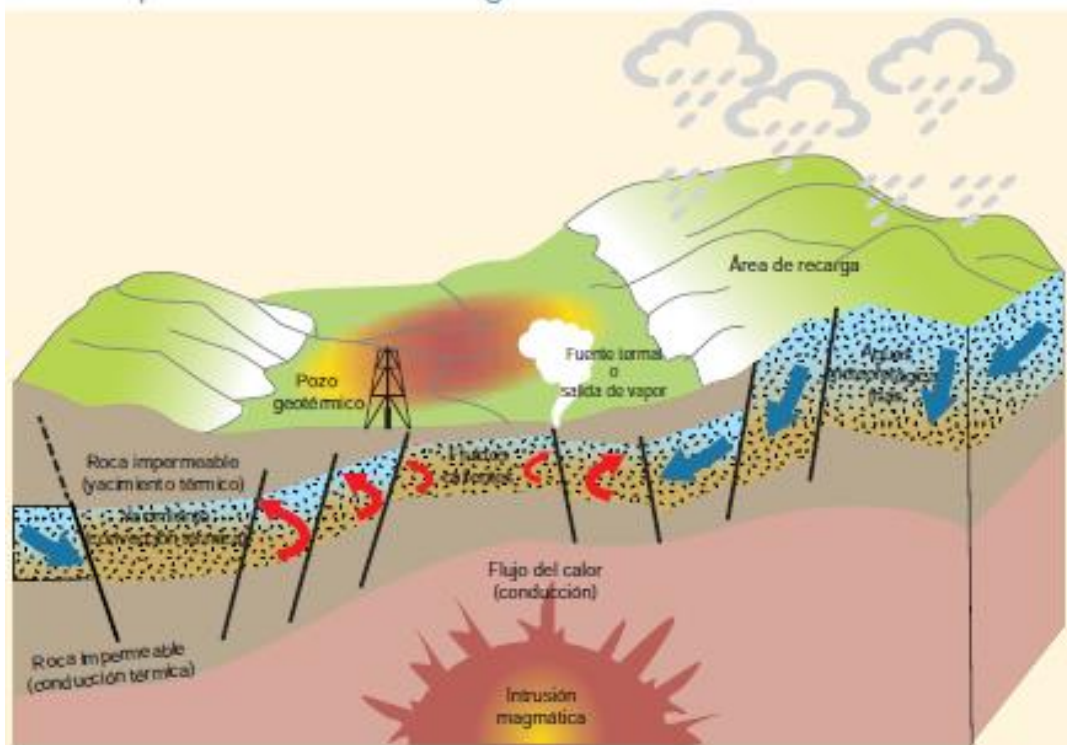


Figura 7. Esquema de un sistema geotérmico ideal, tomado de Dickson y Fanelli, 2004.

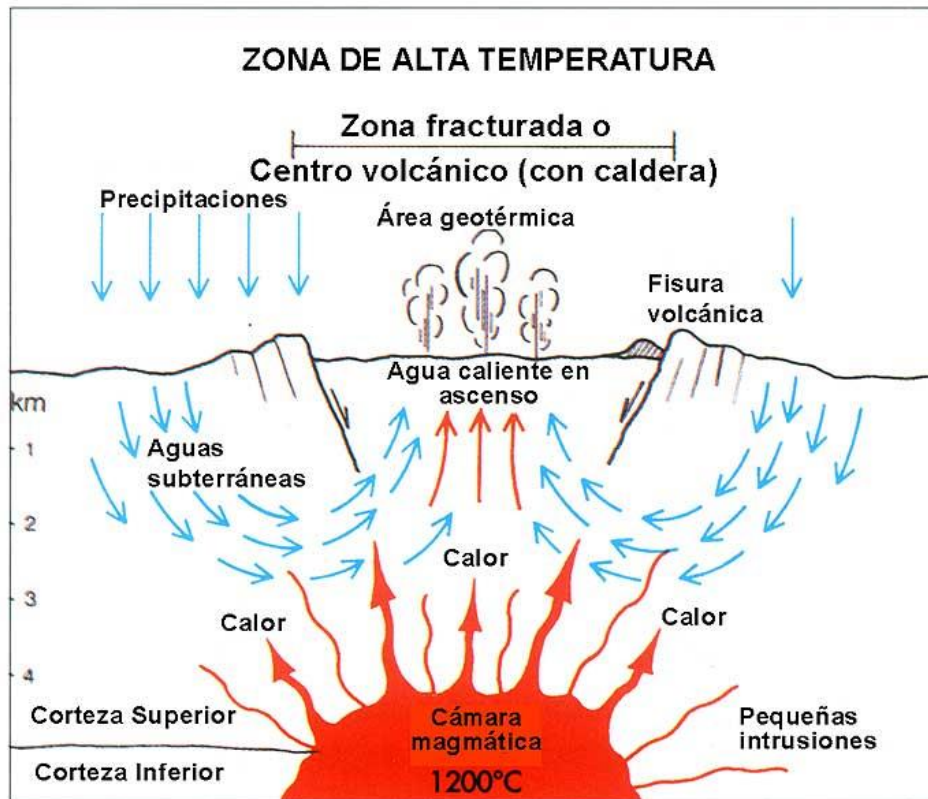


Figura 8. Esquema de un área geotérmica de alta temperatura en una caldera, campo geotérmico Nesjavellir, Islandia. Orkuveita Reykjavíkur (2005).

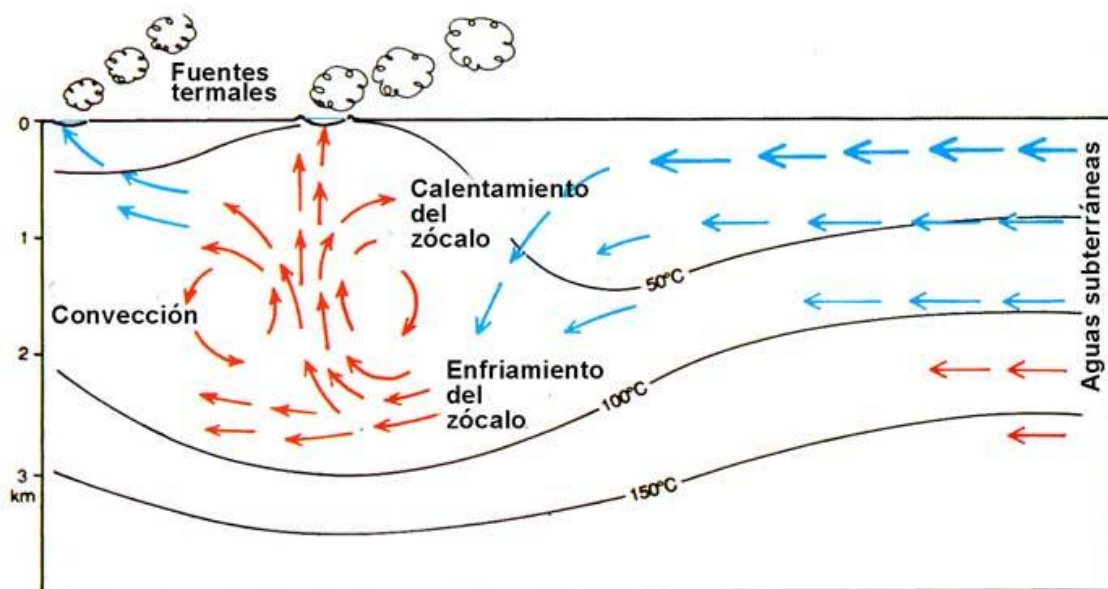


Figura 9. Esquema de un área geotérmica de baja temperatura en una caldera, campo geotérmico Nesjavellir, Islandia. Orkuveita Reykjavíkur (2005).

8.2 Clasificación de los sistemas geotérmicos

Como ya se ha mencionado anteriormente se requieren ciertas características para que un campo geotérmico sea aprovechado, es primordial conocer la naturaleza del recurso geotérmico de acuerdo con la fuente de calor, para ello se han clasificado los recursos geotérmicos con base a:

1. Tipo de transferencia de calor
2. Temperatura del yacimiento
3. Estado físico
4. Utilización y escenario geológico

Cuando se les define de acuerdo con la naturaleza del sistema geológico del que se originan (ver Figura 10), se categorizan de acuerdo con experiencias de algunos autores (**Saemundsson, Axelsson y Steingrímsson 2011**).

- **Sistemas geotérmicos volcánicos** están asociados a la actividad volcánica. La fuente de calor para tales sistemas son las intrusiones calientes o el magma. Con mayor frecuencia se les sitúa dentro o cerca de complejos volcánicos, tales como calderas, la mayoría en los límites de las placas pero algunas en áreas de zonas calientes. En los sistemas volcánicos, son principalmente fracturas permeables y zonas de fallas las que controlan el flujo de agua.
- **Sistemas convectivos de fracturas controladas** la fuente de calor es la corteza caliente a profundidad en las áreas tectónicamente activas, con flujo de calor por encima del promedio (> 30 °C/km). Aquí el agua geotérmica ha circulado hasta una profundidad considerable (> 1 km), la mayoría a través de fracturas verticales, para “cosechar” el calor de las rocas.
- **Sistemas geotérmicos sedimentarios** se encuentran en muchas de las principales cuencas sedimentarias del mundo. Estos sistemas le deben su existencia a la formación de capas sedimentarias permeables a grandes profundidades (> 1 km) y gradientes geotérmicos arriba del promedio (> 30 °C/km). Estos sistemas son conductivos en naturaleza más bien que convectivos, aun cuando las fracturas y fallas desempeñen un papel en algunos casos. Algunos sistemas convectivos (tal como sistemas convectivos de fracturas controladas) pueden, sin embargo, estar arraigados en rocas sedimentarias.
- **Sistemas geopresurizados** son análogos a yacimientos de petróleo y gas geopresurizados en los que el fluido atrapado en trampas estratigráficas puede tener presiones cercanas a los valores litostáticos. Tales sistemas son por lo general bastante profundos.
- **Sistemas geotérmicos de roca seca caliente (HDR)** o mejorados (con diseño de ingeniería) (EGS) consisten en volúmenes de roca que se han calentado mediante volcanismo o flujo de calor.

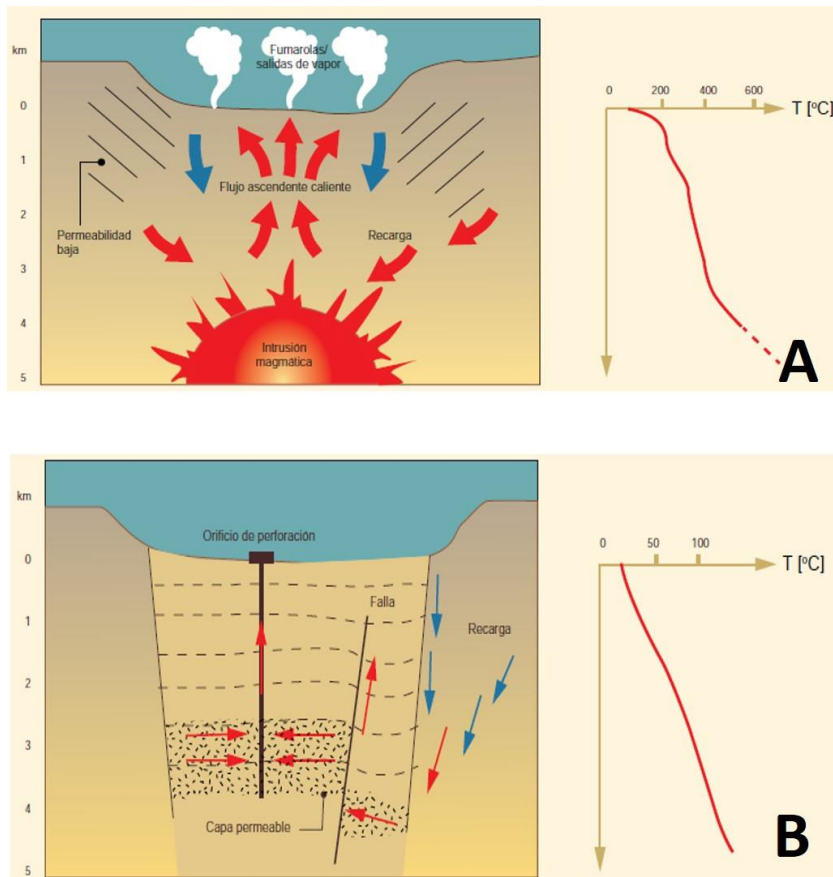


Figura 10. Modelo de un campo de alta temperatura dentro de un sistema de cordillera (A), Esquema de una cuenca sedimentaria con un yacimiento geotérmico a una profundidad de 2-4 km (B). Tomado de Saemundsson, Axelsson y Steingrímsson 2011.

9. Resultados

9.1 Fase de reconocimiento y exploración de un proyecto geotérmico

El objetivo principal durante la exploración de un campo geotérmico, está enfocado en la definición y caracterización de parámetros tales como: forma y estructura del sistema, temperatura, patrón de flujo, tipo de fluido, composición química y estimación del potencial para producción de energía, estos parámetros se determinan a partir de métodos de exploración superficial en la fase de prefactibilidad del proyecto.

La exploración superficial se realiza en la fase inicial de un proyecto geotérmico con el objetivo de investigar detalladamente el área de estudio y así establecer áreas más pequeñas con mayor probabilidad de existencia de recurso, ya que de esta manera se disminuye el riesgo de perforar pozos fallidos, esto sumado al hecho de que la exploración superficial es menos costosa que la perforación influye en que se acostumbre a realizar detalladamente antes de decidir perforar pozos exploratorios.

La planeación y desarrollo de cada una de las etapas, así como los métodos que se implementan, varían en cada proyecto dependiendo de las características topográficas, geológicas, sociales y políticas del campo en estudio, además de estar sujetas al presupuesto disponible.

La etapa de exploración inicia con una recopilación bibliográfica de toda la información disponible en cuanto a estudios geocientíficos anteriores y caracterización del área de estudio, cuando estos datos son integrados y analizados e indican un panorama exitoso en cuanto a la probabilidad de existencia de un campo geotérmico económicamente explotable, se inician los estudios de exploración superficial que incluyen información geológica, geofísica y geoquímica, estos datos son integrados y analizados utilizando diferentes métodos que permitan correlacionar esta información y de esta manera elaborar los modelos conceptuales preliminares y estimar el potencial del campo.

La elaboración de modelos conceptuales preliminares sirve como base para determinar la localización de pozos exploratorios, lo cual se constituiría como una segunda etapa de la fase de exploración, una vez se obtienen resultados de litología y temperatura de pozos exploratorios, se correlaciona esta información con el modelo preliminar para darle validez. En la Figura 11 se muestra un esquema en donde se relacionan diferentes técnicas llevadas a cabo por cada disciplina en las primeras etapas de un proyecto geotérmico.

Disciplina	RECONOCIMIENTO	PREFACTIBILIDAD
Geología	<ul style="list-style-type: none"> Recopilación bibliográfica Exploración geológica regional Trabajo de laboratorio: petrografía y dataciones para estudio vulcanológico regional 	<ul style="list-style-type: none"> Levantamiento estratigráfico Estudio vulcanológico Cartografía a detalle Laboratorio: Estudios petrográficos, química de rocas, análisis DRX y dataciones Estudio estructural a detalle
Geoquímica	<ul style="list-style-type: none"> Mapeo de las manifestaciones superficiales Medición de flujo de temperatura geotermómetros 	<ul style="list-style-type: none"> Complementación del mapeo de fuentes termales Trabajo de laboratorio: geotermometría, modelado de mezclas, hidrología isotópica.
Geofísica	<ul style="list-style-type: none"> Recopilación bibliográfica Gravimetría a nivel regional Sondeos eléctricos verticales 	<ul style="list-style-type: none"> Gravimetría Magnetometría Magnetotelúrica TDEM

Figura 11. Técnicas aplicadas en las etapas de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico.

9.2 Exploración geológica

Habitualmente los campos geotérmicos de alta temperatura, se encuentran situados en zonas tectónicamente activas que presentan eventos volcánicos recientes, debido a esto las áreas en donde se presentan estas características son las más favorables para iniciar con los estudios de reconocimiento.

La exploración geológica se realiza con el objetivo de identificar y clasificar áreas geológicamente adecuadas para ser explotadas con fines geotérmicos a partir de una evaluación preliminar detallada de las características geológicas del campo.

9.3 Actividades y alcances de la geología en etapas de reconocimiento y prefactibilidad.

Las actividades y alcances de los estudios geológicos en las etapas de reconocimiento y prefactibilidad se describen en la Figura 12.

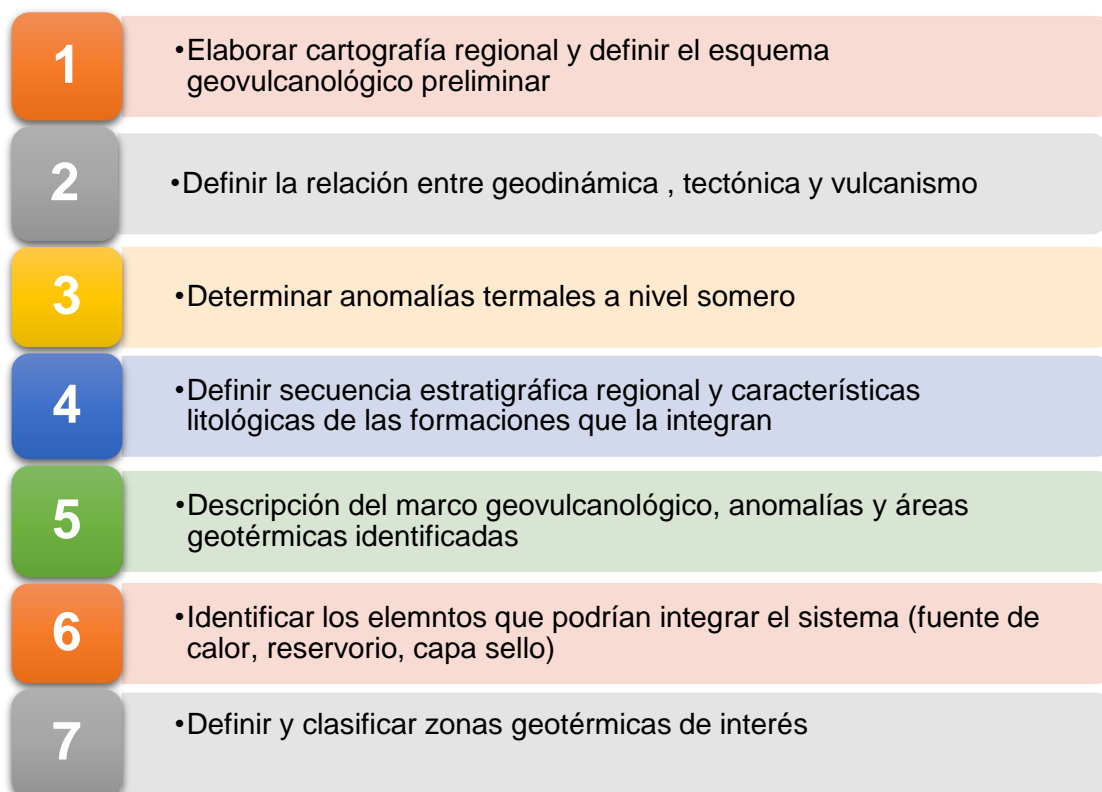


Figura 12. Actividades y alcances de la geología en las etapas de reconocimiento y factibilidad de un proyecto geotérmico (OLADE, 1994).

