



Programa Regional de Entrenamiento

Geotérmico (PREG)

Diplomado de Especialización en Geotermia-2014

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



"REQUERIMIENTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS NECESARIOS PARA EFECTUAR LA IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO GEOQUÍMICO EN ECUADOR"

Presentado Por:

Ing. Yolanda Mercedes Guijarro Altamirano (Ingeniera Química)

Director del trabajo:

Lic. Roberto Enrique Renderos Pacheco

*"No es sabio el que sabe donde está el tesoro, sino el que trabaja y lo saca"
(Francisco de Quevedo y Villegas. Escritor español)*

San Salvador, 03 de Octubre de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	3
2.	INTRODUCCIÓN	3
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
4.	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	7
5.	OBJETIVOS	9
5.1.	OBJETIVO GENERAL	9
5.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
6.	MARCO TEÓRICO	9
6.1.	FLUIDOS GEOTÉRMICOS	9
6.1.1.	Fluidos geotérmicos primarios	9
6.1.2.	Fluidos geotérmicos secundarios	12
6.2.	TOMA DE MUESTRAS	13
6.2.1.	Muestreo de manantiales calientes y pozos de agua caliente:	15
6.2.2.	Muestreo de fumarolas, vapor seco de pozos y gases de manantiales	16
6.2.3.	Muestreo de vapor húmedo en pozos	18
6.2.4.	Otros muestreos a considerar:	23
6.3.	PRESERVACIÓN DE MUESTRAS	23
6.4.	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS EN EL LABORATORIO:	24
6.5.	CONTROL DE CALIDAD:	32
7.	METODOLOGÍA	33
8.	ANÁLISIS DE DATOS	33
8.1.	APLICACIONES DE LOS RESULTADOS DEL LABORATORIO GEOQUÍMICO	33
8.2.	RESUMEN DE LOS TIPOS DE MUESTRAS A COLECTAR	33
8.3.	DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS A EJECUTAR, TÉCNICAS Y EQUIPOS A UTILIZAR EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO	34
8.4.	ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO DE LOS RECURSOS NECESARIOS PARA IMPLEMENTAR LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS EN UN LABORATORIO ORIENTADO AL CAMPO GEOTÉRMICO:	35
8.5.	Personal especializado para el manejo y ejecución de análisis	38
9.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	39
9.1.	PARÁMETROS A EJECUTAR Y TÉCNICAS A UTILIZAR EN EL LABORATORIO GEOQUÍMICO	39
9.2.	LISTADO DE EQUIPOS QUE SE REQUIEREN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS REQUERIDAS EN EL ÁMBITO GEOTÉRMICO	40
9.3.	FUNCIONES Y ACTIVIDADES A CARGO DEL PERSONAL DEL LABORATORIO:	40
9.4.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO	42
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
11.	AGRADECIMIENTOS	46
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
13.	ANEXOS	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos geotérmicos en desarrollo en Ecuador.....	4
Tabla 2. Tipos de aguas en sistemas geotermiales	13
Tabla 3. Métodos de preservación de muestras geotérmicas.....	24
Tabla 4. Parámetros a analizar en los fluidos geotérmicos y en pruebas de trazadores.....	24
Tabla 5. Posibles escenarios para realizar la compra de equipos	36
Tabla 6. Datos del estudio de prefactibilidad del proyecto Chachimbiro - Ecuador	37
Tabla 7. Precios por servicios de muestreo y análisis en laboratorios geotérmicos	38
Tabla 8. Métodos a aplicar para la ejecución de análisis físico-químicos de interés geotérmico.....	39
Tabla 9. Lista de equipos de campo para análisis geoquímico.....	40
Tabla 10. Resumen de análisis económico para recuperar la inversión.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización de áreas geotermiales en el continente ecuatoriano.....	5
Figura 2. Fotografía del Laboratorio de Control Químico CELEC E.P Termopichincha	7
Figura 3. Disminución de la fuerza ácida del ión bisulfato (HSO_4^-) con el aumento de la temperatura.....	11
Figura 4. Equipo para toma de muestras de aguas termales.....	15
Figura 5. Equipo para toma de muestras de vapor de fumarolas (A y B) y gases burbujeantes que atraviesan aguas termales (C).....	17
Figura 6. Muestreo de fumarolas El Playón en Ahuachapán - El Salvador.....	17
Figura 7. Equipo para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo	19
Figura 8. Muestreo de agua usando un separador Webre en la línea bifásica del pozo 16-A en la Central Geotérmica Ahuachapán - El Salvador.....	21
Figura 9. Equipos para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo utilizando separador Webre	22
Figura 10. Organigrama referencial de un laboratorio químico	40

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I.....	49
ANEXO II.....	50
ANEXO III.....	51
ANEXO IV	52
ANEXO V	53
ANEXO VI	54
ANEXO VII	55

1. RESUMEN

En el presente trabajo se describen los recursos necesarios para implementar las técnicas de análisis de los fluidos de origen geotérmico y superficial que contribuyan con el avance en los prospectos geotérmicos que se encuentran en estudio en el Ecuador.

El muestreo de fluidos geotérmicos requiere técnicas específicas de recolección para obtener muestras representativas, debido a la elevada temperatura y al efecto de enfriamiento de las muestras al exponerlas a la atmósfera.

Se han definido los diferentes ensayos que se requieren efectuar en un laboratorio geoquímico para apoyar en las diferentes etapas de los proyectos geotérmicos inicialmente en las fases de reconocimiento y exploración y posteriormente en las etapas de desarrollo, producción y mantenimiento, para colaborar principalmente en las actividades a cargo del área geoquímica así como también en las áreas de producción y medio ambiente.

También se detalla un listado de equipos a ser utilizados para ejecutar las distintas técnicas de análisis, y se presenta un resumen de la importancia de su determinación, al momento de realizar la interpretación de resultados.

Finalmente el estudio presenta una evaluación de los recursos tanto humanos, técnicos y económicos que se requieren para efectuar la implementación de un laboratorio geoquímico.

2. INTRODUCCIÓN

El impulso promovido por el gobierno nacional del Ecuador para el desarrollo de las energías renovables tales como solar, fotovoltaica, eólica, biocombustibles, biomasa, geotermia, etc. pretende aportar con el cambio de la matriz energética que actualmente está representada por un 53 % del uso de recursos hídricos, 44 % de combustibles fósiles derivados del petróleo y un 3 % de otras fuentes tales como eólica, biomasa y solar (Muñoz, 2013).

Específicamente el recurso geotérmico, en el Ecuador ha sido estudiado desde 1979 (Lloret & Labus, 2014), con el objetivo de aprovechar el recurso de alta temperatura para la producción de energía eléctrica, y el de media y baja temperatura para aplicaciones directas tales como criaderos de peces, acondicionamiento de temperatura en invernaderos, calefacción doméstica y aplicaciones industriales diversas.

En cualquier campo de investigación, el contar con resultados confiables emitidos por parte de un laboratorio de análisis, se vuelve de gran importancia, al momento de la toma de decisiones, es así que se ha considerado oportuno el implementar un Laboratorio Geoquímico, para efectuar análisis físico-químicos que cumpla con altos estándares de calidad y confiabilidad y de esta manera colaborar con el avance y desarrollo de los proyectos geotérmicos en el Ecuador.

Dentro de algunos prospectos que están siendo investigados en el Ecuador se encuentran los descritos en la Tabla 1, los cuales al momento se encuentran en diferentes etapas de investigación.

Tabla 1. Proyectos geotérmicos en desarrollo en Ecuador

N°	Ubicación	Etapas del proyecto	Potencial Geotérmico	Estudios realizados	Año de Estudios	Temperaturas
1	Chachimbiro (Complejo volcánico Yanahurco y Huanguillaro)	Prefactibilidad (se puede iniciar exploración profunda)	81 MWe	Geoquímica de fluidos (aguas e isótopos)	2005	Geotermómetros indican temperaturas de aproximadamente 235°C
				Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	2011	Se ratifica temperatura del reservorio alrededor de 235°C, y además con geotermómetros se predice una temperatura de 260°C.
2	Chacana (caldera volcánica Cachiyacu - Jamanco - Oyacachi)	Prefactibilidad (se puede iniciar exploración profunda)	1 480 MWe	Estudios geocientíficos (geología y geoquímica)	2010	Se encuentran tres áreas principales de interés geotérmico: Cachiyacu (Tr 250 °C), Jamanco (Tr 200 °C) y Oyacachi (Tr 150°C).
				Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	2011 - 2012	Cachiyacu (Tr 230 °C), Jamanco (Tr 140 - 180 °C)
3	Chalupas (caldera volcánica)	Prefactibilidad	283 MWe	Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	Desde 1985	Se estima una Tr > 180°C
4	Tufiño (volcán Chiles)	Prefactibilidad	138 MWe	Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	En la '80 y retomado en 2014	Con geotermómetro de gases se proyecta Tr 230°C
5	Chalpatán (caldera volcánica)	Prefactibilidad (se puede iniciar exploración profunda)	Sólo para usos directos	Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	2013	Se estiman Tr entre 70 - 120 °C
6	Alcedo (Isla Isabela - Galápagos)	Prefactibilidad	150 MWe	Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	1994	Se estiman Tr entre 260 - 320 °C
7	Cuenca	Prefactibilidad	Sólo para usos directos	Estudios geocientíficos (geología, geoquímica y geofísica)	Desde 2001 y retomado 2014	Se estiman T entre 100 - 140 °C
8	Chimborazo	Reconocimiento y Exploración	---	Estudios geocientíficos (geología y geoquímica) no hay geofísica	2010	Se estiman Tr entre 120 - 150 °C
9	Guapán	Reconocimiento y Exploración	---	---	2010	T en superficie de manantiales de 49.6 °C

Por ejemplo para el caso del prospecto geotérmico Chachimbiro, los estudios geocientíficos del 2012 definieron una probabilidad estimada de éxito de alrededor del 65% en la exploración encaminada a descubrir un recurso de temperatura moderada a alta, es así que para este caso en específico se realizará una perforación exploratoria en el año 2015 para verificar la temperatura, con el fin de disminuir el riesgo y encontrar si existe la viabilidad de un recurso de moderada a alta temperatura para así proceder a la perforación de evaluación si los resultados son positivos (Servicios y Remediación S.A., 2012). El proyecto actualmente está en proceso de la definición de los términos de referencia para contratar la perforación de pozos exploratorios de diámetro reducido.

En la Figura 1 se presentan un mapa de la localización de los prospectos geotérmicos.

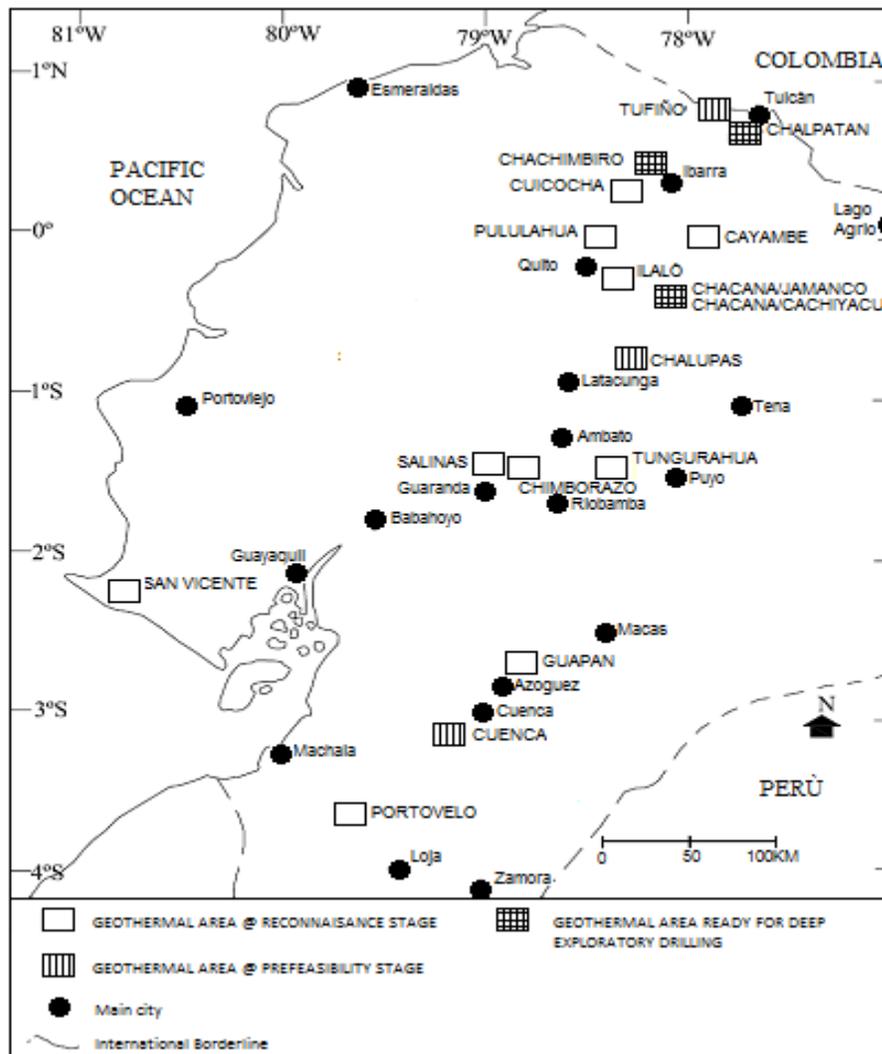


Figura 1. Mapa de localización de áreas geotermias en el continente ecuatoriano

(Almeida, INECEL, 1990)