9.4 Geología en fase de reconocimiento geotérmico.

Durante la fase de reconocimiento, la geología es el eje fundamental de estudio, ya que a partir de la interpretación geológica se establecen las áreas más promisorias en donde se llevarán a cabo estudios de exploración geofísica y geoquímica, esto debido a que en la fase de reconocimiento, por lo general los recursos económicos no permiten desarrollar estudios geofísicos por su alto costo (OLADE, 1994).

9.4.1 Recopilación bibliográfica.

La fase de exploración geológica inicia con la recopilación y síntesis de información topográfica, geológica, hidrológica, geoquímica y geofísica disponible, en esta etapa se analizan los mapas existentes, imágenes satelitales, fotografías aéreas y publicaciones científicas, esta información es recopilada de manera sistemática para

la elaboración de un modelo geológico preliminar, y un mapa en el que se da prioridad a determinadas zonas que presentan características adecuadas para ser estudiadas.

- **Imágenes satelitales y fotografías aéreas:** El uso de fotografías aéreas o imágenes satelitales, dependerá de área que se desee explorar y del costo, ya que las dos se usan para el mismo fin, el cual es obtener información superficial del terreno para la elaboración de planos geológicos preliminares que sirvan como base para la elaboración de modelos digitales de elevación y campañas de exploración.

Las fotografías aéreas son las más costosas, y ofrecen una mejor resolución y detalle, mientras que las imágenes satelitales son más baratas y abarcan grandes extensiones de terreno, las principales tecnologías que incluyen sensores multispectrales, hiperspectrales, pancromáticos, tecnología LIDAR (Light detection and ranging) y ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometers), a partir de estas tecnologías se obtienen imágenes en diferentes frecuencias del espectro electromagnético, que combinadas entre sí, resaltan diferentes rasgos superficiales, como pueden ser fallas, alineamientos, zonas de alteración hidrotermal. En particular la tecnología ASTER es útil para realizar mapeos de temperatura, emisividad y reflectancia. (Hiriart, 2011).

9.4.2 Exploración geológica regional.

La exploración regional se realiza en un área $\geq 1000\text{km}^2$, en donde el objetivo principal es identificar y localizar las zonas con mayor probabilidad de desarrollo geotérmico, y realizar una descripción del entorno geológico, geoquímico e hidrogeológico del área; en esta etapa los sistemas de información geográfica son una herramienta muy útil para integrar sistemáticamente la información y analizarla.

9.4.3 Reconocimiento de campo.

Una vez se ha elaborado el modelo geológico preliminar, los expertos en geología podrán obtener una interpretación preliminar que les permitirá organizar una campaña de campo con el objetivo de verificar la litología, estructuras regionales, ubicar fuentes termales, recolectar muestras de roca para análisis petrográfico y de datación y realizar un estudio vulcanológico regional.

9.4.4 Trabajo de laboratorio.

Con el fin de obtener una mejor caracterización geológica del área de estudio, se llevan a cabo algunos análisis de laboratorio que incluyen:

- Identificación de minerales indicadores y zonas de alteración hidrotermal, a partir de análisis de láminas delgadas de roca y difracción de rayos x.
- Estudio petrográfico (tipo y clasificación de roca).
- Estudio de química de rocas (elementos mayores, menores y elementos traza)
- Estudio petrológico (naturaleza del magma).
- Análisis químico con microsonda electrónica.
- Dataciones radiométricas.

Una vez terminada la fase de reconocimiento y si se determina que el área estudiada tiene posibilidades para explotación geotérmica, se continúa con la etapa de

exploración propiamente dicha, en la cual se debe preparar un mapa geológico a detalle del prospecto geotérmico seleccionado y de las áreas circundantes. Este mapa debe incluir las manifestaciones superficiales y los rasgos geológicos (fallas, fracturas, distribución superficial y a profundidad de los diferentes tipos de rocas y su permeabilidad) que puedan contribuir a elaborar un modelo del sistema geotérmico y recomendar la localización de los pozos exploratorios.

9.5 Geología en la fase de prefactibilidad.

Durante la fase de prefactibilidad de un proyecto geotérmico, el objetivo de la geología es definir con mayor detalle las características litológicas, vulcanológicas y estructurales del área estudiada en la etapa de reconocimiento. (OLADE, 1994)

Debido al mayor rigor y detalle con que se debe elaborar el modelo conceptual en la fase de prefactibilidad, la contribución geológica en esta etapa debe estar enfocada en los siguientes propósitos:

- Definir la fuente de calor, edad, extensión y profundidad.
- Estimar gradiente de temperatura del subsuelo.
- Definir las posibles geometrías de las formaciones del subsuelo, determinando extensión, espesor y permeabilidad.
- Definir las características litológicas del posible yacimiento y capa sello.
- Determinar la recarga del sistema.

9.5.1 Estudio geológico a detalle.

9.5.1.1 Trabajo de campo: levantamiento estratigráfico

Este tipo de levantamientos se realizan con el objetivo de conocer detalladamente la estratigrafía de las principales unidades litológicas identificadas en la fase de reconocimiento, el estudio de estas unidades puede dar un mejor entendimiento de la evolución geodinámica de la zona de estudio.

Una vez se identifiquen los límites entre las unidades se realiza una investigación de la litología cuyo grado de detalle será proporcional a la importancia geotérmica de cada unidad, por lo cual las unidades que puedan estar relacionadas con los principales elementos de un sistema geotérmico como: fuente de calor, reservorio y capa sello requerirán de un alto detalle de investigación.

El estudio estratigráfico además pretende contribuir al estudio geotérmico final con la correlación, delimitación y asignación de tiempo de unidades geológicas.

9.5.1.2 Estudio vulcanológico

El estudio vulcanológico se lleva a cabo en zonas geotérmicas con fuente de calor asociada a la presencia de volcanes con el objetivo de obtener información más detallada acerca de esta fuente, y de evaluar el riesgo volcánico en el área de estudio. Este estudio está constituido por la historia, evolución volcánica y origen del magma del área a partir del análisis estratigráfico, en este caso el grado de detalle es mayor

en las unidades litológicas más jóvenes asociadas a vulcanismo reciente. En la Figura 13, se muestra el modelo geológico conceptual preliminar del campo geotérmico Los Azufres en México.

El objetivo final de este estudio pretende caracterizar la cámara magmática, su profundidad y geometría.

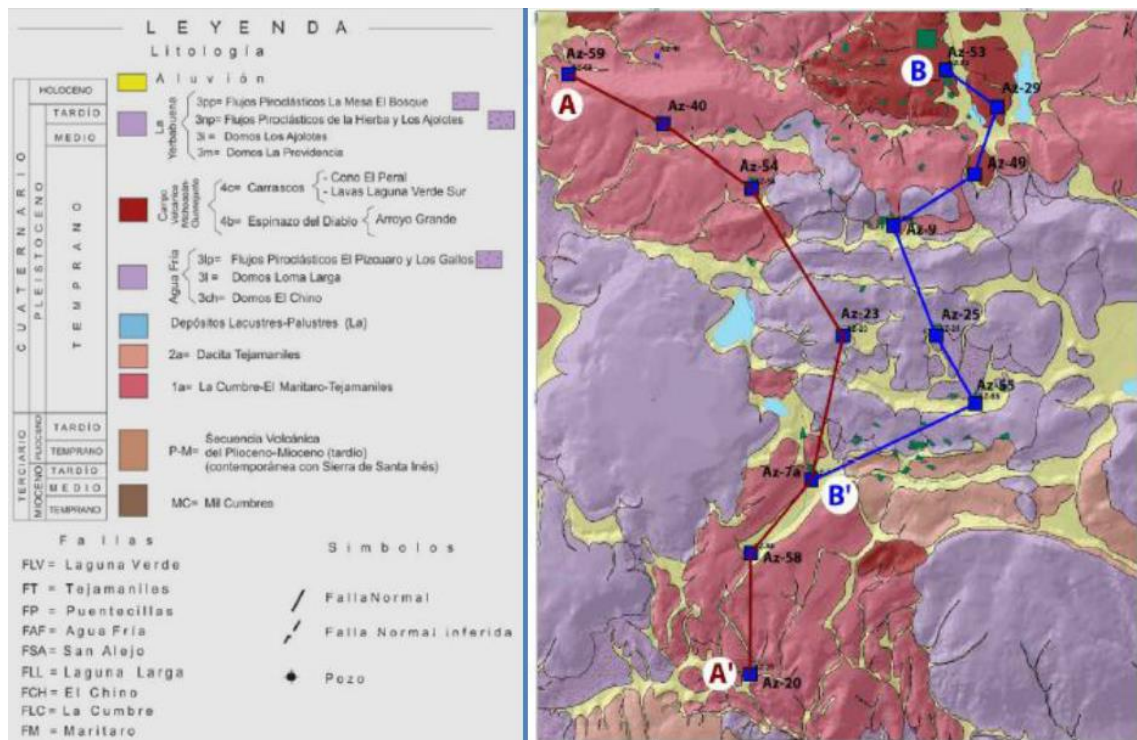


Figura 13. Vista en planta del Modelo vulcanológico del campo volcánico de los Azufres (México), a partir de estudios litoestratigráficos, vulcanológicos y estructurales. (Tomado de Pérez et.al 2010).

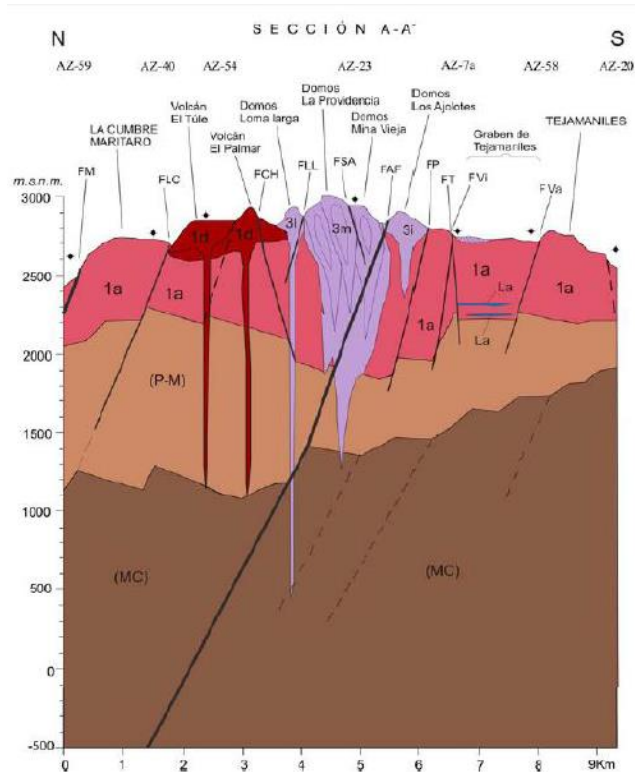


Figura 14. Vista en perfil del Modelo vulcanológico del campo volcánico de los Azufres (México), a partir de estudios litoestratigráficos, vulcanológicos y estructurales. (Tomado de Pérez et.al 2010).

9.5.1.3 Cartografía a detalle

Los resultados obtenidos en el levantamiento de campo deben ser plasmados en un mapa que contenga topografía, litología, interpretaciones de la geometría, contactos y estructuras principales, también se deben representar los principales rasgos estructurales tales como fallas, fracturas, pliegues y orientación de estratos.

9.5.1.4 Estudios petrográficos

Durante los levantamientos en campo, el geólogo encargado deberá tomar muestras de roca debidamente georreferenciadas con el fin de realizar análisis petrográficos, geoquímicos y de dataciones radiométricas, las muestras se recolectarán teniendo en cuenta las características necesarias para realizar los diferentes tipos de análisis, por lo general, las muestras que vayan a ser sometidas a análisis petrográficos deben estar lo menos alteradas posibles.

La cantidad de muestras dependerá del tipo de análisis a realizar, el grado de alteración de las rocas, y el grado de importancia geotérmica que tengan las unidades litológicas muestreadas.

Las dataciones radiométricas se realizan con el objetivo de reconstruir cronológicamente las etapas de evolución vulcanológica, y estimar la edad de los eventos volcánicos eruptivos más recientes.

9.5.1.5 Estudio estructural a detalle

El objetivo principal de un estudio estructural a detalle es establecer la relación entre patrón de flujo hidrotermal y las estructuras principales fallas y fracturas identificadas en un yacimiento geotérmico.

Este estudio abarca la caracterización de los principales sistemas de fallas y fracturas relacionadas al reservorio, y de las que están relacionadas al límite del sistema geotérmico, el análisis de estos estudios puede brindar información relacionada con la permeabilidad del reservorio, la sismicidad y la microtectónica.

De acuerdo con esto, las actividades a realizar dentro de un estudio geológico estructural son:

- Reconocimiento de las principales unidades estructurales regionales definiendo sus límites y tipo de fallas existentes.
- Estudio de megaestructuras identificando geometría, tipo de desplazamiento, y edad, para establecer la actividad cronológica de los diferentes sistemas.
- Estudio meso y microestructural de las fallas.
- 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)

(Tomado de OLADE, 1994).

En estudios de geología estructural es conveniente adoptar un orden: análisis descriptivo, análisis cinemático y análisis dinámico, los métodos usados para realizar este tipo de análisis pueden ser de tres tipos:

- Métodos directos: trabajo de campo y trabajo de gabinete, con el objetivo de observar y representar los elementos geométricos que caracterizan las estructuras primarias y secundarias.
- Métodos indirectos: análisis de sensores remotos (imágenes aéreas), diagrama de rosas, para determinar la orientación de los movimientos que produjeron la deformación.
- Métodos de laboratorio y experimentales: Ensayos de mecánica de rocas, modelos de deformaciones de laboratorio, para interpretar los esfuerzos que producen la deformación, describir la naturaleza de las fuerzas que los generaron, y evaluar las relaciones entre esfuerzo, deformación interna y resistencia de las rocas (*Davis & Reynolds, 1996*).

En cuanto al software más conocido y usado que permitan el análisis y modelado estructural, existen varios paquetes: Stereonet, TectonicsFP, uno un poco más actualizado llamado GeOrient, entre otros.

9.6 Integración de datos e interpretaciones

Los resultados obtenidos de las campañas de campo y estudios de laboratorio son recopilados y analizados para obtener una interpretación geológica que ayude a determinar la existencia, ubicación probable y características de la fuente de calor, existencia de un reservorio de agua, condiciones estratigráficas y estructurales favorables para la recarga del campo geotérmico.

Una vez se obtenga la recopilación de la información geológica, se procede a elaborar mapa y un modelo geológico preliminar.

En la Figura 14 se muestra el ejemplo del mapa geológico del campo geotérmico de Sabalan en Irán después de estudios litoestratigráficos, estructurales y vulcanológicos, en él se observan las principales estructuras asociadas al sistema geotérmico, las principales unidades litológicas y la localización de las fuentes termales en superficie.

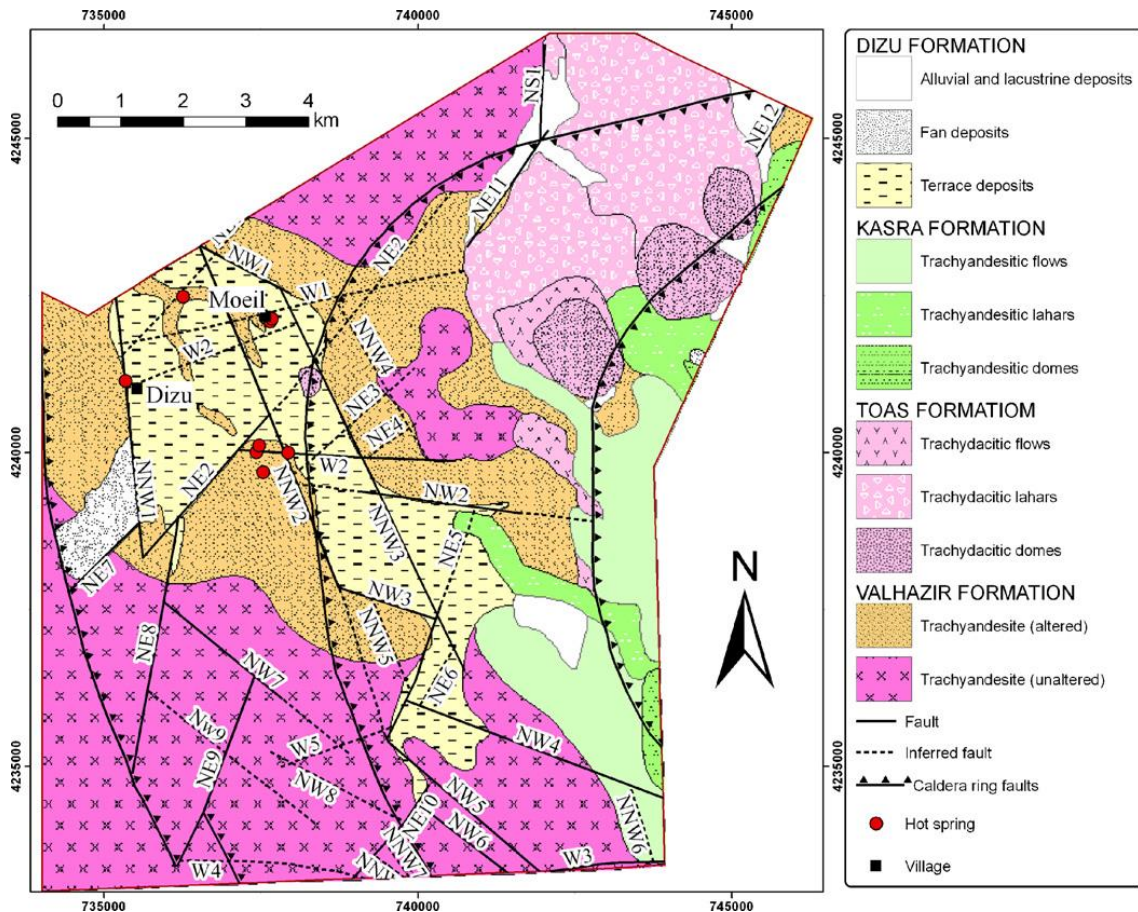


Figura 15. Mapa geológico del campo geotérmico Sabalan en Irán (Tomado de Noorollahi et.al (2008).