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El gobierno nacional del Ecuador en los últimos años ha orientado su política de estado a impulsar la investigación científica en los diferentes campos de desarrollo estratégico, es así que en el campo de la energía, se han venido desarrollando varios proyectos con la finalidad de diversificar la matriz energética del Ecuador, que durante décadas ha basado su producción en los recursos hidroeléctricos y en la quema de combustibles provenientes del petróleo.

La energía geotérmica en Ecuador actualmente se encuentra aplicada únicamente al uso directo en balneología. Existen al momento 11 prospectos que se encuentran en su etapa de estudios de prefactibilidad: Chachimbiro, Chalpatán, Chacana-Jamanco, Chalupas, Guapán, Chacana-Cachiyacu, Tufiño, Chimborazo, Chacana-Oyacachi, Baños de Cuenca y Alcedo. De los cuales, en el 2015 se proyecta realizar exploración profunda mediante perforación de pozos de diámetro reducido, a cargo de CELEC E.P. Termopichincha, en la zona de Chachimbiro, para evaluar la temperatura que podría tener este sitio de interés geotérmico y disminuir el riesgo de inversión. Así también el prospecto geotérmico Tufiño-Chiles que es un proyecto binacional ubicado en la frontera entre Ecuador-Colombia, se encuentra en estudios de superficie con planes para ejecutar actividades como: datación de las rocas, geoquímica de gases y realizar un estudio exhaustivo de geofísica mediante MT, para elaborar un modelo conceptual geotérmico y definir la temperatura que se tendría en ese campo. Por otro lado el INER, se encuentra estudiando el prospecto Baños de Cuenca, para evaluar el origen de los fluidos y definir la posible temperatura, que permitirá el uso directo del recurso geotérmico (Lloret & Labus, 2014).

De esta manera se indica, la importancia de contar con un Laboratorio Geoquímico en el Ecuador para avanzar de manera sostenible y eficaz con desarrollo de la energía renovable con base a los recursos geotérmicos que dispone el Ecuador. El potencial total geotérmico se ha estimado en 3 000 MWe, lo cual no es nada raro, conociendo que el país está atravesado por más de 40 volcanes activos (Lloret & Labus, 2014).

La implementación de un Laboratorio Geoquímico, también necesitará el contar con personal competente y profesionales capacitados, que puedan interpretar los datos obtenidos para realizar el diseño de modelos conceptuales que vinculen los datos de laboratorio con lo disponible en la superficie del campo en estudio.

Es importante indicar que los análisis realizados en la fase de exploración superficial, exploración profunda, desarrollo y producción de un campo geotérmico serán los mismos en todo momento, lo único que se debe tener en cuenta es la finalidad de cada uno de ellos y los objetivos que se persigue con su determinación. Con esto es posible confirmar que la inversión de los equipos requeridos para la implementación del Laboratorio geoquímico será para largo plazo, permitiendo lograr su recuperación en

función de la demanda de análisis que serían directamente proporcionales al costo que el proyecto se ahorraría por el envío de muestras a un laboratorio externo, para que se ejecuten los análisis específicos los fluidos de origen geotérmico o superficial, que por lo general se encuentran fuera del Ecuador.

Actualmente CELEC E.P. Termopichincha dispone de un Laboratorio de Control Químico ubicado en la provincia de Pichincha, el cual se encuentra en proceso para obtener su Acreditación bajo la Norma ISO-IEC 17025, este laboratorio cuenta con una infraestructura que cumple con altos estándares de seguridad ambiental y ocupacional, y corresponde al sitio en el cual se podría implementar las técnicas requeridas para los análisis geotérmicos. En la Figura 2 se presenta una fotografía del laboratorio de CELEC E.P. Termopichincha en el cual se puede evaluar la implementación de las técnicas requeridas.



Figura 2. Fotografía del Laboratorio de Control Químico CELEC E.P Termopichincha

4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Los métodos geoquímicos de exploración geotérmica han cumplido un rol muy importante en la exploración geotérmica desde comienzos de 1960 (Gupta, 2007). Durante la etapa previa a la perforación, la geoquímica provee información de las condiciones y procesos en profundidad que no podría obtenerse con otras técnicas de

exploración. Esto es gracias a que las aguas y gases normalmente son modificados por los procesos que ocurren en profundidad.

El proyecto que se propone, tiene principal influencia sobre el área Geoquímica, ya que mediante resultados confiables, de un Laboratorio Geoquímico competente, se puede colaborar en el avance de las diferentes etapas de un proyecto geotérmico, entre los cuales se puede mencionar:

En Exploración mediante la composición química se puede:

- Clasificar los diferentes tipos de aguas y fumarolas.
- Determinar el origen de los fluidos y la zona de recarga de un sistema.
- Definir la dirección de flujo del fluido geotérmico, así como zonas de recarga y descarga del sistema, esto por medio de la composición isotópica.
- Estimar la temperatura del reservorio a través de geotermómetros.
- Establecer los límites de las zonas de anomalía.

En Evaluación de pozos:

- Determinar la química de fluido descargado, es así que se puede realizar monitoreos desde su composición inicial hasta llegar a definir los problemas potenciales que se puedan llegar a tener con los GNC (Gases no condensables) e IS (Índices de saturación).
- Determinar características químicas de las zonas de producción ó alimentación.
- Confirmar la temperatura del yacimiento a través de geotermometría.

En Explotación:

- Monitorear la evolución de los campos geotérmicos en explotación, así como los problemas asociados al control, evolución, producción, procesos en el reservorio, etc.
- Evaluar los efectos de la reinyección en los campos geotérmicos, utilizando trazadores químicos.
- Definir químicamente la calidad del fluido y considerar si existe riesgo potencial de incrustación y corrosión.

En Medio Ambiente:

- Evaluar la calidad del agua de acuíferos someros dentro del sistema geotérmico.
- Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero y H₂S

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar los requerimientos técnicos y económicos necesarios para efectuar la implementación de un laboratorio geoquímico en Ecuador.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros físico-químicos, que son necesarios para contribuir con el área geoquímica en el desarrollo de los proyectos geotérmicos dentro en sus diferentes etapas.
- Elaborar un listado de equipos que se pueden utilizar.
- Determinar las condiciones ambientales, físicas y de personal que son requeridas para cada método de análisis.
- Establecer un organigrama referencial para el personal técnico del laboratorio así como sus funciones.
- Elaborar un análisis técnico - económico de los recursos requeridos para implementar un laboratorio geoquímico.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. FLUIDOS GEOTÉRMICOS:

Los fluidos geotérmicos se dividen en dos categorías principales, basándose en los procesos de diferenciación geoquímica que tienen lugar durante la evolución del fluido. Estas categorías son: fluidos primarios y fluidos secundarios.

6.1.1. Fluidos geotérmicos primarios:

Pueden ser una mezcla constituida de dos o mas fluidos tales como agua meteórica, agua de mar y/o volátiles magmáticos. Entre los principales tipos de fluidos primarios se encuentran las aguas Na-Cl, aguas sulfatadas y sal muertas de alta salinidad (Arnórsson *et al.*, 2007).

Los procesos más importantes que conducen a la formación de fluidos geotérmicos secundarios son:

- 1) Ebullición por despresurización.
- 2) Separación de fases de fluidos salinos.
- 3) Condensación de vapor, en agua subterránea poco profunda o agua superficial para producir aguas: ácido-sulfatadas, carbonatadas o bicarbonatadas sódicas.
- 4) Mezcla de CO₂ gaseoso de una fuente profunda con agua termal subterránea.
- 5) Mezcla de fluidos geotérmicos con agua subterránea más somera y fría.

Aguas Cloruradas: La principal sal disuelta en este tipo de aguas es el NaCl, es el agua más común en sistemas geotermales. Estas sales están menos concentradas en aguas alojadas en rocas basálticas, pero se encuentran más concentradas en fluidos que han estado en contacto con rocas sedimentarias. Las concentraciones de los elementos principales en aguas Na-Cl se determina por el equilibrio local con minerales secundarios, cuando la temperatura supera los 100 a 150 °C. El único componente conservativo en estas aguas es el Cl. Las concentraciones de muchos elementos traza (como, Ag, Fe, Cu, Pb, Zn) en aguas geotérmicas Na-Cl, están claramente controladas por la deposición mineral. Estos elementos forman típicamente cationes en solución (Arnórsson *et al.*, 2007). Presentan un color azul en manantiales naturales y tienen un pH muy cercano al neutro. La presencia de depósitos de sílice es característica de manantiales clorurados en ebullición.

El ión cloruro en este tipo de aguas se encuentra presente entre 0.1 a 1.0 % w/w, se puede comparar con el agua de mar que contiene 1.9 % w/w de Cloruros. Otro de los solutos importantes incluye el sodio, potasio, calcio y el magnesio que corresponden a los cationes. Además las aguas cloruradas contienen altas concentraciones de sílice (SiO₂), concentraciones significativas de bicarbonatos (HCO₃⁻) y concentraciones detectables de fluoruro, amonio (NH₃), boro, arsénico, litio, rubidio y cesio. El azufre acuoso está presente en cantidades variables, principalmente como sulfuro de hidrógeno (H₂S o HS⁻) con menor cantidad de sulfatos, dependiendo el grado de oxidación atmosférica. Los sulfatos pueden alcanzar concentraciones de unos pocos cientos de ppm en aguas de manantiales y en reservorios generalmente son muy bajos (<30 ppm). Por lo tanto la relación Cl/SO₄ son altas. El aluminio y el hierro están presentes sólo en cantidades de trazas en aguas cloruradas (Simmons, 1998).

Aguas Sulfato-ácidas: Los fluidos sulfato-ácido profundo han sido encontrados en muchos sistemas geotérmicos volcánicos, particularmente asociados con volcanes andesíticos, tienen bajo contenido de cloruros. La acidez es causada por el ácido clorhídrico (HCl), por el ión bisulfato (HSO₄⁻) y en algunos casos por ambos, evidencias indican que éstos son formados principalmente por la transferencia de ácido clorhídrico (HCl) y dióxido de azufre (SO₂) desde la fuente de calor magmático al fluido de circulación. Al medir el pH (a 25 °C) en un agua sulfato-ácida colectada en el cabezal del pozo se pueden tener pH tan bajos como 2. Sin embargo el pH del agua es casi neutro a altas temperaturas en el acuífero. La acidez producida en el enfriamiento está relacionada con el incremento de la fuerza ácida del ión HSO₄⁻ y con la disminución de la temperatura (Figura 3) (Arnórsson *et al.*, 2007). El Cl en el vapor se transporta como HCl. Una alta concentración de Cl en el vapor es debido a la evaporación de salmuera.

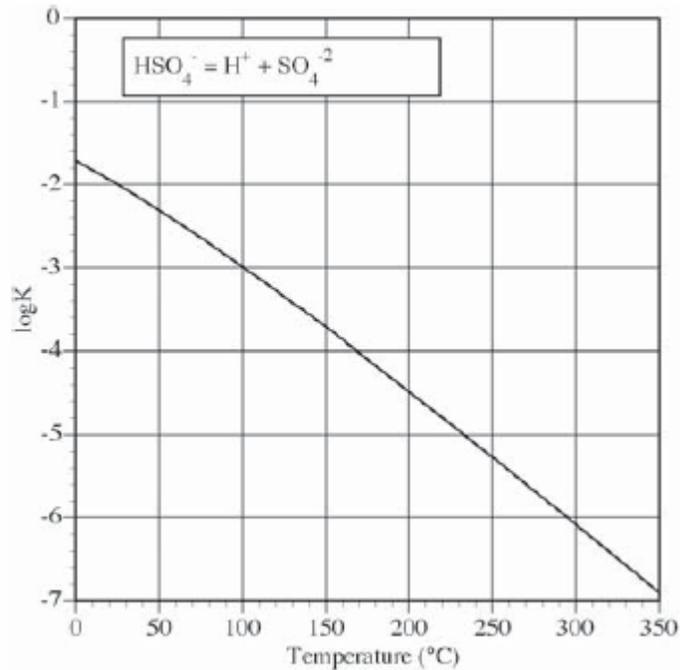


Figura 3. Disminución de la fuerza ácida del ión bisulfato (HSO_4^-) con el aumento de la temperatura (Arnórsson *et al.*, 2007).