- **Sistemas de información geográfica:** Una de las principales ventajas de estos sistemas es su utilidad para integrar toda la información superficial referenciada geográficamente, incluyendo mapas e imágenes (fotografías aéreas e imágenes satelitales). Uno de los softwares más utilizados y comercializados es el ESRI (ArcGIS), el cual permite simplificar el trabajo cartográfico y geoestadístico.

9.7 Elaboración de modelo geológico conceptual preliminar.

Un modelo conceptual es la representación esquemática de los estudios preliminares, las fases de exploración y perforación de prueba de un proyecto, un buen modelo conceptual debe encapsular el marco geológico, definir la fuente de calor y sus características, el calor y las vías de migración del fluido, características y estructura tridimensional del yacimiento cuantificando la extensión del mismo, los ciclos de descarga y recarga del acuífero y características geotérmicas superficiales, todos estos parámetros deben ser compatibles con todos los datos disponibles adquiridos en la exploración.

Un modelo conceptual inicial debe ser desarrollado en las primeras etapas del proyecto geotérmico, este primer modelo será bastante sencillo, sin embargo el modelo debe actualizarse a medida que se vayan encontrando nuevos resultados, al

final de la fase de exploración, el modelo preliminar debe ser lo suficientemente detallado de un modo tal que permita una estimación de la profundidad del reservorio geotérmico, la temperatura y la geometría del sistema para así determinar las áreas en donde se realizará exploración geofísica, cuyos resultados darán validez al modelo geológico preliminar, y posteriormente constituirán la base para la elaboración de un modelo conceptual integrado.

La integración científica de la información generada por los estudios de superficie con la información generada por los pozos de gradiente o propósito múltiple, llevara a la formulación de un modelo conceptual que señale los aspectos fundamentales para la estimación del potencial del recurso con fines energéticos, se deberá describir lo siguiente:

- Un modelo de evolución geo vulcanológico de la zona.
- Columna litológica, que incluya las propiedades petrofísicas (capacidad calorífica, conductividad térmica, porosidad, permeabilidad) de las diversas unidades del yacimiento y de la capa sello.
- Rasgos geológico-estructurales de la zona, particularmente los relacionados con estructuras caldéricas, estratovolcanes y sobre todo los sistemas de fallamiento-fracturamiento importantes que definan el patrón de flujo de fluidos a profundidad.
- La profundidad, límites y posible temperatura del yacimiento.
- EL modelo de flujo subterráneo, ubicación de las zonas de recarga, dirección general de flujo, ubicación de descargas de agua geotérmica y las zonas de ascenso de vapor y descripción de procesos de mezcla del subsuelo.

Un buen modelo conceptual proporciona evidencia de que el explorador ha integrado todos los datos recopilados en la etapa de exploración, debe justificar la geología, gradientes de temperatura y dirección de flujo del sistema geotérmico, con ayuda del modelo el explorador podrá seleccionar sitios para la etapa de perforación y que las posibilidades de éxito sean mayores. En la Figura 15 se presenta a manera de ejemplo el modelo geológico conceptual de un área geotérmica.

Existen una gran variedad de software que permiten realizar un modelamiento geológico, uno de los más económicos y usados es el paquete RockWorks, comercializado por RockWare, sin embargo existe uno mucho más completo aunque con un precio más elevado llamado PETREL, comercializado por Schlumberger.

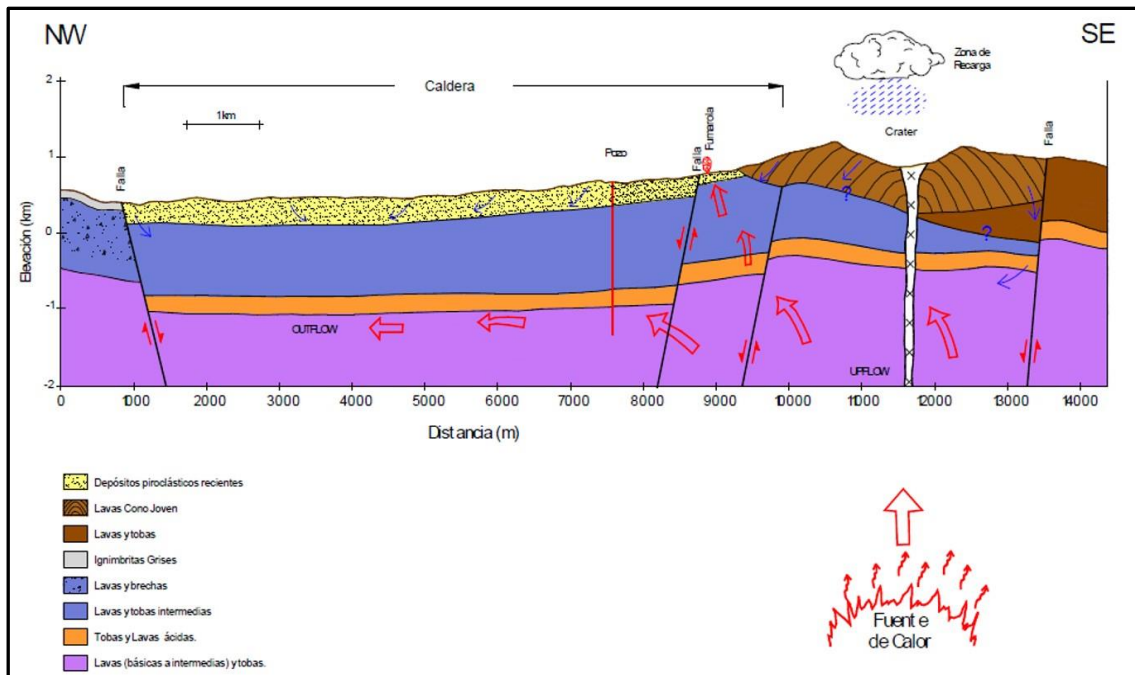


Figura 16. Modelo conceptual geológico preliminar (Tomado de guías de estudio diplomado de especialización en geotermia – Modelo geológico conceptual 2015).

9.8 Modelo geológico conceptual después de la perforación de pozos exploratorios.

Cuando se ha confirmado el recurso con la perforación de pozos exploratorios profundos (500 a 1 500 m), los modelos preliminares construidos en la etapa de reconocimiento geotérmico serán enriquecidos con información del subsuelo obtenida de estos pozos, y así se podrá definir con veracidad la estratigrafía de cada perforación mediante la descripción megascópica de los recortes de la barrena y núcleos, se conocerá la conductividad térmica y propiedades petrofísicas de las muestras colectadas, se podrá correlacionar la geología del subsuelo con la geología superficial descrita en las etapas de campo, se determinarán los valores de gradiente de temperatura, flujo de calor, nivel freático o niveles estáticos de los pozos, se realizará una correlación de gradientes de temperatura y flujo de calor con las anomalías de resistividad, se calcularán las temperaturas a profundidad inferidas en el yacimiento e inferir la extensión de la anomalía térmica de alta temperatura. En la Figura 16 se muestra e esquema de un modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Krafla – Islandia.

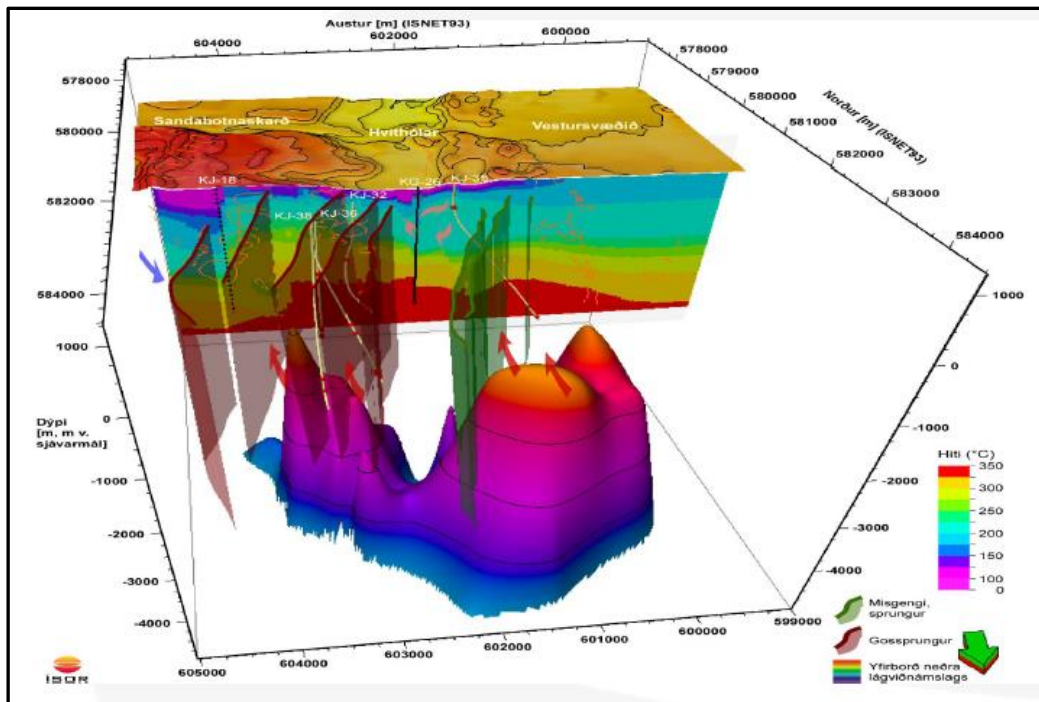


Figura 17. Modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Krafla, Island. (2009). Recuperado de Short Course on Geothermal Exploration, Los Azufres, Nov, 2014.

9.9 Exploración geoquímica

Durante la etapa de reconocimiento geotérmico la geoquímica es una herramienta útil porque provee estimaciones en las temperaturas del subsuelo, mediante el análisis, cálculo e interpretación de geotermometría química, otra herramienta práctica es el muestreo de fluidos y gases que aporta información cualitativa sobre la extensión de cada sistema hidrotermal en las primeras etapas de reconocimiento geotérmico.

Así mismo, los estudios geoquímicos en etapas de factibilidad y operación del campo geotérmico, son esenciales porque apoyan en la administración y manejo de una manera sustentable los recursos geotérmicos en la explotación para generación de energía eléctrica, mediante análisis de calidad de vapor en las unidades generadoras, monitoreos semestrales de manifestaciones termales, y manantiales, control geoquímico de gases y lodos de perforación durante las etapas de perforación de pozos productores e inyectores.

9.9.1 Origen de los fluidos geotérmicos y estudios geoquímicos de exploración.

Es importante conocer el origen geoquímico que da lugar a los fluidos geotérmicos, para saber interpretar los resultados obtenidos de los diferentes análisis que se realizan en la etapa de exploración, la mayor parte de yacimientos geotérmicos se encuentran en zonas volcánicas y cada tipo de sistema geotérmico tiene diferentes características, en la cuales se refleja el quimismo del fluido, sin embargo todos tiene en común una fuente de calor que es la que caracteriza el agua presente en las secciones superiores de la corteza terrestre, como se mencionó anteriormente la química es indispensable en todas la etapas de un desarrollo geotérmico por lo que el entendimiento de la química de los fluidos es primordial para tener un buen manejo del recurso geotérmico en etapas futuras (**Ver diagramas en anexo I, inciso a**).

Cuando se habla sobre un reservorio en estado de equilibrio se basa en la relación de la circulación de los fluidos del reservorio y el mecanismo de transferencia de calor, así mismo un sistema en equilibrio dinámico o convectivo es recargado por agua, que es calentada y descargada del reservorio ya sea hacia la superficie o hacia horizontes permeables profundos, el calor es transferido en el sistema por convección y circulación de fluidos y el agua es comúnmente de origen meteórico. Un sistema en equilibrio estático o conductivo da lugar al almacenamiento del agua y posteriormente es calentada en la roca, tiene o no una pequeña recarga al reservorio y la transferencia de calor es solo por conducción, este fluido es usualmente de gran salinidad.

El tipo de fluido de un sistema geotérmico puede ser principalmente de líquido (líquido dominante) o vapor (vapor dominante).

Los sistemas de líquido dominante por lo general pueden contener una capa de vapor que puede expandirse o desarrollarse por la explotación y son los más comunes, sin embargo no es correcto este término puesto que todos los sistemas esta conformados por dos fases una de líquido y otra de vapor (ver Figura 17).

Los sistemas que descargan solo vapor no son comunes, a estos sistemas se les llama "steam fields".



Figura 18. Esquema de clasificación de sistemas geotérmicos en base al origen de sus fluidos.

Los sistemas dinámicos (convectivos) de alta temperatura se encuentran en sistemas donde el gradiente geotérmico es superior al valor promedio de la corteza de -30 °C/km y donde la T_{roca} está a cientos de grados a profundidades (km).

Estos campos se caracterizan porque son controlados por la tectónica, y algunos se localizan en zonas donde se encuentran fallas, grabenes, en estructuras de colapso de calderas y reservorios a profundidades que oscilan entre 1-3 km. Estos sistemas son de origen volcánico donde el calor es proporcionado por magma.

Dentro de esta clasificación también se encuentran los sistemas de baja temperatura, llamados de baja entalpia, normalmente descargan aguas diluidas cerca de los 1000 ppm o menos a través de manifestaciones de entre $30 - 65^{\circ}$ C.

Su composición depende de la contribución o formación de las aguas (estratos geológicos por donde circula) y del agua meteórica.

Los sistemas estáticos (conductivos) se encuentran por lo general en estratos de depósitos en bases sedimentarias, los fluidos se derivan de la formación de aguas atrapadas dentro de capas de secuencias sedimentaria, las temperaturas de esta agua están entre $70-150^{\circ}$ C con profundidades entre 2-4 km , son sistemas de baja temperatura, con fluidos muy salinos es decir con contenidos altos de cloruros, los cuales permanecen atrapados dada la baja permeabilidad vertical en la formación, hasta que son liberados por acción tectónica o por la perforación.

Estos sistemas se encuentran a profundidades de $\sim 3-7$ km y están compuestos de roca sedimentaria permeable, contenido dentro estratos impermeables y baja conductividad, bajo estas condiciones, el calor y los fluidos no pueden ser expelidos como normalmente ocurre y por lo tanto, están atrapados dentro del sistema.

Los sistemas geopresurizados son análogos a los sistemas del petróleo y yacimientos de gas donde el líquido es retenido en las trampas estratigráficas y pueden tener presiones cerca de los valores litostáticos.

Conociendo el origen de los fluidos y los sistemas geotérmicos, se podrán determinar los análisis adecuados para la etapa de prefactibilidad.

Durante las etapas de reconocimiento la disciplina de geoquímica trabaja en conjunto con la disciplina de geología, porque se basa en la información que recopila sobre anomalías termales existentes en la región de estudio como son manantiales calientes, fumarolas, solfataras etc. (Figura 18), en esta etapa ocasionalmente existirán datos sobre estudios geoquímicos previos.



Figura 19. Características de un sistema geotermal activo.

El trabajo de campo en la etapa de reconocimiento inicia con identificar las zonas con manifestaciones termales, se caracterizan y se procede a la toma de muestras de fluidos representativos de vapor y gases (*Giggenbach y Goguel, 1989*).

El reconocimiento en campo debe ser planeado y ejecutado junto con el estudio hidrogeológico para evitar duplicidad de datos. Es importante conocer las técnicas para muestreo puesto que los fluidos deben ser adecuadamente preservados, se analiza la sílice, cationes, aniones y los isotopos en el agua y sulfatos, cuando se observan numerosas manifestaciones geotérmicas en una zona, se deberá tomar la temperatura, Ph, flujo estimado, depósitos de sólidos y la apariencia en general y por supuesto no olvidar sus coordenadas geográficas para que posteriormente se realice un mapa con la localización de las mismas. (Figura 19).

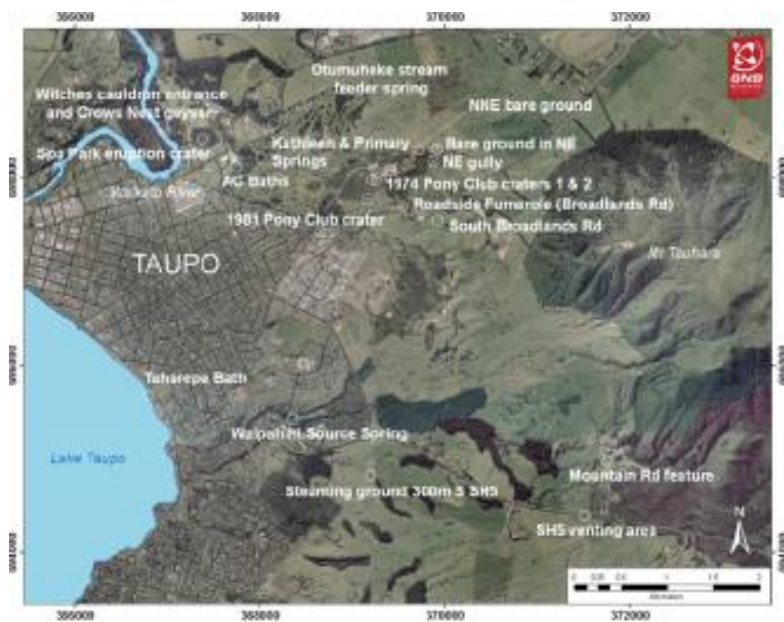


Figura 20. Mapa de manifestaciones termales, GNS Science, New Zealand, IFC-IGA, 2014.

Las aguas de manantiales límpidas y tibias representan mezclas de un componente termal de alta temperatura con aguas frías subterráneas, su muestreo es de suma importancia para determinar la definición de los procesos de mezcla en el subsuelo. Sin embargo es importante mencionar que el helio, argón y nitrógeno también determinan el origen del fluido.

Las concentraciones de iones cloruros, sulfatos, especies carbonatadas y el pH, determinan el tipo de agua y su origen, mientras que el boro y los iones de litio, fluoruro y amonio son trazadores de agua geotérmica y permiten verificar la calidad global del análisis mediante el método de balance de cargas.

Durante la toma de muestras para análisis químicos de vapor y agua es importante analizar los datos de la conductividad eléctrica (C.E) y tomar una línea base media para el área de interés, puesto que las zonas con una alta C.E a veces pueden proporcionar información sobre la entrada de fluidos térmicos, esto dependerá del tipo de roca huésped del yacimiento, sin embargo puede ser una herramienta útil que puede ayudar para la construcción del modelo conceptual.

En la Figura 20 se muestra una tabla que relaciona el tipo de fuente muestreada en campo y la interpretación obtenida mediante la información del análisis en laboratorio.

TIPO DE FUENTE	FUENTE DEL FLUIDO	INFORMACION OBTENIDA
Manantiales y pozos fríos	Aguas subterráneas someras	<ul style="list-style-type: none"> ♣ Hidrogeología. ♣ Tipos de aguas subterráneas someras. ♣ Efecto del sistema hidrotermal sobre estratos suprayacentes
Manantiales ebullentes con aguas cloruradas, > contenido de 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	<ul style="list-style-type: none"> ♣ 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 o corrosión.
Manantiales calientes/ tibios	Mezcla de agua del yacimiento con aguas subterráneas someras	<ul style="list-style-type: none"> ♣ 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 (condensado de vapor) geotérmico	<ul style="list-style-type: none"> ♣ 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 o incrustación.

Figura 21. Tipos de aguas naturales su origen y la información obtenible, OLADE, 2014.

9.9.2 Geotermómetros e isotopos.

La composición química de los manantiales termales puede ser útil para estimar la temperatura del reservorio del que son descarga. La temperatura es calculada con geotermómetros, en parte empírica, en parte basada en la teoría de equilibrio químico. Los geotermómetros se basan en que los solutos que intervienen en la formula se encuentren entre sí en equilibrio, cuando el agua del reservorio escapa y asciende a la superficie se enfría paulatinamente por dilución, conducción o ebullición, conforme baja la temperatura la cinética del reequilibrio se vuelve lenta y por consecuencia el agua del manantial mantiene la evidencia química de la temperatura original del reservorio a veces con una modificación pequeña. Para que un geotermómetro funcione, se requiere que el tiempo de reequilibrio sea, por lo menos, un orden de magnitud menor que el tiempo de ascenso del agua.

El uso de geotermómetros se puede utilizar bajo algunas condiciones como:

- ♣ Aplicados a manantiales tipo clorurado-sódico y de alta temperatura (mayor a 80 C, aunque esto no debe tomarse como una regla inflexible), de tal manera que el manantial realmente represente una descarga de la fase líquida del reservorio y que no se haya diluido mucho en su ascenso a la superficie.
- ♣ Pueden aplicarse a manantiales clorurado sulfatados, teniendo en cuenta las condiciones geohidrológicas del manantial
- ♣ No es conveniente aplicarse a manantiales bicarbonatados o a charcas ácidas, pues las temperaturas que se obtengan serán números sin ningún significado real.

De acuerdo a los elementos analizados en laboratorio se tiene que los elementos que nos determinan los geotermómetros son las concentraciones de sílice y de iones Na,

K, Ca, Mg, así como también las concentraciones relativas de bióxido de carbono, ácido sulfhídrico, hidrogeno, metano, nitrógeno, amoniaco, argón y helio.

Los geotermómetros más utilizados durante la etapa de exploración son:

- **Geotermómetros basados en sílice disuelta**

Se tienen ciertas fórmulas para calcular este geotermómetro donde c es la concentración de sílice disuelta en mg/l, las formulas varían en función de la fase solida de la sílice que controla la solubilidad (**Ver diagrama en anexo I, inciso b**). La fórmula con pérdida máxima de vapor se debe aplicar en los casos de manantiales hirvientes. Todas estas fórmulas han probado ser confiables y útiles.

Cabe aclarar que estos geotermómetros son sensibles a los efectos de dilución, ya que el cálculo se basa en la concentración de una sola especie (**ver formulas en anexo I, inciso c**).

- **Geotermómetros de cationes**

Existe también una familia de geotermómetros basados en la concentración de los cationes principales (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}), En estos casos se emplea la razón de dos de éstos cationes, por lo que son menos sensibles a los efectos de dilución. En todos los casos la concentración está dada en mg/l. El geotermómetro que incluye al calcio es un poco más complicado, por causa del parámetro β que adquiere dos valores distintos; ésta fórmula es útil en casos en que el calcio es relativamente alto, digamos que más de un 25% de la concentración de potasio (**ver formulas en anexo I, inciso e**).

Existe un diagrama triangular, propuesto por Giggenbach, que combina los geotermómetros de K/Na y de K/Mg, que permite clasificar las aguas y extrapolar la probable temperatura de reservorio, de una manera sencilla y directa (**ver diagramas en anexo I, inciso d**).

- **Geotermómetro de gases**

La composición química de los gases también puede ser útil para estimar la temperatura del probable reservorio. El equilibrio químico de los gases depende no solo de la temperatura, sino también de su distribución entre las fases líquida y gaseosa, por lo que es necesario conocer la saturación de vapor en el yacimiento. Esto hace de la geotermometría de gases una técnica más compleja. Existen varios diagramas mediante los cuales se estima la temperatura y la saturación del yacimiento.

Existen algunos geotermómetros de gases que, mediante ciertas consideraciones y ajustes empíricos, suprimen la necesidad de conocer la saturación de vapor como:

- **D`Amore y Panichi (ver formulas en anexo I, inciso d)**
- **Giggenbach (ver diagrama en anexo I, inciso f y formulas en inciso g)**

Este geotermómetro utiliza las concentraciones de H₂ y Ar, bajo el supuesto de que la fugacidad del H₂ depende fuertemente de la temperatura y de que la concentración de Ar en los reservorios geotérmicos corresponde a la de agua saturada con aire, ya que el Ar geotérmico es de origen atmosférico.

La concentración de los gases está dada en porcentaje molar. Este geotermómetro es útil en la etapa de reconocimiento geotérmico (exploración).

- **Geotermómetros isotópicos**

El factor de fraccionamiento isotópico depende de la temperatura. Por tanto, si dos sustancias o dos fases de una misma sustancia están en equilibrio isotópico, es posible determinar el valor del fraccionamiento isotópico y, por ende, la temperatura del último equilibrio

Existe un gran número de posibles geotermómetros. Sin embargo, solo unos pocos pueden usarse en la práctica exploratoria, ya sea por el costo del análisis o porque la información que arrojan es difícil de interpretar. Estos son los siguientes:

- ♣ Fraccionamiento del oxígeno 18 entre los sulfatos disueltos en agua y el agua misma.
- ♣ Fraccionamiento del deuterio entre el hidrogeno gas y el vapor de agua.

El geotermómetro del oxígeno 18 en sulfatos y agua es muy útil en la etapa de exploración, cuando existen manantiales clorurados sódicos de alta temperatura o hirvientes, que son descarga directa de los reservorios. **(Ver diagrama en anexo I, inciso h)**. El reequilibrio de este geotermómetro a menores temperaturas es muy lento, por lo que el manantial conserva la temperatura de equilibrio en el reservorio. Primero se establece el valor del fraccionamiento isotópico de las muestras del manantial, que es igual a la diferencia de los valores delta de los sulfatos y de agua, **(ver formulas en anexo I, inciso i)**.

Una vez calculado el valor de $10^3 \ln \alpha$ se puede conocer la temperatura correspondiente, recurriendo las tablas correspondientes.

Por último, en el caso de manantiales clorurados hirvientes con desprendimiento vigoroso de vapor y gases, se puede utilizar el geotermómetro del deuterio en el vapor de agua y en el gas hidrógeno, **(ver formulas en anexo I, inciso j)**.

Algunos geotermómetros pueden ser muy confiables y son frecuentemente relevantes para la construcción del modelo conceptual. Las incertezas están presentes en todo momento, pero pueden ser direccionadas para ajustarse con otros elementos del modelo conceptual.

Los isótopos nos permiten determinar el origen y el tipo de las aguas en un sistema dado. Nos ayudan a estimar la interacción agua-roca, nos permiten conocer algunos procesos fisicoquímicos que sufren los fluidos (evaporación, mezcla, etc.), de igual manera nos permiten estimar las zonas de recarga natural de un sistema geotérmico.

9.9.3 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, los mecanismos que permiten este enfriamiento son:

- ❖ Enfriamiento adiabático (separación de vapor)
- ❖ Mezcla con aguas de menor temperatura
- ❖ Enfriamiento conductivo (perdida de calor hacia la roca)

Estos mecanismos intervienen en el enfriamiento ya sea en mayor o menor grado, los dos primeros intervienen de manera principal, con ellos es posible hacer un balance simultáneo de materia y entalpía que permita dilucidar los eventos ocurridos durante el ascenso del fluido, este procedimiento es el modelado de mezclas.

Este modelado se basa en el carácter conservativo del contenido de calor o entalpía del fluido, suponiendo que la pérdida de calor a la roca es despreciable, también se toma el carácter conservativo de la concentración de especies químicas como el ion cloruro, que permanece en la fase líquida mostrando una escasa tendencia a intercambiarse por otros iones de los minerales de la roca.

El modelado de mezclas parte de un valor estimado de la temperatura en el yacimiento el resultado es un modelo que estima la salinidad del líquido del yacimiento y explica los procesos que dan lugar a la formación de las aguas de tipo clorurado sódico de la zona.

9.9.4 Aplicación de nuevas tecnologías en las etapas de un modelo geoquímico

9.9.1.1 Utilización de gases difusos en exploración geotérmica.

Actualmente en El Salvador La Geo utiliza las técnicas de desgasificación difusa durante las campañas de exploración de campos geotérmicos, en los cuales se hace uso de diferentes equipos. Las técnicas de medición de desgasificación difusa fueron utilizadas por primera vez en el año 2000 en el campo geotérmico de Berlín realizando mediciones en carreteras y calles marginales.

Entre el 2001 y 2002 se realizó el primer estudio para determinar el comportamiento del campo geotérmico de Ahuachapán, realizándose básicamente en arroyos y cerca de fallas conocidas. Desde el 2003 se llevan a cabo estudios más detallados con dirección Este-Oeste en cuadrícula regular. Se ha estado trabajando en ambos campos geotérmicos y en las nuevas áreas de exploración: San Vicente y Chinameca.

Los estudios de gases en suelo incluye diferentes técnicas tales como: muestras de gases en suelo para el análisis de diferentes especies gaseosas (oxígeno, dióxido de carbono, nitrógeno, helio, argón y metano), emanaciones de radón 222 y radón 220, flujo de dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y mercurio gaseoso en suelo. Los estudios de gases en suelos se realizan utilizando diferentes instrumentos de análisis por ejemplo, el medidor de radón (Detector Pylon AB-5 y Celda de Lucas 300A) para la determinación radón 222 y radón 220, medidor de mercurio (Jerome, modelo 431-X) para la determinación de mercurio, el analizador de ácido sulfhídrico (Jerome, modelo 431-X) para la determinación de ácido sulfhídrico y el medidor portable de flujos difusos de: ácido sulfhídrico y dióxido de carbono en determinación de flujos de gases en suelos. Las temperaturas de los suelos son determinados haciendo uso de termocuplas con una sonda de temperatura. Los análisis de las muestras gaseosas

son analizados posteriormente en laboratorio haciendo uso de un espectrómetro de masas cuadrupolar.

Los métodos y equipos que se utilizan en la medición de desgasificación difusa son:

- **Radón (^{222}Rn) y Torón (^{220}Rn).** Un Monitor de radiación portable Pylon Modelo AB-5 y una celda de Lucas Pylon modelo 300 A son utilizados para las mediciones de radón.
- **Flujos de CO_2 .** Se miden directamente utilizando flujos en cámaras cerradas de CO_2 en un equipo West System con las cámaras LICOR LI-800 y un LI-820 de ruta única, de doble longitud de onda, para analizar los gases en el espectro infrarrojo. Todas las mediciones de flujo se han realizado utilizando una cámara con un volumen interno total de $2.756 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ y $3.14 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ de área basal. La medición de flujo se basa en el aumento de la tasa de CO_2 en la cámara (*Fridriksson, 2009*).
- **Vapor de Mercurio:** Las muestras gaseosas en suelos para la determinación de vapor de mercurio son extraídas aproximadamente a 50 cm de profundidad utilizando una sonda de acero inoxidable con un septo y jeringa de 50 cm^3 . La muestra se inyecta en un medidor de vapor de mercurio Arizona Instruments (Jerome modelo 431-X), que utiliza un sensor de película de oro.
- **Ácido Sulfhídrico.** Las muestras de ácido sulfhídrico son extraídas a cerca de 40 cm de profundidad con un septo y una jeringa de 50 cm^3 . La muestra es inyectada al analizador de ácido sulfhídrico Arizona Instruments, que también cuenta con una película de oro como sensor y una bomba
- **Concentración de gases:** O_2 , H_2 , N_2 , CO_2 , He y Ar. Las muestras de gas para análisis de oxígeno, hidrogeno, nitrógeno, dióxido de carbono, helio, argón y metano son extraídas aproximadamente a 50 cm de profundidad usando una sonda metálica con un septo y una aguja hipodérmica en una jeringa de 50 cm^3 .

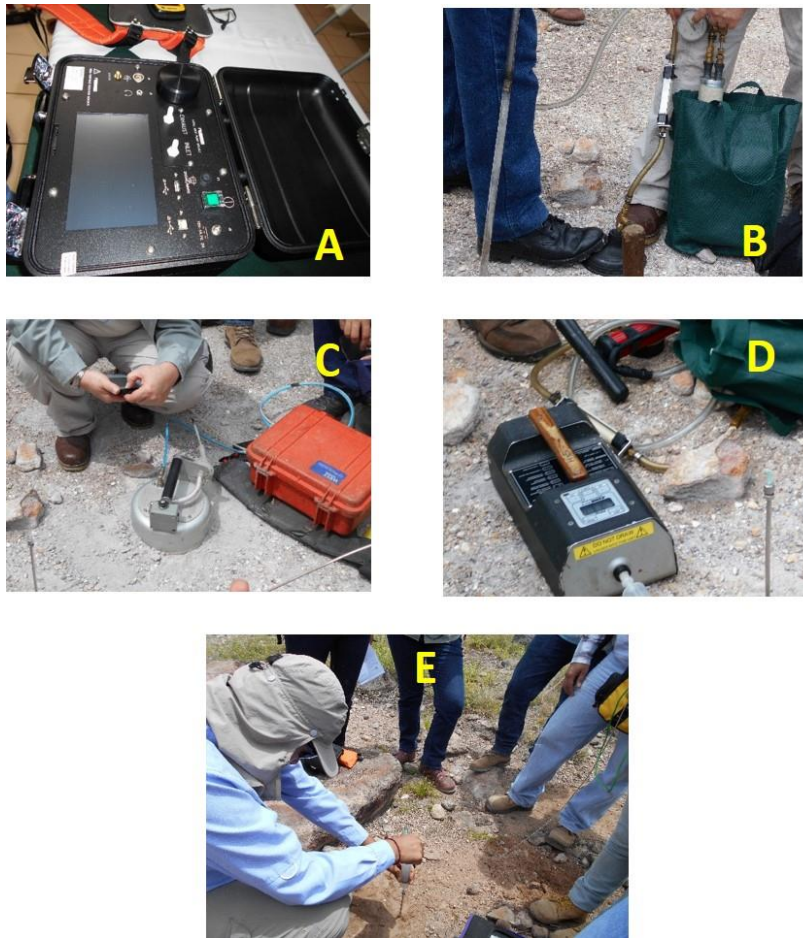


Figura 22. (A) Equipo de Radón (^{222}Rn); (B) equipo de Torón (^{220}Rn); (C) equipo de vapor de Mercurio, (D) analizador de ácido sulfhídrico; (E) toma de muestras para concentración de gases.

9.10 Utilización de software para modelización geoquímica.

La modelización numérica en la disciplina de geoquímica representa una herramienta útil para desarrollar el estudio en los sistemas de alta temperatura durante las etapas de exploración, desarrollo y explotación.

El modelado geoquímico proporciona información sobre el equilibrio químico de los fluidos geotérmicos.

Los modelos geoquímicos pueden ser clasificados en base al nivel de complejidad de la información que se requiere:

- **Modelos de especiación - solubilidad** – no proporcionan información de tipo espacial o temporal; dan información sobre el estado de especiación y de Saturación con respecto a las fases minerales **WATCH. (Puede aplicarse a exploración).**
- **Modelo de curso reactivo** – simulan una serie de pasos reactivos en un sistema geoquímico con mecanismos de transporte de masa y/o energía. Información de tipo pseudo-temporal están incorporadas al interno de la variable de progreso, No proporcionan información de tipo espacial **PHREEQC. (Fase de prefactibilidad)**

9.11 Modelo geoquímico conceptual preliminar.

Concluida la etapa de exploración y cuando los análisis de laboratorio hayan concluido los resultados serán utilizados para la elaboración de un modelo conceptual preliminar, el cual debe aportar datos que se muestran en la Figura 22.