La oxidación de H_2S produce ácido sulfúrico el cual causa que esta agua sea ácida.

$$\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 = \text{H}_2\text{SO}_4$$

Algunas aguas sulfato-ácidas existen en los flancos y en las cumbres de volcanes activos y contienen apreciables concentraciones de cloruros (> 1000 ppm Cl), de hecho la presencia de las altas concentraciones de Cl^- es la principal forma como se puede distinguir las aguas sulfato-ácidas de origen volcánico a partir de aguas sulfato-ácidas calentadas por vapor (Simmons, 1998).

Aguas de alta salinidad (salmueras): Las salmueras geotérmicas se pueden formar de varias maneras. Los procesos de formación de salmuera incluyen la disolución de evaporitas por agua de origen meteórico y la reacción entre algunos minerales primarios de rocas volcánicas y HCl magmático.

Las salmueras se pueden formar también por la separación de fases de fluidos a través del enfriamiento y despresurización. Muchos metales (Ag, Au, Cu, Mo, Pb, Sn, W, Zn) forman complejos con los iones Cloruro (Cl^-), Bisulfuro (HS^-) e hidróxidos (OH^-) a temperaturas magmáticas que participan fuertemente durante la cristalización. Como este fluido se escapa de la masa fundida de la roca, estos metales junto con los gases magmáticos son transportados en el fluido geotérmico. La mezcla de los fluidos magmáticos y fluidos geotermales y su posterior interacción con los minerales que

forman las rocas permite la formación de salmuera, si el magma es rico en HCl. El enfriamiento y la transformación de SO_2 magmático en H_2S conduce a la precipitación de sulfuros metálicos (Arnórsson *et al.*, 2007).

El ejemplo más común de salmuera es el agua de mar que contiene entre 10 000 - 100 000 ppm de cloruros con altas concentraciones de Na, K y Ca.

Los diagramas ternarios son los gráficos más utilizados para representar las diferentes composiciones del agua, pero es importante indicar que las salmueras no se pueden representar en este tipo de diagramas (Simmons, 1998).

6.1.2. Fluidos geotérmicos secundarios:

Aguas sulfato ácidas calentadas con vapor: En muchos campos geotérmicos de alta temperatura las manifestaciones superficiales más representativas son las fumarolas, también están las aguas superficiales calentadas con vapor y suelo alterado intensamente caliente. La condensación del vapor de H_2S , soportada por la pérdida de calor o la mezcla con agua superficial y la oxidación del H_2S , conduce a la formación de azufre nativo, tiosulfato, varios polisulfuros y sulfatos.

Las aguas sulfato-ácidas calentadas con vapor se caracterizan por una baja concentración de cloruros y relativamente alta concentración de sulfatos. No es raro que el pH de estas aguas sea <1 . Debido a su bajo pH, estas aguas a menudo contienen muchos metales (por ejemplo, Al, Fe, Mn, Cr) en altas concentraciones. El agua ácida disuelve eficazmente los minerales primarios de rocas volcánicas comunes dejando un residuo rico en sílice amorfa, sulfuros, sulfato de aluminio y esmectita o caolinita (Arnórsson *et al.*, 2007).

Aguas bicarbonatadas: Son también conocidas (aguas ricas en CO_2), las aguas termales y no termales ricas en carbonatos son particularmente comunes en zonas de actividad volcánica, pero también se encuentran en zonas sísmicamente activas carentes de actividad volcánica. Además, las aguas- CO_2 se producen en los límites de los sistemas geotérmicos volcánicos (por ejemplo, volcanes activos). Algunas aguas- CO_2 se forman mediante la mezcla de las aguas del manto con aguas subterráneas o superficiales. En sistemas geotérmicos volcánicos las aguas- CO_2 se pueden formar por condensación de vapor que contiene CO_2 .

Las aguas bicarbonatadas generalmente se forman en regiones del subsuelo poco profundo, donde el gas CO_2 es absorbido y el vapor condensa en el agua subterránea; la condensación del vapor calienta el agua subterránea por lo que el término vapor calentado es usado frecuentemente. El sodio generalmente es el catión principal ya que el carbonato de calcio no es muy soluble y el potasio y el magnesio se fijan en las arcillas.

Las aguas bicarbonatadas se forman en el nivel freático donde se encuentran como ácidos débiles, y pierden el CO_2 disuelto durante el ascenso a la superficie

incrementando así su pH en la descarga natural en pHs neutros o ligeramente alcalinos.

El deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) indican que las aguas- CO_2 son de origen meteórico. Las bicarbonatadas mineralizan considerablemente porque el CO_2 hace que el agua sea muy reactiva debido a su pH relativamente bajo, aumentando así la tasa de disolución de muchos minerales que forman las rocas primarias.

Aguas de mezcla: En la zona de up-flow de los sistemas geotermales asciende agua en ebullición o no, y se puede mezclar con agua somera. Alternativamente, el fluido térmico que se mezcla con el agua subterránea más fría puede estar en dos fases (líquido y vapor). Estas aguas han sido estudiadas con el objetivo de evaluar la temperatura del componente agua caliente en la mezcla de agua, en gran medida para fines de exploración geotérmica.

Una de las clasificaciones más difundidas, para las aguas geotérmicas es la basada en el contenido aniónico y catiónico predominante.

Los **aniones** que con mayor frecuencia se encuentran en las aguas geotérmicas son: bicarbonato, sulfato, cloruro y sulfuro, y los **cationes**: sodio, calcio y magnesio.

Es así que para denominar un tipo de agua su nombre se compone, en función de los aniones y cationes dominantes. En la Tabla 2, se presentan algunos ejemplos de las aguas que se tendrían, bicarbonatado-sódicas, sulfato-magnésicas, bicarbonatado-sódico magnésicas, etc. Casi todas las combinaciones son posibles, aunque no todas son igual de frecuentes.

Tabla 2. Tipos de aguas en sistemas geotermales

Tipo de agua	Rango aproximado de pH	Aniones principales
Agua subterránea	6 - 7.5	Trazas de HCO_3^-
Agua clorurada	4 - 9	Cl, menos HCO_3^-
Agua cloruro-bicarbonatada	7 - 8.5	Cl, HCO_3^-
Agua bicarbonatada	5 - 7	HCO_3^-
Agua sulfato-ácida	1 - 3	SO_4^{2-} , trazas de Cl
Aguas cloruro sulfato-ácidas	1 - 5	SO_4^{2-} , Cl

(Simmons, 1998)

6.2. TOMA DE MUESTRAS

La recolección de muestras para el análisis químico, es importante que se realice correctamente porque todos los pasos posteriores dependen de ello. Existen varios riesgos inherentes a la recolección de las muestras geotérmicas, el terreno puede ser traicionero y se puede requerir el manejo de productos químicos peligrosos. Por lo tanto existe una necesidad evidente de personal bien capacitado con conocimiento de los posibles errores e interferencias para llevar a cabo esta tarea. Los errores más comunes cometidos durante el muestreo implica el uso de recipientes inadecuados, limpieza inadecuada y el tratamiento inadecuado para la conservación de las muestras

(Ármansson & Ólafsson, 2007). Las estrategias de muestreo y análisis de las aguas naturales que circulan en un área geotérmica a ser investigada, dependen principalmente de la magnitud y del estado de avance de cada proyecto en específico, también dependen de los fondos disponibles y las limitaciones logísticas que existan.

No es aconsejable, para analizar un gran número de parámetros químicos e isotópicos muestrear un pequeño número de muestras ni para determinar un pequeño número de parámetros muestrear un gran número de muestras. Esto debido, que el sobre muestreo no es posible porque las muestras de agua son estables durante periodos de tiempo limitados. La mejor estrategia es recolectar muestras de un número razonable aguas termales y no termales, distribuidas por toda la zona a investigar, y ejecutar los análisis a la brevedad posible.

En lo posible, la campaña hidrogeoquímica debe llevarse a cabo al final de la estación seca, para obtener muestras de agua menos afectadas por la mezcla con el agua lluvia superficial (Marini, 2000).

Para realizar la toma de una muestra representativa, de un fluido geotérmico se requiere de técnicas específicas, esto debido a que algunos componentes en los fluidos geotérmicos permanecen estables durante el almacenamiento, mientras que otros pueden reaccionar y cambiar su concentración, de tal manera que se debe tomar en cuenta este detalle durante la toma de muestra, y la conservación de las mismas. Para algunos componentes, se pueden obtener mejores resultados realizando análisis in situ.

El tratamiento para la conservación de las muestras durante la recolección depende del método analítico a ser utilizado. Es, por lo tanto, esencial decidir qué componentes deben ser analizados en los fluidos geotérmicos y qué métodos se van a utilizar, antes de iniciar la recolección de las muestras. También durante la toma de muestras será necesario anotar algunos datos físicos que son necesarios para la interpretación de la composición química e isotópica de los fluidos geotérmicos, como por ejemplo, para pozos de vapor húmedo es necesario disponer de información sobre la presión de muestreo, la entalpía de descarga y el nivel de profundidad.

A continuación se presenta un resumen de los procedimientos de muestreo que se aplican para: manantiales calientes, pozos de agua caliente, fumarolas, pozos de vapor seco y pozos de vapor húmedo. En 1975 Giggenbach, desarrolló una pequeña botella para muestreo de gases, la cual es conocida como "botellas de Giggenbach", ésta botella se llena parcialmente con una solución básica fuerte para colección de vapor geotérmico y gases volcánicos que es muy utilizada en todo el mundo.

6.2.1. Muestreo de manantiales calientes y pozos de agua caliente:

Antes de iniciar con el muestreo de fluidos geotérmicos en un campo de interés determinado, es muy útil disponer de información sobre la distribución de las manifestaciones termales en la zona, así como de las temperaturas y velocidades de flujo de los manantiales. Se deben seleccionar sitios específicos para el muestreo, considerando criterios tales como la temperatura. El análisis de aguas subterráneas y superficiales es importante para evaluar la existencia o no de mezcla del agua geotérmica con aguas poco profundas en zonas de flujo ascendente; el diseño para los pozos de agua caliente es similar, excepto que se conecta un serpentín de refrigeración al cabezal del pozo o a una tubería del pozo, ver A de la Figura 4. Si la temperatura del agua es menor de 40° C, no será necesario un serpentín de enfriamiento, al igual que cuando un pozo, este presurizado, no será necesaria una bomba peristáltica para filtrar la muestra. El diseño del aparato necesario para recoger las muestras de aguas se presenta en B de la Figura 4. Si la abertura es pequeña y en una pendiente, es conveniente colocar un embudo justo debajo de la abertura y dejar que el flujo de agua baje por gravedad en el tubo a la bomba peristáltica.

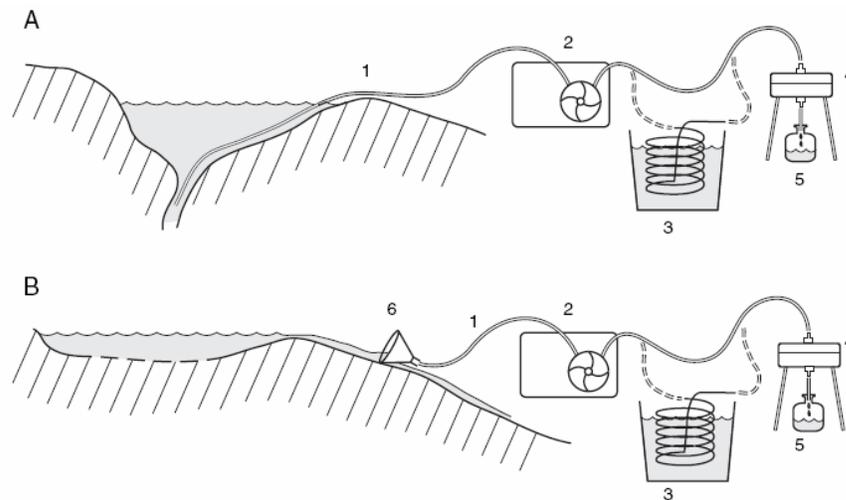


Figura 4. Equipo para toma de muestras de aguas termales.
(Arnorsson, *et al.*, 2006)

(1) tubo de silicona de 1/4" de diámetro. (2) bomba peristáltica (3) recipiente con agua fría y serpentín de refrigeración de acero inoxidable (N316). (4) soporte de filtro de teflón con 20 cm de diámetro membrana de filtro de 0,2 µm. (5) botella para la muestra. (6) embudo, de diámetro de 10 cm que se adapte a los tubos de silicona.