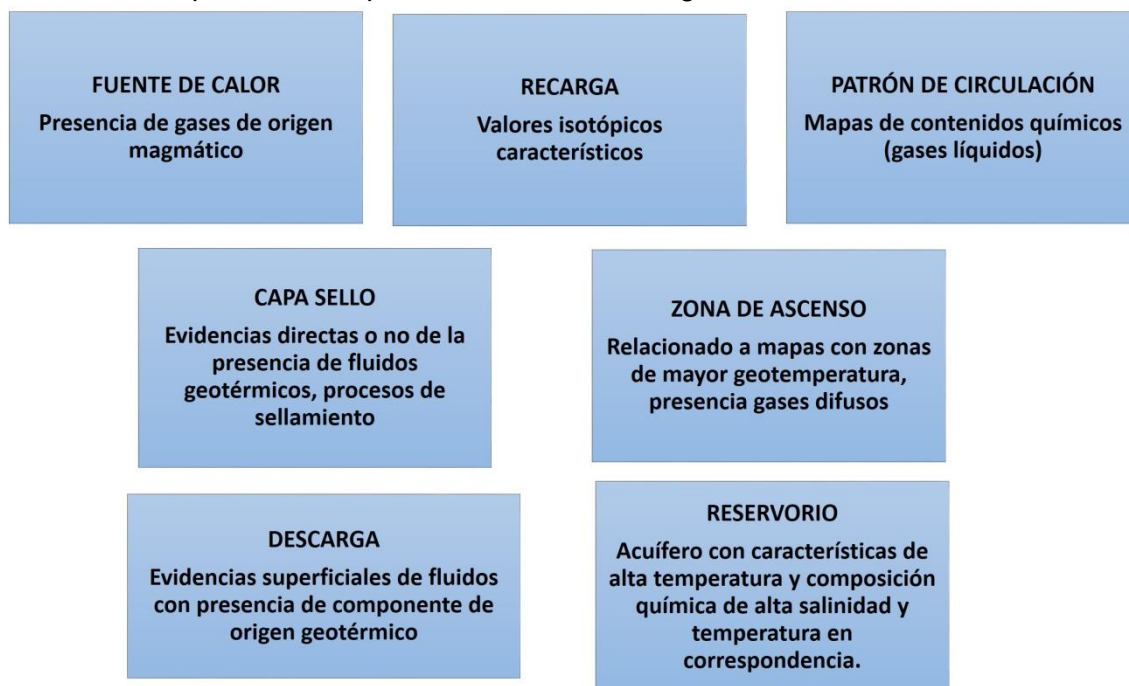


Figura 23. Criterios geoquímicos para la elaboración de un modelo conceptual preliminar.

La geotermometría es de gran utilidad porque es indicador de actividad geotérmica ya que proporciona características termales que muestran el último estado de equilibrio agua-roca alcanzado a profundidad, si ha producido un re-equilibrio posterior durante el ascenso o la descarga a la superficie, así como determina de una forma cualitativa los tipos de fluidos alrededor del reservorio, identifica zonas de ebullición y evalúa la temperatura a condiciones profundas permitiendo estimar las temperaturas del reservorio usando composiciones químicas, demarca el nivel freático y da ideas si el sistema puede ser ácido o alto en gases, clasifica químicamente los manantiales en diferentes tipos de agua, para tener un mejor criterio que permita realizar y complementar el modelo geoquímico conceptual. (Ver Figura 23).

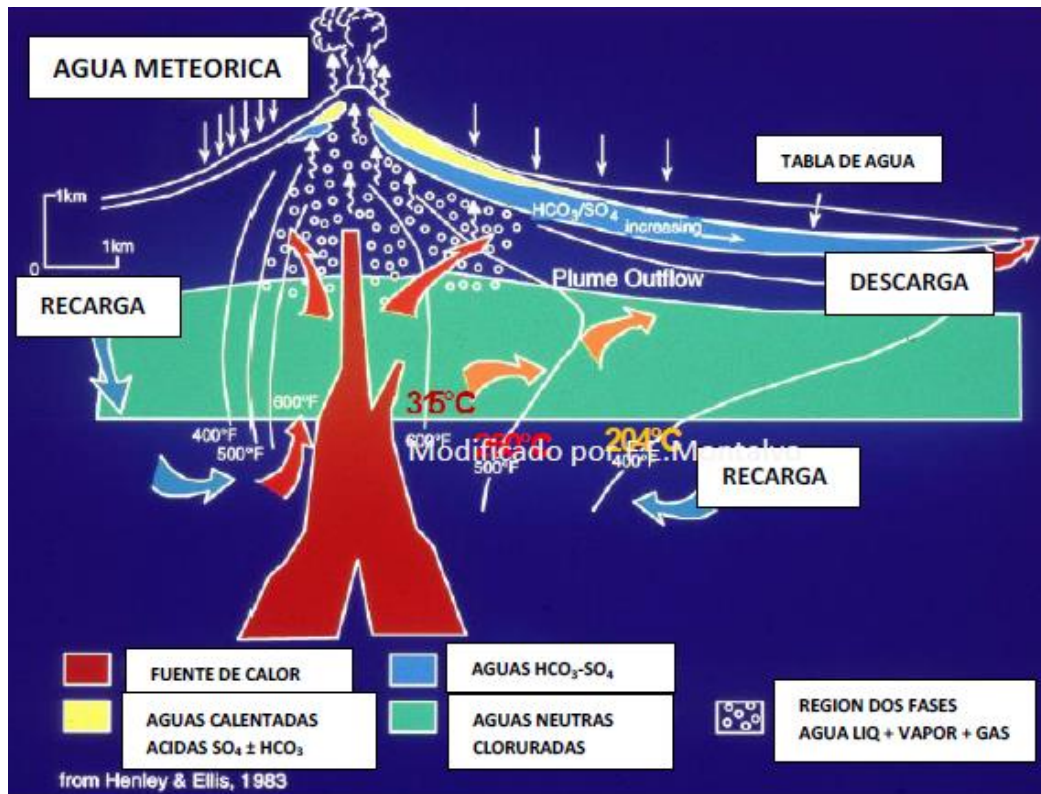


Figura 24. Henley y Ellis (1983). Modelo conceptual de un volcán andesítico,

9.12 Actualización del modelo conceptual geoquímico.

Una vez que se hace una integración de los resultados de laboratorio obtenidos en campo se infieren los componentes del modelo conceptual preliminar como las zonas de recarga, patrones de flujo, circulación superficial y profunda (upflow, outflow), origen de los fluidos, temperatura del reservorio.

Este modelo apoya y da sustento a la etapa de prefactibilidad, una vez se lleve a cabo la etapa de perforación de pozos exploratorios se conocerán las temperaturas reales y se podrá conocer la capacidad de producción, las condiciones físico-químicas del fluido de las zonas de alimentación y se relacionará con la litología y minerales de alteración, con esta información ya se contará con datos reales de:

- ❖ Temperatura de reservorio
- ❖ Patrón de fluidos
- ❖ Fuente de calor
- ❖ Permeabilidad de reservorio.

Se hará una actualización del modelo conceptual, a medida que se vayan obteniendo más datos durante la fase de perforación exploratoria. En la figura 24 se muestra el esquema de un modelo conceptual geoquímico, con la representación de los elementos principales de un sistema geotérmico.

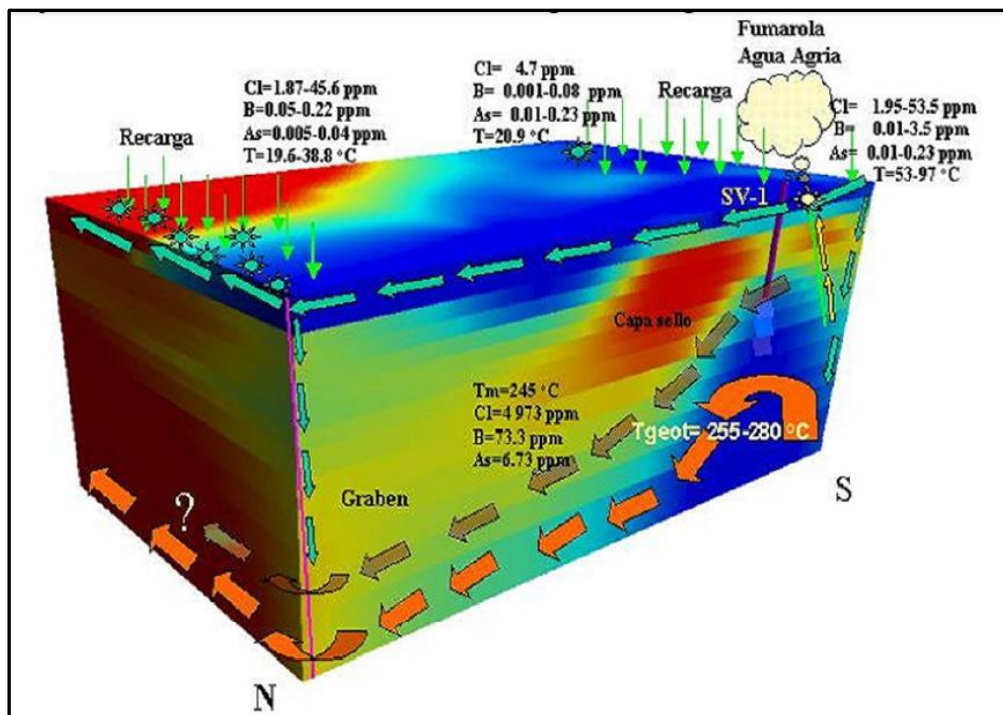


Figura 25. Modelo conceptual geocímico. Recuperado de curso de exploración geocímica, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

9.13 Exploración geofísica.

Durante la fase de exploración geofísica en un campo geotérmico se aplican los principios de la física a través de diferentes métodos de medición con el fin de estudiar la distribución de estas propiedades físicas en el subsuelo. A partir de la interpretación de estas mediciones se puede caracterizar un área de interés geotérmico identificando la posible ubicación de una fuente de calor, ubicación probable del reservorio, zonas mineralizadas, zonas de descarga etc.

Una de las principales limitantes de las técnicas de exploración geofísica, es que los resultados pueden ser interpretados indeterminadamente puesto que la inversión de los datos obtenidos suele tener infinitas soluciones matemáticas, sin embargo la geofísica es una herramienta importante y se busca correlacionar la información obtenida con información geológica y geocímica para obtener mejores resultados.

La exploración geofísica superficial se realiza en áreas de interés geotérmico con los siguientes objetivos:

- Determinar el potencial de un campo geotérmico a partir del estudio de patrones estructurales, litológicos, estratigráficos, vulcanológicos y manifestaciones geotérmicas en superficie que son interpretados a partir de diferentes técnicas de exploración.
- Determinar la existencia de un recurso geotérmico y proponer sitios para la perforación exploratoria.
- Desarrollar un modelo geofísico conceptual de la zona.

9.13.1 Métodos geofísicos en la etapa de reconocimiento y/o exploración.

Como complemento a la exploración geológica, la geofísica aporta información valiosa a partir de la implementación de métodos que miden propiedades físicas del subsuelo mediante técnicas exploratorias en superficie o levantamientos aéreos. A partir de esta información, se elaboran modelos geofísicos en 1,2 ó 3 dimensiones en donde se representa la distribución de estas propiedades en el subsuelo, estos modelos geofísicos requieren de una interpretación geológica que establezca una relación entre el modelo geofísico y el modelo geológico.

Las propiedades físicas del subsuelo que se miden a través de métodos geofísicos se muestran en la Figura 25.

Método geofísico	Fenómeno físico medido	Propiedad física deducida
Gravimetría	Aceleración de la gravedad	Densidad
Magnetometría	Campo magnético	Susceptibilidad
Electromagnético	Campo electromagnético	Resistividad
Sismología	Tiempo de llegada de las ondas	Velocidad
Sísmica	Tiempo de llegada de las ondas	Velocidad

Figura 26. Propiedades físicas medidas en el subsuelo

- **Geofísica en la fase de reconocimiento:** En la fase de reconocimiento la geofísica es la ciencia que participa en menor grado debido a los altos costos de implementación de estos métodos, sin embargo una vez haya concluido el análisis geológico, en el cual se identifiquen áreas más pequeñas favorables para la exploración, se pueden implementar algunos métodos geofísicos de un costo relativamente menor. Dentro de los métodos más comúnmente aplicados en la fase de reconocimiento se encuentran:
 - Gravimetría: La profundidad de penetración de esta técnica depende del espaciamiento y densidad de la red de puntos de medición, a menor espaciamiento y mayor densidad de puntos, mayor será la resolución y la profundidad de penetración y así mismo su costo es mayor; por esta razón en etapa de reconocimiento se implementa este método solamente para un reconocimiento superficial de los primeros metros del subsuelo.
 - Sondeos eléctricos verticales (SEV): Al igual que la gravimetría, este método solamente se implementa para obtener resolución de las capas superficiales.
- **Geofísica en la fase de prefactibilidad:** En la fase de prefactibilidad, cuando ya se tiene identificada un área favorable para la exploración, se implementan métodos geofísicos con el fin de obtener información de las propiedades físicas del subsuelo a mayor profundidad, en esta etapa la densidad de las redes de medición de gravimetría y magnetometría se hacen mayores con el fin de obtener una mejor resolución, también se implementan métodos más costosos y contundentes tales como MT y TDEM.

9.13.2 Gravimetría y magnetometría.

La gravimetría y magnetometría se clasifican como métodos geofísicos de potencial ya que forman un campo de fuerza alrededor de la tierra; estos métodos hacen parte de los más usados para cartografía y detección de anomalías en el subsuelo con fines de explotación de recursos.

Es importante desde la fase de planeamiento de una campaña exploratoria una vez se conozca el objetivo de estudio y las características del terreno, determinar la ubicación y espaciamiento longitudinal de los puntos geográficos en donde se llevarán a cabo las mediciones, ya que el área de muestreo es proporcional a la profundidad penetrada, este factor restringe también la escala de tamaño de las fuentes que producen las anomalías.

9.13.2.1 Gravimetría

Este método permite detectar las variaciones del campo gravitatorio de la tierra que se generan a partir de las diferencias de densidad bajo la superficie causadas por la presencia de estructuras que ponen en contacto dos cuerpos de diferentes características o cuerpos mineralizados, estas variaciones se detectan a partir de la medición del campo gravimétrico natural terrestre.

Estudios de gravimetría en zonas volcánicas han demostrado ser efectivos, ya que proporcionan una buena evidencia en cuanto a variaciones de densidad poco profundas del subsuelo asociadas con la historia estructural y magmática de un volcán (Ndombi, 1981).

En geotermia existe una fuerte relación entre las anomalías gravimétricas positivas y las zonas asociadas a fallamiento, mineralizaciones y volcanismo reciente, la combinación de los resultados obtenidos a partir de esta técnica, junto con los resultados obtenidos de otros métodos geofísicos permitirán realizar una interpretación geológica para la localización de fallas, zonas permeables, y zonas de perforación. Esta técnica también es usada en campos geotérmicos para monitorear los cambios y movimientos de masa en el subsuelo, y de esta manera determinar aproximadamente la recarga del sistema.

Los datos que se miden en campo deben ser corregidos con respecto a puntos de referencia los cuales deben tener un valor de gravedad conocido, estas correcciones se hacen teniendo en cuenta el tiempo, altura topográfica, posición geográfica, mareas e influencia de topografía cercana que puedan afectar la medida. Una vez realizadas las correcciones, se calcula la *anomalía de Bouguer*, la cual representa el método más comúnmente usado para la reducción de las mediciones de gravedad en propósitos de exploración. El valor del cálculo de la gravedad de Bouguer se asume como una consecuencia de las estructuras presentes en el subsuelo, por lo cual se construyen mapas de isocontornos de valor de anomalía, a partir del contraste de densidad que se observa en estos mapas se hace una interpretación geológica que permite identificar estructuras de orden regional asociadas a fallamiento y zonas que pueden estar mineralizadas.

Este método es relativamente económico, fácil de usar, se realiza con un equipo portátil pequeño, y no es invasivo.

9.13.2.2 Medición e interpretación gravimétrica.

Los instrumentos que miden la gravedad son llamados gravímetros, estos pueden ser vistos como una balanza extremadamente sensible la cual es capaz de medir pequeños cambios en la fuerza de atracción, estos instrumentos son divididos en dos tipos: de medición relativa, y de medición absoluta.

Los gravímetros de medición relativa miden diferencias de gravedad entre mediciones distintas, los más usados son los gravímetros portátiles basados en un conjunto masa – resorte, y algunos de mediciones eléctricas, entre los más conocidos se encuentran los gravímetros Worden y Lacoste & Romberg.

Los gravímetros de medición absoluta se usan para medir de forma directa el valor de la gravedad, los más comunes son los de caída libre, tiro vertical, y los péndulos, aunque actualmente los de péndulo no se usan por su baja exactitud.

Actualmente para fines de exploración, son más utilizados los gravímetros de medición relativa ya que son más livianos, requieren menor tiempo de medición, son fáciles de usar y su costo es menor frente a los gravímetros de medición absoluta.

9.13.2.3 Magnetometría.

El magnetismo es un fenómeno físico natural, la magnetización natural remanente es la que queda registrada en una roca que ha estado sometida a un campo magnético externo durante un periodo de tiempo, esta magnetización puede ser primaria si se ha adquirido durante la formación de la roca, o secundaria si ha sido adquirida por otro tipo de procesos posteriores al periodo de formación. Existen diferentes tipos de adquisición de magnetización remanente, puede ser térmica, deposicional, química, metamórfica y viscosa.