Las muestras para determinación de isótopos estables de hidrógeno ($\delta^2\text{H}$), oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y carbono $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{C}$ deben ser enfriadas, filtradas y almacenadas en botellas de vidrio con tapas herméticas para evitar la evaporación y el intercambio con la atmósfera. Para la determinación de isótopos de carbono, la muestra debe ser dosificada con unas cuantas gotas de solución 1% HgCl_2 para impedir los cambios en el contenido de isótopos de carbono por la actividad biológica.

6.2.2. Muestreo de fumarolas, vapor seco de pozos y gases de manantiales

Las fumarolas seleccionadas para muestrear pueden ser pequeñas pero lo importante es que tengan una buena descarga de vapor y que salgan a una velocidad considerable.

En lo posible se deben evitar charcos de lodo o de agua superficial calentados con vapor. La fase gaseosa descargada de estas manifestaciones termales tiende a tener bajas concentraciones de H_2S debido a que se oxidan con el oxígeno disuelto del agua superficial a través de la cual pasa el vapor. El muestreo y análisis de vapor de las fumarolas proporciona información sobre las concentraciones de gases en el vapor.

Puede haber confusión con el aire caliente y húmedo que emerge de la tierra caliente, porque puede parecer una fumarola, pero al momento de medir su temperatura se podrá demostrar que no lo es, es por esto que es importante medir la temperatura al momento del muestreo con el fin de eliminar dudas sobre la naturaleza de la descarga.

Los tipos de muestras de vapor de fumarolas que se recojan dependerá de los parámetros de control físico-químicos y componentes isotópicos que se van a analizar. Hay tres tipos de muestras de gas que se pueden recolectar en fumarolas y aguas termales, (ver Figura 5):

A) Descarga total de una fumarola: Proporciona las concentraciones absolutas de los gases en el vapor (por ser la descarga total de la fumarola). Es aconsejable utilizar este método, Figura 6.

B) Fracción de gas a la descarga de una fumarola.

C) Gases burbujeantes que emergen de fuentes calientes. Los métodos B y C proporcionan las concentraciones relativas de los gases, porque parte del CO_2 y H_2S se disuelve en el condensado del vapor.

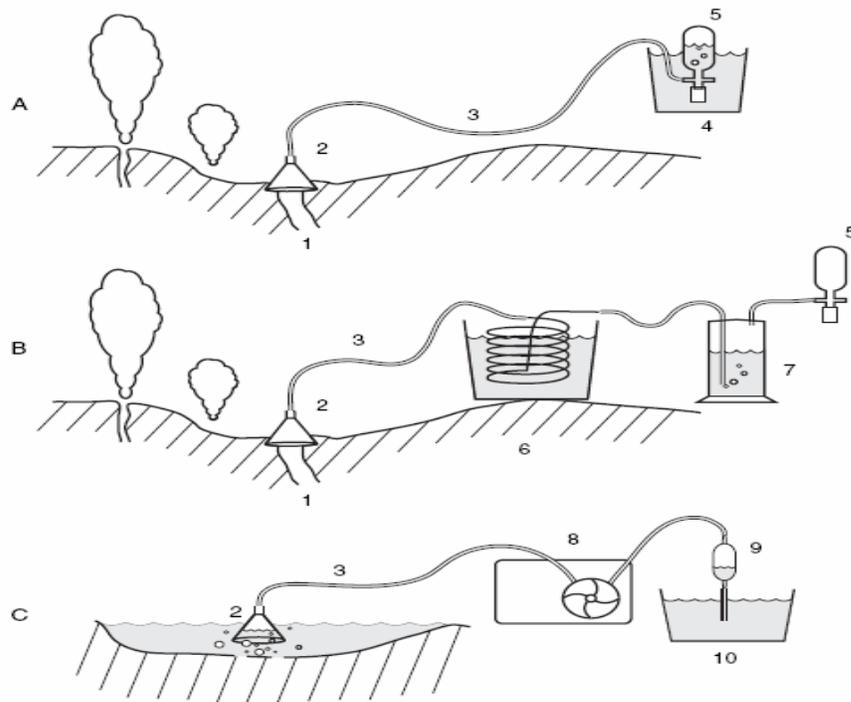


Figura 5. Equipo para toma de muestras de vapor de fumarolas (A y B) y gases burbujeantes que atraviesan aguas termales (C).
 (Arnorsson *et al.*, 2006)

(1) salida de vapor, (2) Embudo, (3) manguera de silicona de diámetro 1/4" de pared gruesa (es permeable a los gases pero permite su uso en un amplio rango de temperatura (0-100 °C). Se puede usar manguera de Tygon que tiene muy baja permeabilidad a la mayoría de los gases. (4) Balde con agua de fría, (5) Bombilla de muestreo de gases, 300 ml, (6) Balde con agua fría, y serpentín de enfriamiento hecho de acero inoxidable (N316). (7) la botella de lavado (aproximadamente 300 ml) para coleccionar el condensado. (8) bomba peristáltica. (9) botella de muestreo con válvulas de cierre en ambos extremos, 300 ml, (10) balde pequeño con agua para evitar entrada de aire en el bulbo.



Figura 6. Muestreo de fumarolas El Playón en Ahuachapán - El Salvador.

La fase de gas en el vapor geotérmico contiene en gran medida CO_2 y H_2S (> 90% en volumen). Con la finalidad de obtener mejores resultados analíticos para los gases menos abundantes (He , H_2 , CO , CH_4 , N_2 , O_2 , Ar), la práctica más común es recoger muestras en botellas que contienen una solución de NaOH (50 ml, 4 M) o KOH (10 ml, 50% w/v). El CO_2 y H_2S presente en el vapor se disuelve cuantitativamente en la solución alcalina, concentrando así los gases restantes en el espacio de cabeza por encima de la solución y permitiendo su determinación más precisa mediante cromatografía de gases.

El procedimiento para el **muestreo de vapor seco en pozos** es el mismo que para fumarolas según el método A de la Figura 5, pero en este caso el tubo está conectado a la cabeza del pozo o una tubería. La descarga de pozos de vapor seco puede contener algunas gotas de agua y sólidos. Para obtener muestras representativas de dichas descargas se necesita utilizar una boquilla de muestreo isocinético.

6.2.3. Muestreo de vapor húmedo en pozos

La extracción de vapor húmedo de pozos, se lo realiza para reservorios geotermiales de líquido dominante con temperaturas > 100°C , la descarga en estos pozos es una mezcla de agua y vapor.