El objetivo de la exploración magnetométrica es investigar la geología del subsuelo a partir de las anomalías de campo magnético generadas por las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. El contenido magnético de las rocas es conocido como susceptibilidad y este varía dependiendo de las propiedades físicas, químicas y del entorno en que se encuentren las rocas.

En ambientes geotérmicos usualmente se encuentran rocas ígneas, este tipo de rocas adquieren magnetización por mecanismos térmicos. Debido a que los minerales son magnéticos únicamente hasta cierta temperatura dependiendo de sus propiedades físicas y químicas (temperatura de Curie), cuando las rocas se enfrían por debajo de esta temperatura, los dominios magnéticos de los minerales se orientan en la dirección del campo magnético dominante en ese momento y en ese punto de planeta, de modo que este campo magnético queda registrado en la roca (*Mochales, 2006*).

En exploración magnetométrica con fines geotérmicos se buscan anomalías magnéticas negativas puesto que el incremento de temperatura hace que las rocas

pierdan magnetismo (*Ley de Curie-Weys*), esta pérdida de magnetismo podría estar asociada con cercanía a la fuente de calor.

9.13.2.4 Medición e interpretación magnetométrica.

Los instrumentos de medición usados para esta técnica son llamados magnetómetros, estos miden las variaciones y la distribución del campo magnético en la superficie de la Tierra, estas variaciones dependen de tres factores: campo magnético principal, campo magnético externo y susceptibilidad magnética de las rocas.

Actualmente se usan magnetómetros de protones o de precesión nuclear, los magnetómetros de protones se basan en un recipiente con un líquido cargado de núcleos de hidrógeno, puede ser agua, keroseno, o cualquier otro hidrocarburo, este líquido es excitado por un campo magnético artificial que se produce a través de una corriente que pasa por un cable que rodea el recipiente, en este momento los protones actúan como pequeños dipolos y se orientan paralelos al campo geomagnético, cuando la corriente cesa los campos atómicos interactúan con el campo geomagnético local, esta interacción es detectada, y de esa manera se conoce la intensidad total del campo geomagnético local. (*Barreto, 1997*) este magnetómetro tiene alta resolución en las mediciones absolutas y relativas.

La disposición de los puntos geográficos seleccionados para realizar mediciones, dependerá del objetivo de estudio y de las condiciones del terreno, se debe tener en cuenta que para obtener datos precisos, es necesario que los operadores del equipo tomen ciertas precauciones, tales como mantenerse libres de materiales magnéticos, limpiar el equipo de medición para evitar contaminación, y ubicar el sensor de manera correcta.

Las anomalías magnéticas pueden ser producidas por infinitas fuentes, su aparente complejidad es consecuencia del comportamiento y efecto de varios dipolos magnéticos independientes, sin embargo son interpretadas como modelos geológicos simples que permiten entender la causa de la anomalía, su profundidad aproximada, contenido de minerales magnéticos etc.

9.13.4 Magnetotelúrica y audiomagnetotelúrica.

El método MT es una técnica pasiva de exploración geofísica que surge como resultado de la combinación de dos técnicas anteriores, el sondeo geomagnético profundo (*Geomagnetic Deep Sounding-GDS*) que permite conocer la distribución de la conductividad eléctrica en profundidad a partir de observaciones del campo magnético y el método telúrico el cual mide los cambios de conductividad en el suelo a partir de los datos registrados con dipolos eléctricos horizontales.

El método de exploración geofísica MT es una técnica electromagnética (EM) de fuente natural (utiliza las variaciones de campos magnéticos y eléctricos resultantes de la interacción entre el plasma solar y la magnetósfera terrestre) que permite hacer mediciones de los campos eléctrico (E) y magnético (H) naturales del subsuelo y

establecer la relación existente entre ellos durante un periodo de tiempo y en rangos de frecuencia determinados, el origen del método está referenciado en la década de 1950 con las mediciones de variación de campo eléctrico y magnético por *Tikhonov (1950)* y *Cagniard (1953)*.

Las fuentes naturales de campos MT mayores a ~ 1 Hz están asociadas a tormentas eléctricas, una parte de esta energía se transforma en campos magnéticos mientras que en frecuencias inferiores a 1 Hz, la mayor parte de la señal se debe a actividad en la magnetósfera excitada por la actividad solar. Los campos EM en la superficie de la Tierra se comportan casi como ondas planas, con la mayor parte de su energía reflejada, pero con una pequeña cantidad propagada verticalmente hacia abajo (Vozoff, 1988). El método AMT se basa en un rango de frecuencias de 10,000 Hz a 10 Hz. En adelante se hará referencia a los métodos MT y AMT como MT/AMT.

El método MT/AMT tiene un amplio rango de aplicaciones dentro de los cuales se encuentran: la exploración de petróleo en áreas donde la reflexión sísmica es muy costosa o ineficaz, la exploración geotérmica, identificación de reservorios de agua, entre otras. La principal ventaja del método está relacionada con su capacidad para la exploración en profundidades hasta de varios kilómetros, con poco o ningún impacto ambiental. La principal desventaja es la dificultad de obtener los datos en las zonas eléctricamente ruidosas o donde la superficie es inestable.

La resistividad medida directamente en la superficie con los equipos de adquisición es conocida como resistividad aparente (ρ_a), considerada como un promedio de resistividades calculado hasta la profundidad de penetración (*skin depth*) ya que la resistividad en general no es constante a profundidad, la resistividad real solo coincide con la resistividad aparente en medios homogéneos.

9.13.2.5 Medición e interpretación MT/ AMT.

Los despliegues en campo se realizan con receptores multifuncionales para técnicas electromagnéticas, entre los más conocidos se encuentran receptores modelo V8-6R y MT-5 fabricados por Phoenix Geophysics, los cuales constan de una unidad de adquisición, tres bobinas que registran la medición del campo magnético (componentes Hx, Hy, Hz), cuatro electrodos que registran las componentes del campo eléctrico (Ex, Ey, Ez) y un electrodo adicional usado como polo a tierra para proteger el equipo ante descargas eléctricas y cargas estáticas. La medición de los campos eléctrico y magnético se realiza de manera continua y simultánea.

La Figura 26 muestra la configuración de los equipos de medición en campo, en donde el terreno se divide en cuatro cuadrantes, en el centro del arreglo se ubica el receptor y el electrodo usado como polo a tierra, las bobinas se disponen en tres de los cuadrantes, una en dirección N-S, otra en dirección E-W y la última verticalmente; los electrodos se instalan uno en cada extremo del arreglo tratando de conservar equidistancia al centro del receptor.

Este método es usado en exploración geotérmica ya que es el método más eficaz para registrar las variaciones de resistividad desde la superficie hasta varios kilómetros de profundidad, a partir de la interpretación de estas variaciones se pueden identificar zonas mineralizadas, rumbo de estructuras regionales, espesor de capas sedimentarias, profundidad de basamento, ubicación del reservorio productor etc.

Como una de las principales características de los sistemas geotérmicos, se asume que la fuente de calor está relacionada con una anomalía resistiva en forma de cúpula, limitada en la parte superior por una anomalía conductiva asociada a la roca sello del sistema, tal como se muestra en la Figura 27, en donde se observa el modelo geofísico de un campo geotérmico en dos dimensiones.

Una de las principales desventajas de este método es que no diferencia sistemas fósiles y sistemas activos, ya que los dos se encuentran en equilibrio térmico con la mineralogía asociada a sistemas geotérmicos.

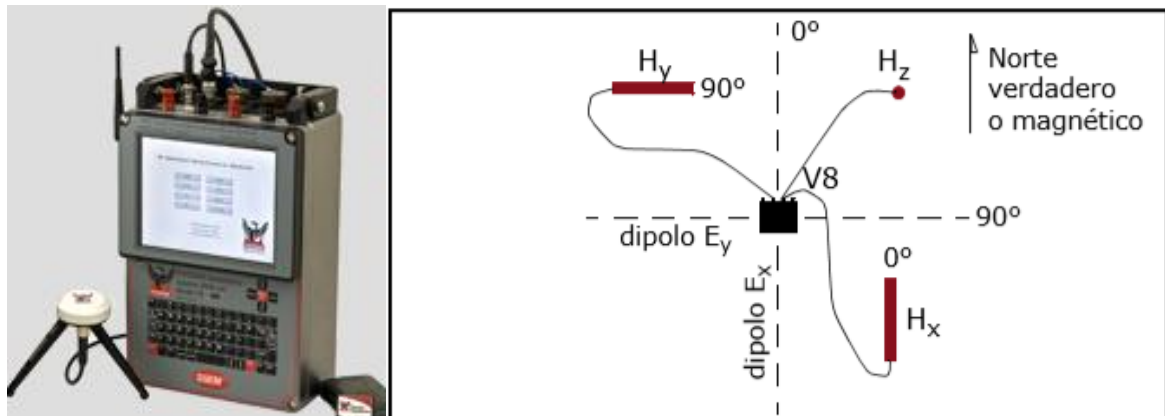


Figura 27. Modelo de despliegue del equipo V8 – 6R en campo (modificado de Phoenix Geophysics 2006).

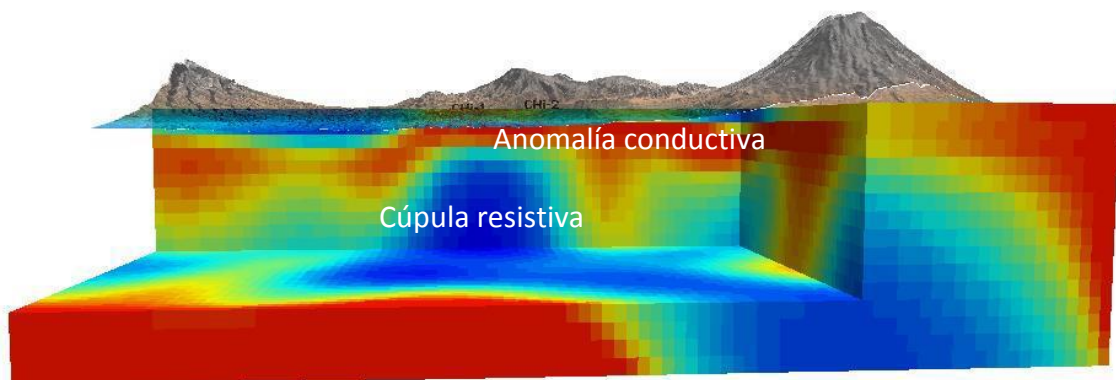


Figura 28. Modelo geofísico de resistividades obtenido.

9.13.2 Método TDEM (Time domain electromagnetic).

Este método se usa principalmente para corregir los valores de un factor impuesto por inhomogeneidad cerca de la superficie llamado *static shift*, el cual causa un desplazamiento en las curvas de resistividad generadas mediante el método MT, y genera anomalías que no obedecen a las características del subsuelo.

El TDEM es un método activo ya que se inyecta una corriente al subsuelo, la cual es controlada por el operador. Uno de los equipos más usados para esta práctica el V8-6R fabricado por Phoenix Geophysics. Este método consiste en hacer circular en cortos periodos de tiempo un campo eléctrico alterno alrededor de una bobina transmisora o de un cable extendido en forma de cuadrado, durante el periodo de conexión se origina un campo magnético primario estable en el subsuelo, cuando se corta de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (y por tanto cesa el campo magnético primario) el campo electromagnético inducido en el subsuelo causa corrientes parásitas (EMF) que se propagan tanto a través del terreno como en los conductores cercanos. Como consecuencia de pérdidas de resistencia calórica estas corrientes disminuyen con el tiempo, provocando un campo magnético secundario decreciente en la superficie. Como el campo magnético secundario se genera cuando el campo primario está desconectado, puede medirse con relativa facilidad. Cuando en el subsuelo hay cuerpos de conductividad eléctrica elevada, la atenuación de las corrientes parásitas es significativamente menor que en los malos conductores. Por tanto, la medida de la relación de decrecimiento del campo secundario proporciona una forma de detectar la presencia de cuerpos conductores en el subsuelo y estimar su conductividad.

En términos generales, este método al igual que el método MT proporciona información acerca de las variaciones de resistividad en el subsuelo, la principal diferencia entre los dos es la profundidad de penetración ya que el TDEM tiene una resolución máxima de 1000m de profundidad. El esquema de despliegue en campo se muestra en la Figura 28.

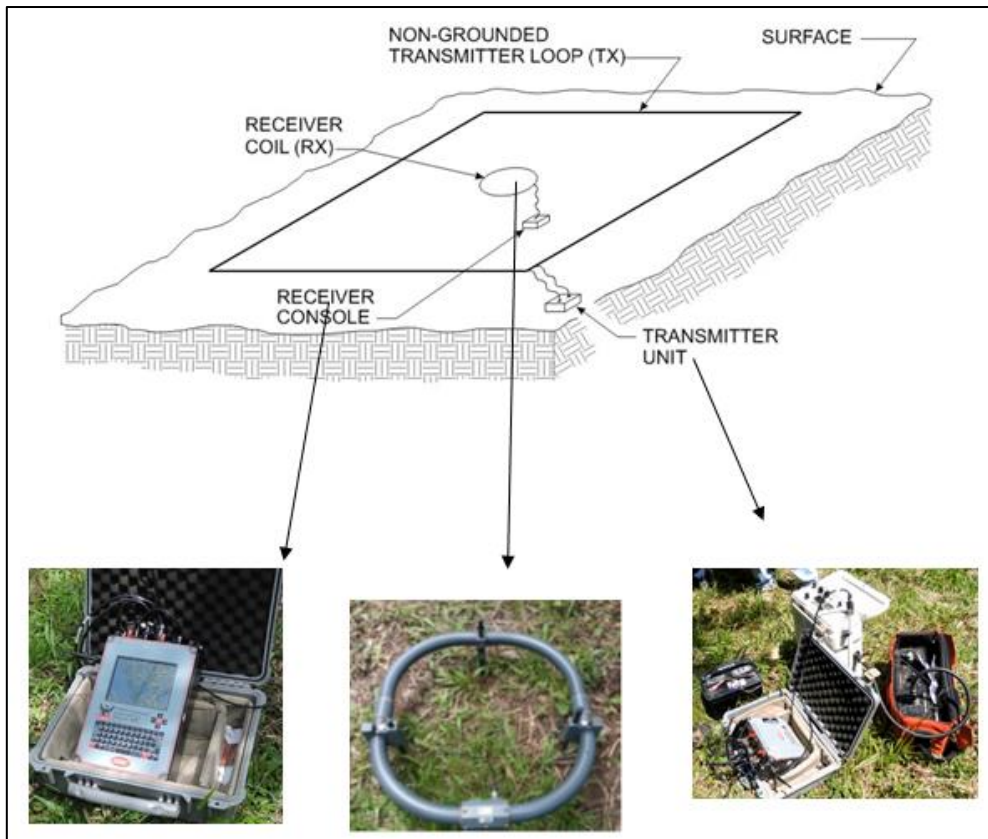


Figura 29. Modelo de despliegue del equipo V8 – 6R en campo para técnica TDEM

9.14 Técnicas de integración de datos para selección de áreas favorables para la explotación y/o elaboración de modelo conceptual integrado.

9.14.1 Método TDEM (Método de integración de datos por superposición de capas (Noorollahi et.al (2008))).

Una de las técnicas de integración de datos se realiza usando el método de superposición de capas, en el cual los diferentes tipos de mapas generados a partir de los resultados de la exploración geológica, geofísica y geoquímica se integran en un solo archivo en donde cada mapa recibe el nombre de capa. Cada capa tendrá un puntaje o peso de importancia que estará dado por métodos estadísticos, o con base en el concepto de los expertos en modelamiento geotérmico.

El uso de las herramientas de GIS juega un importante papel en la elaboración de modelo geológico conceptual, ya que estos proveen herramientas para realizar el análisis espacial de los diferentes parámetros, y de esta manera se identifican las zonas en donde se superponen condiciones geológicas, geoquímicas y geofísicas favorables para la exploración geotérmica, estas nuevas áreas de superposición constituirán un nuevo archivo generado que corresponderá con un mapa de favorabilidad geotérmica. En la Figura 29, se muestra el esquema de desarrollo del método de integración de datos por superposición de capas propuesto por *Noorollahi*

et.al (2008), y en la Figura 30, se muestra la implementación de este método en el campo geotérmico de Sicilia en Italia.

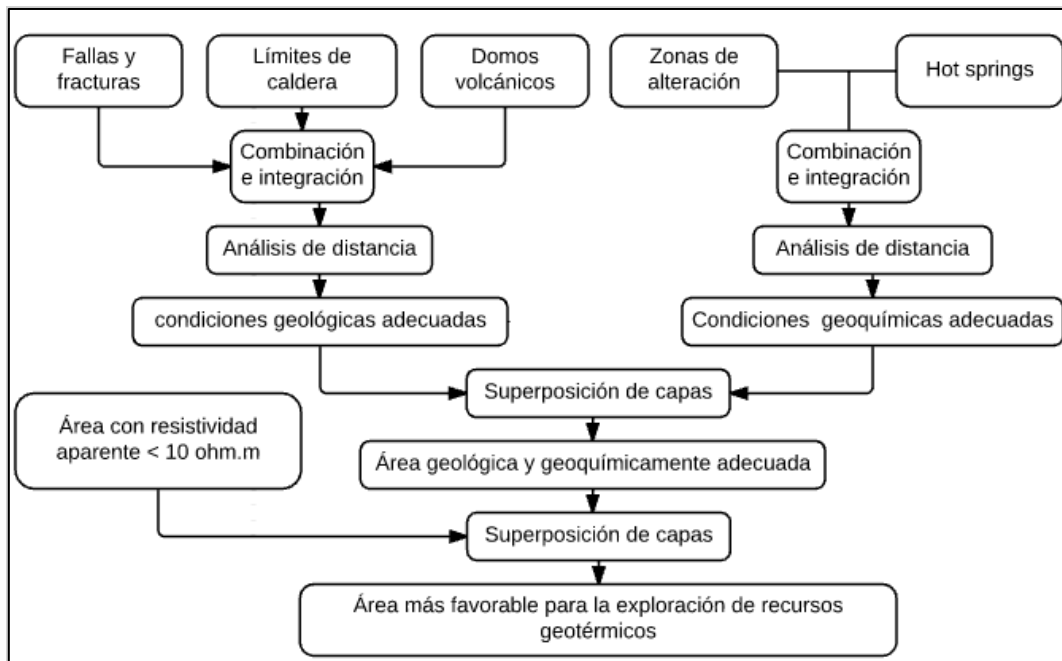


Figura 30. Esquema de representación del modelo de integración de datos por superposición de capas. (Modificado de Noorollahi et.al 2008).

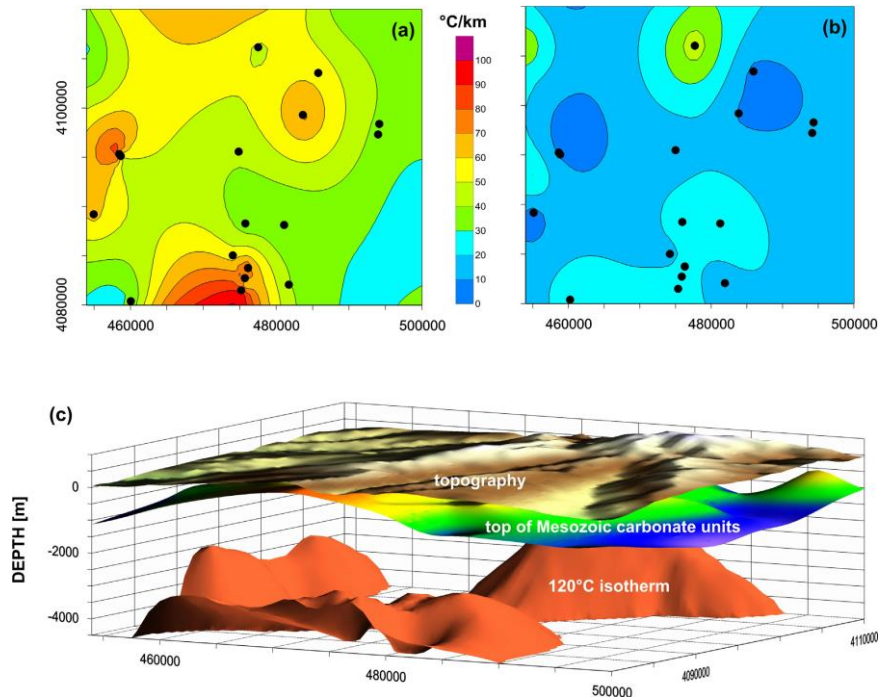


Figura 31. Ejemplo de implementación del método de integración de datos por superposición de capas aplicado en el campo geotérmico de Sicilia en Italia. (Modificado de Trumphy et. al 2015)

9.14.2 Método de integración de datos booleano (Noorollahi et.al (2008)).

El modelo de integración de datos de Boolean se basa en el principio del álgebra booleana que es la teoría matemática que se aplica en la lógica combinatoria. Las variables booleanas son símbolos utilizados para representar magnitudes lógicas y pueden tener sólo dos valores posibles: 1 (valor alto) ó 0 (valor bajo).

En la práctica no se asigna la misma importancia a cada uno de los criterios, por lo tanto se necesita asignarle un valor a cada ítem de acuerdo a su significancia relativa establecida con métodos geoestadísticos o de acuerdo con el criterio de un grupo multidisciplinario de geocientíficos.

En este método de integración de datos para elaboración del modelo conceptual se introducen expresiones que definen las condiciones del área y se les asigna un valor de esta manera:

- A las áreas en donde se identifican zonas permeables se les da un valor de 1, y a las otras áreas un valor 0.
- El ascenso de fluidos geotérmicos a superficie, se demuestra con la existencia de manifestaciones superficiales, para identificar las posibles zonas de ascenso de fluidos de acuerdo con *Noorollahi et.al (2008)*, se extienden polígonos de 1000 m desde los bordes de las zonas con alteración hidrotermal, y áreas de amortiguamiento con un ancho de 2000 m alrededor de los manantiales de agua caliente, estas zonas seleccionadas en los mapas de alteración hidrotermal y termales reciben un valor de 1, y el resto del mapa un valor de 0.
- La existencia de domos volcánicos en el Valle Moeil fue tomada como prueba de fuente de calor en profundidad *Noorollahi et.al (2008)*, por esto se definen áreas de 1000 m alrededor de domos volcánicos a las cuales se les da un valor de 1 y al resto del mapa un valor de 0.

A partir de la valoración dada a las áreas seleccionadas, se establecen las áreas con alta permeabilidad y las áreas cercanas a la fuente de calor, a esto se le suman condiciones geofísicas favorables para un reservorio geotérmico, y de esta manera se selecciona el área más favorable para exploración geotérmica, tal como se muestra en la Figura 31.

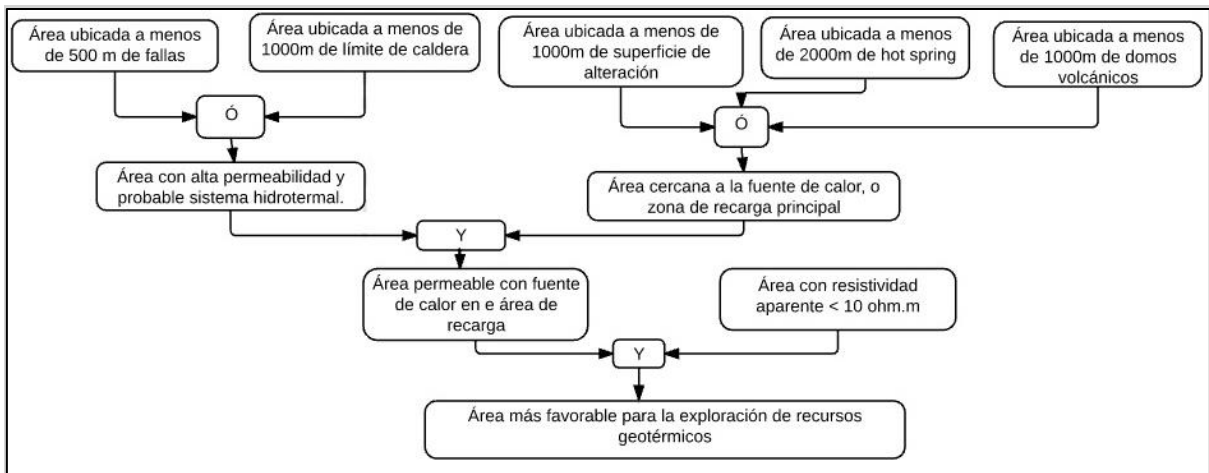


Figura 32. Diagrama de flujo de integración Booleana, que implica la combinación lógica de mapas binarios y se aplica el condicional “Y” e “O” para encontrar el área más favorable (Modificado de Noorollahi et.al 2008).

9.15 Modelo conceptual integrado.

El modelo conceptual preliminar tendrá que transformarse en un modelo conceptual más completo, con los datos y resultados obtenidos de las disciplinas de geología, geofísica y geoquímica en la etapa de exploración, el modelo deberá contener los siguientes elementos representados en un perfil o en una vista tridimensional del subsuelo y en un mapa en planta:

1. El tamaño del sistema, área y rango de profundidad.
2. Naturaleza de la fuente de calor.
3. Zona de ascenso de fluidos calientes (zona de upflow).
4. Zona de descarga (zona de outflow).
5. Zona de recarga.
6. Patrón de circulación de fluidos.
7. Localización de barreras, capa sello.

Es importante destacar que:

- ♣ Los modelos conceptuales son modelos descriptivos o cualitativos y un buen modelo conceptual es la clave del éxito de la exploración, el desarrollo y la utilización de un sistema geotérmico.
- ♣ La relación entre las disciplinas de geología, geoquímica, geofísica y el conjunto de datos obtenidos en la etapa de reconocimiento y prefactibilidad reflejan el resultado mediante el modelo conceptual integrado.
- ♣ Los modelos conceptuales deben revisarse y actualizarse continuamente a lo largo de la evolución de un sistema geotérmico.

El modelo conceptual integrado es producto de una metodología que permite administrar de una manera eficiente los recursos humanos, económicos y el tiempo destinado para las jornadas de campo en la etapa de exploración, como lo explican las guías para estudios de reconocimiento y prefactibilidad cuyo objetivo es orientar en la investigación para las primeras etapas de reconocimiento de un proyecto geotérmico

(OLADE, 1994, IGA, 2014, ESMAP, ,2012). El esquema de elaboración de un modelo geotérmico conceptual integrado se muestra en la Figura 32.

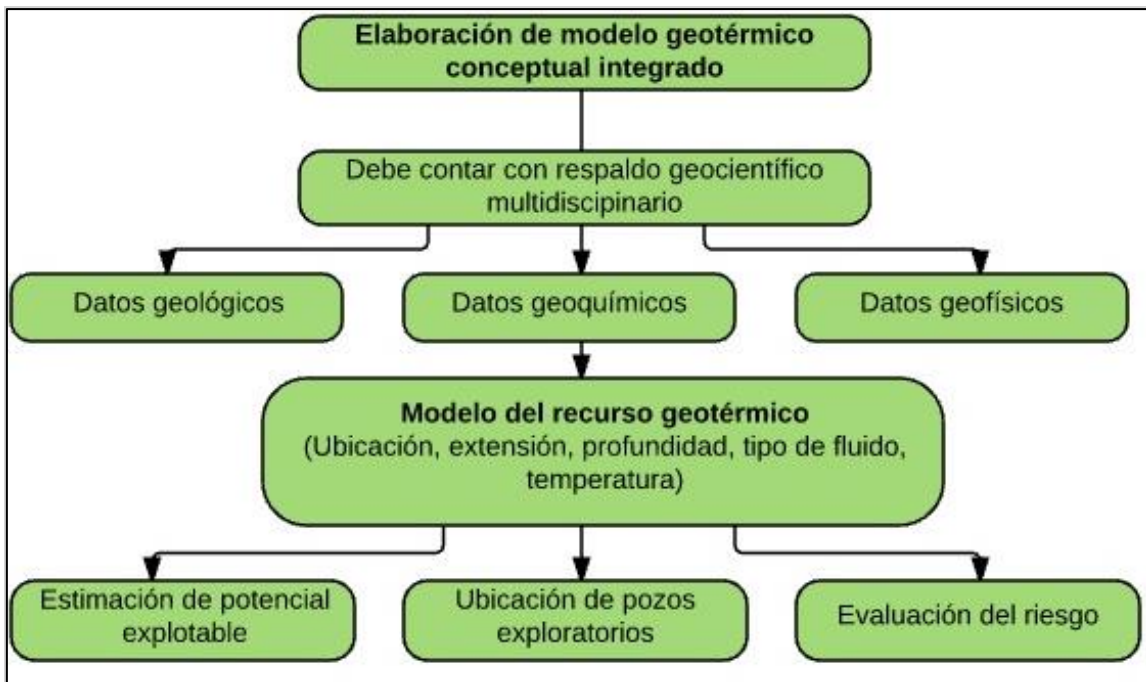


Figura 33. Esquema de elaboración de un modelo conceptual integrado.

La metodología base de las guías puede ser complementada con el uso de técnicas y sistemas que permiten facilitar el procesamiento de datos , como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a geotermia que permiten la recopilación de información de geología, geoquímica y geofísica, utilizando el método de integración de datos por superposición de capas y así facilitar la integración geocientífica para la toma de decisiones en la etapa de prefactibilidad, así como para la elaboración del modelo conceptual integrado.

En la Figura 33 se muestran los aspectos relevantes aportados por las disciplinas de geología, geoquímica y geofísica para el conocimiento de un sistema geotérmico, y en a Figura 34 se representa a manera de ejemplo, el modelo conceptual integrado de un campo geotérmico indicando los elementos principales.

ASPECTOS GEOCIENTÍFICOS			
Elementos del modelo geotérmico conceptual	Geología	Geoquímica	Geofísica
Fuente de calor	Estudio geovolcanológico (origen magmático)	Gases de origen magmático (diagramas ternarios CO ₂ -S-HCl)	MT y sísmica pasiva
Reservorio	Grado de fracturamiento de posible unidad litológica que aloja el reservorio	Geotermómetros (Temperatura de fluidos)	MT (cúpula resistiva alzada)
Patrón de flujo	Mapeo de fallas geológicas (dirección de flujo)	Composición de las aguas (diagramas ternarios)	Gravimetría (lineamientos)
Capa sello	Identificación de Unidades litológicas (Unidad impermeable, edades de la roca)	NO APLICA	MT y TEM (capa conductiva)
Zona de descarga (outflow)	fallas geológicas (fluidos siguen la geometría de fallas)	Composición de las aguas (diagramas Na-Cl)	NO APLICA
Zona de ascenso de fluidos (upflow)	NO APLICA	Manifestaciones termales (temperaturas)	Gravimetría (basamento resistivo) MT (conductivo profundo)
Zona de recarga	Edificios volcánicos	Isotopos (O ¹⁸ , deuterio, tritio)	

Figura 34. Aspectos geocientíficos que aportan las disciplinas de geología, geofísica y geoquímica al modelo conceptual integrado.

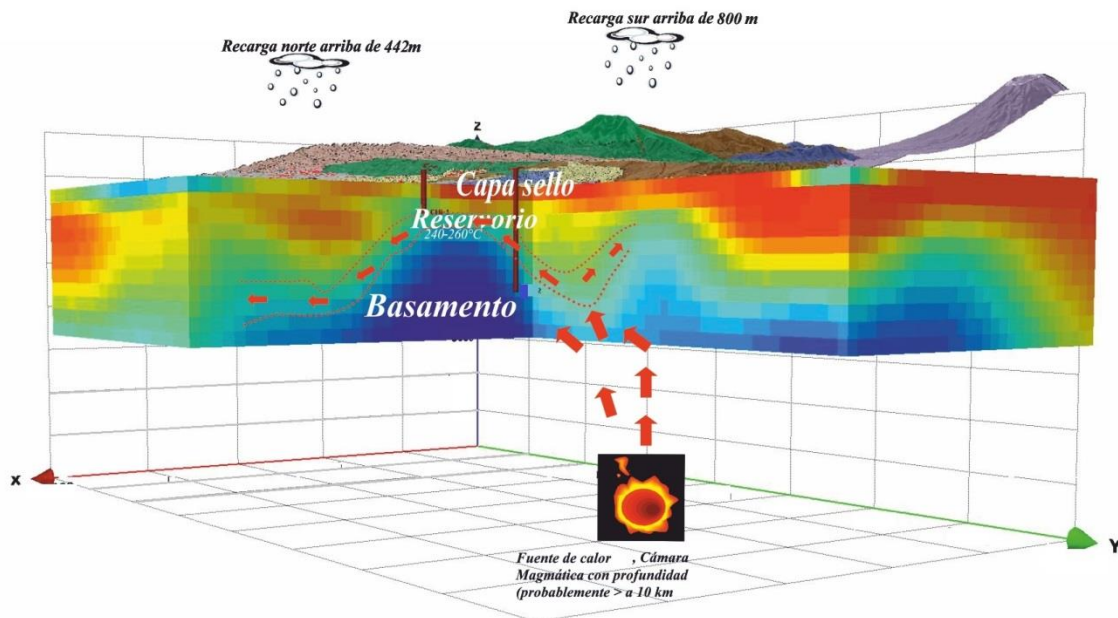


Figura 35. Modelo conceptual integrado de un campo geotérmico.

10. Conclusiones

La exploración superficial se realiza en la fase inicial de un proyecto geotérmico con el objetivo de investigar detalladamente el área de estudio y así establecer áreas más pequeñas con mayor probabilidad de existencia de recurso, ya que de esta manera se disminuye el riesgo de perforar pozos fallidos, esto sumado al hecho de que la exploración superficial es menos costosa* que la exploración profunda, influye en que ésta se acostumbre a realizar detalladamente antes de perforar pozos exploratorios.

La planeación y desarrollo de cada una de las etapas, así como los métodos que se implementan, varían en cada proyecto dependiendo de las características topográficas geológicas, sociales y políticas del campo en estudio, además de estar sujetas al presupuesto disponible.

La elaboración de modelos conceptuales preliminares sirve como base para determinar la localización y objetivos de perforación de pozos exploratorios, lo cual se constituiría como una segunda etapa de la fase de exploración, una vez se obtienen resultados de litología y temperatura de pozos exploratorios se correlaciona esta información con el modelo preliminar para darle mayor validez.

La metodología base de las guías puede ser complementada con el uso de técnicas y software que permiten facilitar el procesamiento de datos, tal como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a geotermia que permiten la recopilación de información de geología, geoquímica y geofísica, utilizando el método de integración de datos por superposición de capas para la elaboración del modelo geotérmico conceptual integrado.

11. Recomendaciones.

Dar seguimiento a las guías OLADE, donde se compartan casos de éxito en la etapa de factibilidad, en América Latina y El Caribe, utilizando las etapas de reconocimiento de un proyecto geotérmico de acuerdo a la metodología explicada en esta guía.

Actualizar y complementar la información metodológica, mostrando avances y tecnologías recientes adaptables a proyectos de prefactibilidad geotérmica, ya que las nuevas tecnologías se basan más en las etapas de factibilidad y en ocasiones no es viable desde el punto de vista económico para el inicio de un proyecto de reconocimiento.

12. Agradecimientos

Agradecemos a los patrocinadores, coordinadores y colaboradores del programa regional de entrenamiento geotérmico edición 2015 por habernos brindado la

oportunidad de participar en este diplomado, para fortalecer nuestras capacidades académicas y profesionales y que contribuirá en el desarrollo geotérmico de nuestros respectivos países.

Expresamos nuestro agradecimiento a las empresas y entidades que respaldan nuestra participación en el diplomado, específicamente a la Comisión Federal de Electricidad (México) y a la Universidad Nacional de Colombia por confiar en nuestras capacidades para representarlos internacionalmente.

Al equipo de trabajo del área de estudios de LaGeo, especialmente al área de geología y geofísica, y particularmente a nuestro tutor Arturo Quezada por su apoyo y asesoría en este trabajo.

A nuestras familias por su apoyo y comprensión desde la distancia.

13. Referencias bibliográficas

Barreto, L. M. (1997). El geomagnetismo (Vol. 11). Plaza y Valdes. P 28 – 31

Chambefort, I., Buscarlet, E., Wallis, I. C., Sewell, S., & Wilmarth, M. (2015). Ngatamariki Geothermal Field, New Zealand: Geology, geophysics, chemistry and conceptual model. *Geothermics*.

Cumming, W. (2009, February). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. In *Proceedings*.

ESMAP, 2012, Manual de Geotermia: Como planificar y financiar la generación de electricidad, Informe técnico 002/12.

Fry, N. (1979). Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics* 60(1): 89-105.

Guðmunsson, A. T. & Kjartansson, H. (1996): "Earth in Action. An Outline of the Geology of Iceland". Vaka-Helgafell, Reykjavík, Islandia.

Gylfi Páll Hersir and Guðni Axelsson, Iceland GeoSurvey (ISOR), 2014, Conceptual models of geothermal systems, introduction [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: Short Course on Geothermal Exploration Los Azufres, Nov. 24-29, 2014.

Halldór Ármannsson, Thráinn Fridriksson (2014), Application of Geochemical methods in Geothermal Exploration [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: Short Course on Geothermal Exploration Los Azufres, Nov. 24-29, 2014.

Harvey, C., & Browne, P. (2000, May). Mixed-layer clays in geothermal systems and their effectiveness as mineral geothermometers. In *Proceedings World Geothermal Congress* (pp. 1201-1204).

IGA, I. (2013). Handbook of Geothermal Exploration Best Practices: A Guide to Resource Data Collection. *Analysis, and Presentation for Geothermal Projects*.

Hiriart Le Bert Gerardo, 2011, Evaluación de la energía geotérmica en México, Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Regulador de Energía.

International Geothermal Association, 2014. Best Practices Guide for Geothermal Exploration.

Jolie, E., Moeck, I., & Faulds, J. E. (2015). Quantitative structural–geological exploration of fault-controlled geothermal systems—A case study from the Basin-and-Range Province, Nevada (USA). *Geothermics*, 54, 54-67.

Magaña María Inés, 2015, Técnicas de desgasificación difusa aplicada a la prospección geotérmica durante la fase de exploración geotérmica, Programa regional de entrenamiento geotérmico, Edición 2015.

Mochales, T. (2006). Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza. Universidad de Zaragoza. 43,

Moghaddam, M. K., Noorollahi, Y., Samadzadegan, F., Sharifi, M. A., & Itoi, R. (2013). Spatial data analysis for exploration of regional scale geothermal resources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 69-83.

Montalvo López Francisco, 2015, Exploración Geoquímica [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: Programa regional de entrenamiento geotérmico, Edición 2015.

Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., & Tanaka, T. (2008). GIS integration model for geothermal exploration and well siting. *Geothermics*, 37(2), 107-131.

Orkuveita Reykjavíkur (2005): "Nesjavellir Power Plant" (folleto). Reykjavík, Islandia.

OLADE, 1994. Guía de Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos. Quito, Ecuador.

OLADE, 1994. Guía para la Evaluación del Potencial Energético en zonas Geotérmicas durante las etapas previas a la factibilidad.

Pérez Esquivias, H., Macías Vázquez, J. L., Garduño Monroy, V. H., Arce Saldaña, J. L., García Tenorio, F., Castro Govea, R., ... & Hernández, R. (2010). Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 23(2), 51-63.

Phoenix Geophysics, 2005. Data Processing User Guide, Phoenix Geophysics Limited, 3781 Victoria Park Avenue, unit 3, Toronto, ON Canada M1W 3K5.

Quezada, A., 2015, Modelo Geológico Conceptual [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: Programa regional de entrenamiento geotérmico, Edición 2015.

Quijano León José Luis, 2007, México. Manual de Geotermia, Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios.

Tikhonov, A.N. (1950). On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust, *Doklady*, 73, 295-297.

Trumpy, E., Donato, A., Gianelli, G., Gola, G., Minissale, A., Montanari, D., ... & Manzella, A. (2015). Data integration and favourability maps for exploring geothermal systems in Sicily, southern Italy. *Geothermics*, 56, 1-16.

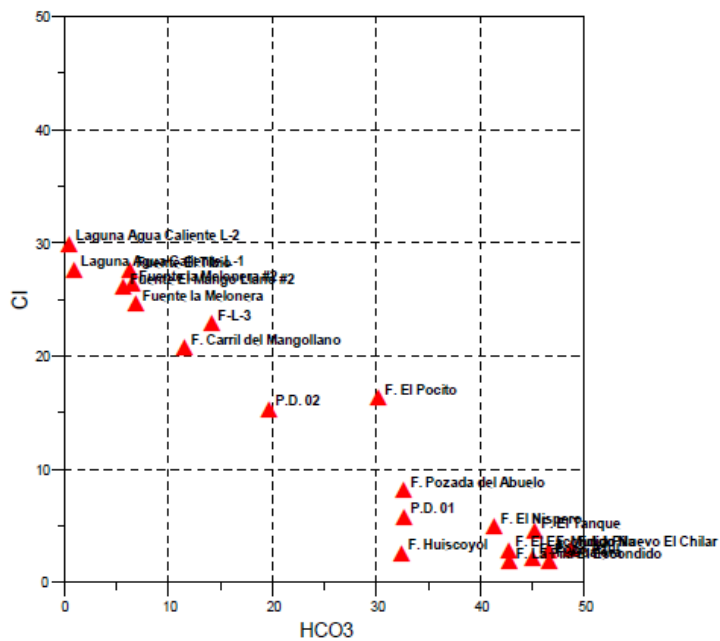
Unsworth, M. (2014). Class notes for Geophysics 424. <https://www.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/424/notes424/424D1-Fall2014.pdf> (último acceso octubre 2 de 2015).

Vozoff, K. (1988). The magnetotelluric method. En: Nabighian, M. N. (Ed.) Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Applications II, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, 641-711

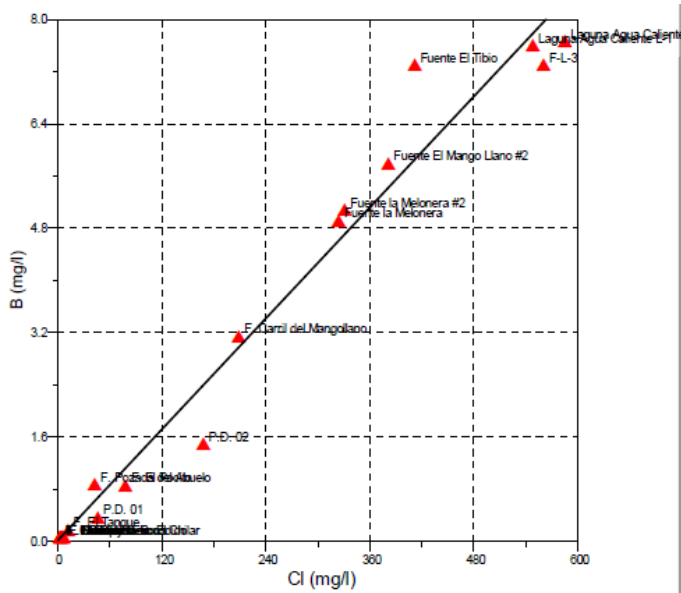
14. Anexos

Anexo I Diagramas utilizados para analizar la caracterización de fluidos y recarga meteórica.

a) Diagrama CL-HCO₃ y diagrama CL-B para analizar la caracterización de fluidos.



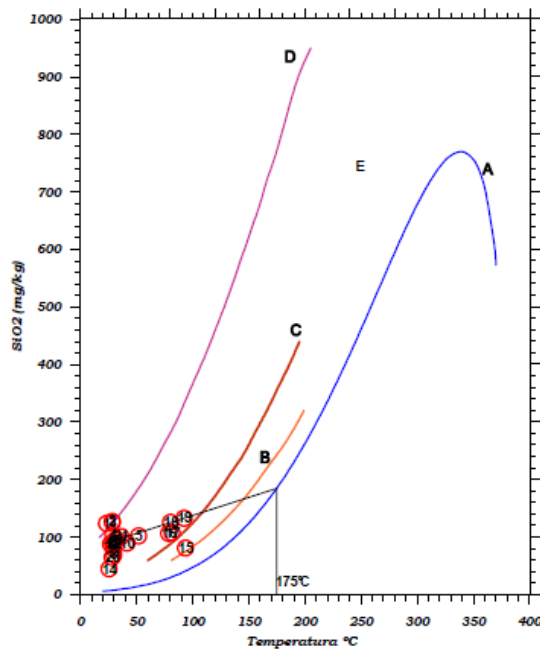
**Diagrama Cl-HCO₃
Proceso de mezcla**



**Diagrama Cl-B
Aguas evaporadas**

Recuperado de taller de desarrollo de un modelo geoquímico conceptual, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

b) Diagrama para geotermómetro de SiO₂



*Diagrama entalpia-silice:
A: cuarzo; B: calcedonia; C: cristobalita; D: silice amorfa;
E: Max pérdida de vapor.*

Geotermómetro de sílice. Recuperado de taller de desarrollo de un modelo geoquímico conceptual, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

c) Fórmulas para geotermómetros basados en sílice disuelta.

Donde C es la concentración de sílice disuelta en mg/l, estas fórmulas varían en función de la fase sólida de la sílice que controla la solubilidad.

Calcedonia (Fournier): $t(C) = \frac{1032}{4.69 - \log c} - 273$

Cuarzo (Fournier): $t(C) = \frac{1309}{5.19 - \log c} - 273$

Cuarzo con pérdida máxima de vapor (Fournier): $t(C) = \frac{1522}{5.75 - \log c} - 273$

Calcedonia-cuarzo (Giggenbach): $t(C) = \frac{1000}{4.55 - \log c} - 273$

d) Diagramas para analizar geotermómetros de cationes.

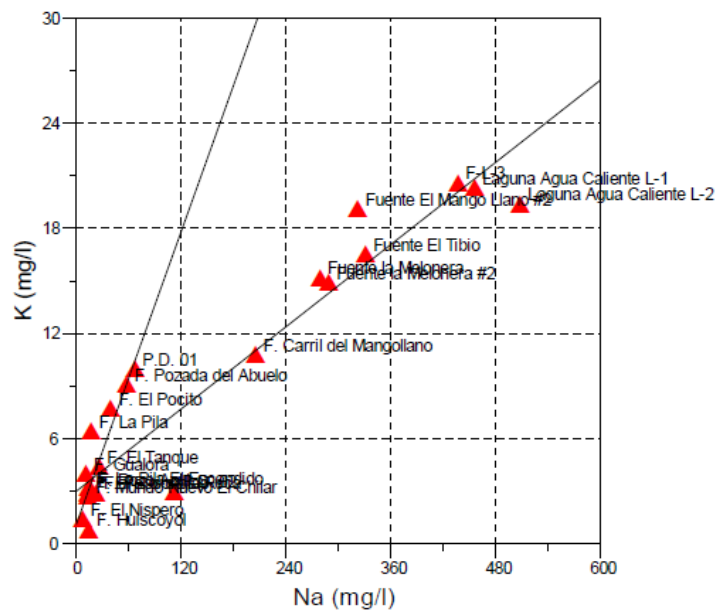


Diagrama de Mezcla de agua geotérmica y agua fría Na-K (mg/l). Recuperado de taller de desarrollo de un modelo geoquímico conceptual, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

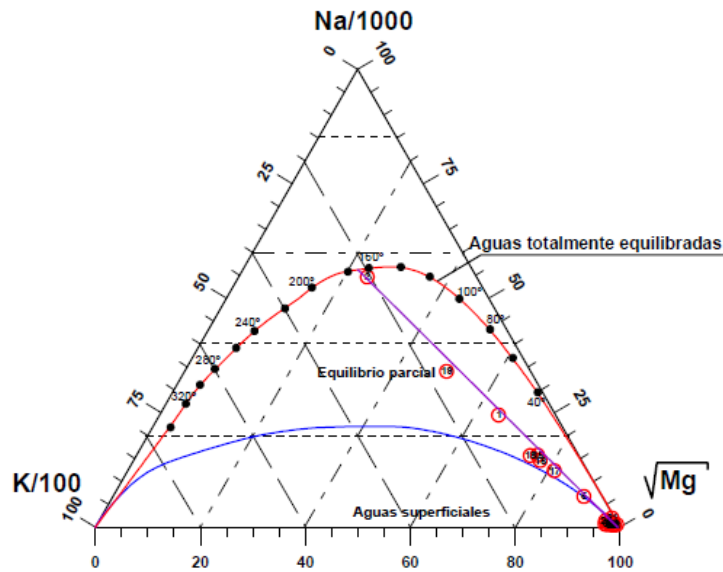


Diagrama triangular de Giggenbach, 1980 para determinar geotermómetros de K/Na y de K/Mg. Recuperado de taller de desarrollo de un modelo geoquímico conceptual, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

e) Fórmulas para geotermómetros de cationes.

Potasio-Magnesio (Giggenbach): $t(c) = \frac{4410}{13.95 - \log \frac{K2}{Mg}} - 273$

Potasio-sodio (Giggenbach): $t(c) = \frac{1390}{1.75 - \log \frac{K2}{Mg}} - 273$

Sodio-Potasio (Fournier): $t(c) = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K} + 1.483} - 273$

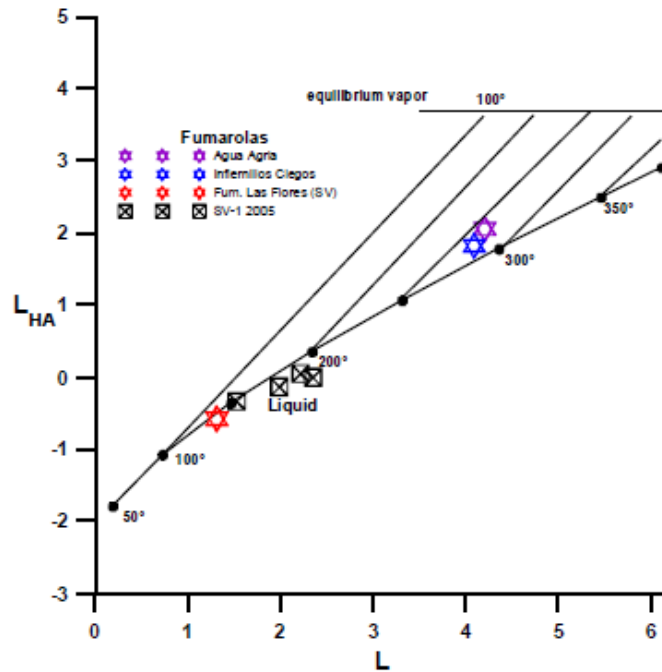
Sodio-Potasio-calcio: $t(c) = \frac{1647}{\log \frac{Na}{K} + \beta [\log \sqrt{Ca}/Na + 2.06] + 2.47} - 273$

$\beta = \frac{4}{3} \text{ si } [\log \sqrt{Ca}/Na + 2.06] \geq 0 \text{ y } t(C) \leq 100$

$\beta = \frac{1}{3} \text{ si } [\log \sqrt{Ca}/Na + 2.06] < 0 \text{ o si } t(\frac{4}{3}) > 100$

f) Diagramas para analizar geotermómetro de gases.

El geotermómetro de gases LHA-LCA de Giggenbach 1992 (basado en la razón $\log(H_2/Ar)$ y $\log(CO_2/Ar)$)



Recuperado de taller de geotermómetros, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

g) Fórmulas para geotermómetro de gases.

♦ D`Amore y Panichi:

$$t (c) = \frac{24775}{\alpha + \beta + 36.05} - 273 \text{ donde:}$$

$$\alpha = 2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2}{CO_2} - 3 \log \frac{H_2S}{CO_2} \text{ Y } \beta = 7 \log PCO_2$$

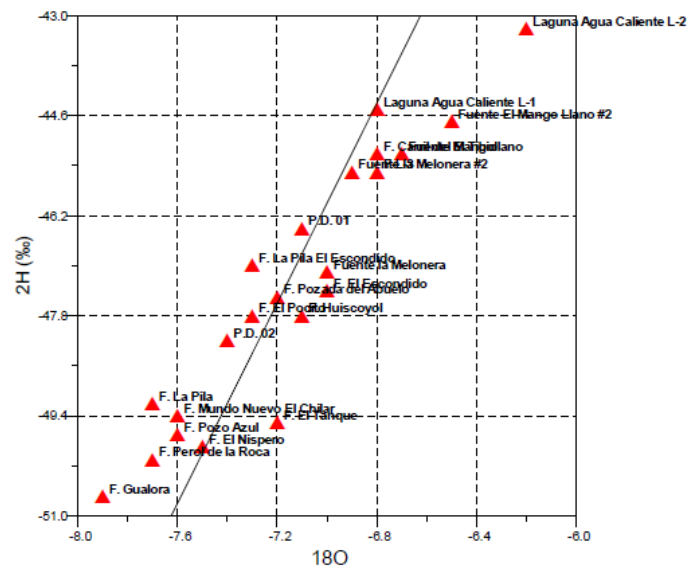
Donde $\log Pco_2 = -1$ si $CO_2 < 75\%$, o si $CO_2 > 75\%$, 1 si $CO_2 > 75\%$ y $CH_4 > 2H_2$ y $H_2S > 2H_2$

(Este es un ajuste empírico, basado en datos de pozos del campo de Larderello, Italia).

◆ Giggenbach

$$t(C) - 70 \left[2.5 + \log \frac{H3}{Ar} \right]$$

h) Diagramas para analizar geotermómetros del oxígeno 18.



Recuperado de taller de desarrollo de un modelo geoquímico conceptual, Diplomado de especialización en geotermia, edición, 2015.

i) Fórmulas para geotermómetros del oxígeno 18 en sulfatos.

$$10^3 \ln \alpha = \delta_o^{18} sulfatos^0 / 00 - \delta_o^{18} agua^0 / 00$$

j) Fórmulas para geotermómetros de deuterio.

$$10^3 \ln \alpha = \delta_{H2O}^D vapor^0 / 00 - \delta_{H2O}^D gas^0 / 00$$