El vapor se forma cuando se da una ebullición por despresurización, pero una fracción mínima de la misma puede estar presente inicialmente en el yacimiento (reservorio de dos fases) o se puede formar por transferencia de calor por conducción desde la roca del acuífero al fluido del pozo en la zona de despresurización.

Para obtener muestras representativas de la descarga de pozos, es necesario recoger por separado cada una de las fases, agua líquida y vapor. Esto se puede hacer con un separador de vapor en el cabezal del pozo, que separa la descarga total, Figura 7.

O utilizando un separador Webre que se conecta en la tubería bifásica que transporta el fluido descargado desde el cabezal del pozo.

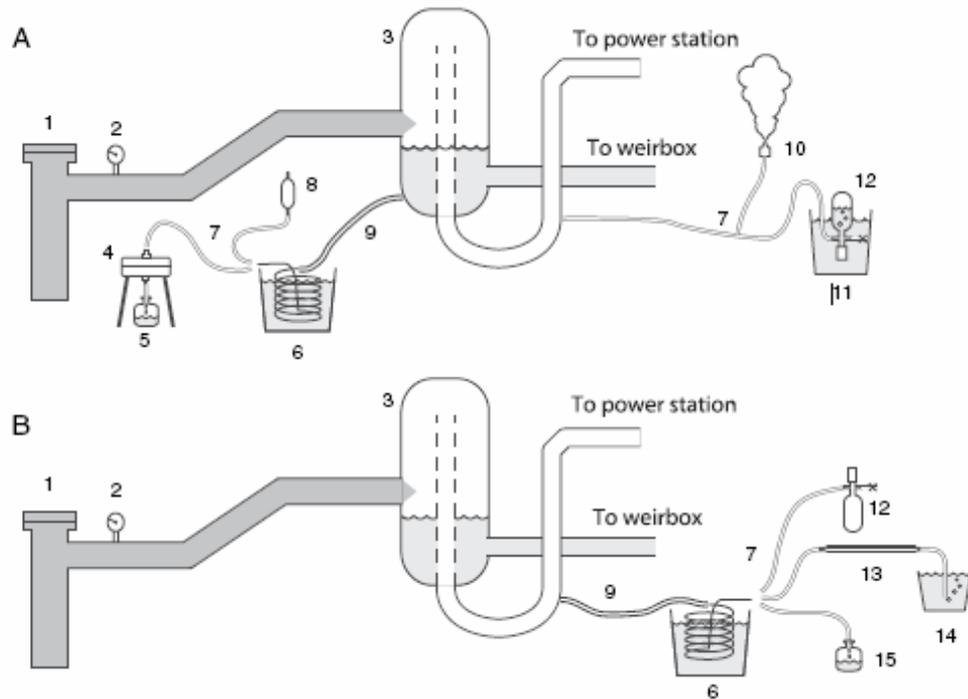


Figura 7. Equipo para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo (Amorsson *et al.*, 2006)

(1) Cabezal del pozo, (2) Manómetro. (3) separador de vapor del cabezal del pozo, (4) soporte de filtro de teflón con 20 cm de diámetro, y membrana de filtración de 0,2 μm . (5) botella de muestreo, (6) balde con agua fría y serpentín de enfriamiento de acero (N316), (7) manguera de silicona de 1/4" de pared gruesa, (8) botella de muestreo con válvula de paso en ambos extremos, 300 mL, (9) tubo de acero con revestimiento de teflón, (10) válvula atmosférica de una vía, (11) balde con agua fría, (12) botella de muestreo de gas, 300 ml, (13) tubería de cobre (aproximadamente 30 cm de largo), con abrazaderas especiales en ambos extremos, para la toma de muestras de gases nobles y gases individuales para mediciones isotópicas, (14) balde pequeño con agua para evitar que el aire entre en la tubería de cobre, (15) botella de muestreo para condensado para la determinación de NH_3 , $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$

La relación de agua a vapor que entra al serpentín de enfriamiento no puede suponerse que es la misma que la descarga total. Para calcular la composición de la descarga total desde el análisis de muestras de agua y de vapor, es necesario disponer de datos sobre la presión de separación y la entalpía de descarga.

La práctica más común es recoger muestras de vapor a elevadas presiones y muestras de agua a presión atmosférica. Por este método, una parte del vapor en la descarga no se recoge o se analiza, es decir, la fracción del vapor que se forma en la ebullición por despresurización en el muestreo a presión atmosférica. Este vapor es secundario y por lo tanto se puede esperar que contenga poco gas. En este caso se hace una aproximación para el cálculo de la composición total de la descarga o la composición del fluido del acuífero, cuando se recogen muestras de agua y de vapor a diferentes presiones, tomando el contenido de gas en la fracción de vapor no muestreada como cero.

Esta aproximación es innecesaria cuando se recogen muestras de agua y de vapor a la misma presión. Por lo tanto, tal procedimiento de muestreo es preferido.

Cuando existe un separador de vapor instalado en el cabezal del pozo, no es necesario un separador Webre, y un serpentín de enfriamiento se pueden montar directamente en las respectivas válvulas de bola. La toma que se conecta a la válvula de bola para la recolección de muestras de agua, en el separador debe estar en la parte baja del separador, pero no en su nivel más inferior, ya que los sólidos se quedan en la parte inferior del separador y pueden obstruir la válvula.

Muestreo de agua y vapor usando separador Webre en la descarga de un pozo de vapor húmedo

Cuando se colectan muestras usando un separador Webre, se debe evitar la contaminación de las muestras de vapor con agua líquida y mucho más, que las muestras de agua se contaminen con vapor.

Muestreo de agua líquida usando separador Webre en la descarga de un pozo de vapor húmedo

La manera más segura de recoger una fase de agua líquida libre de vapor es ajustando el separador Webre de tal manera que la válvula de agua este relativamente cerrada y la válvula de vapor relativamente abierta (Figura 8). De esta manera el separador se mantiene lleno de agua, y se tiene una descarga de vapor muy húmedo, lo cual puede ser verificado fácilmente pasando una herramienta o cualquier otro objeto a través del penacho el cual lo mojará, ver A en la Figura 9.

Muestreo de vapor usando separador Webre en la descarga de un pozo de vapor húmedo

Para colectar muestras de vapor, se debe invertir el ajuste de las válvulas; la válvula de vapor debe estar ligeramente abierta y la válvula de agua bien abierta. De esta manera el separador se llena con vapor de agua, y una mezcla de agua y vapor es descargado por la válvula de agua ver B en la Figura 9. Cuando el vapor es seco, se puede pasar una mano rápidamente a través de la columna de humo sin percibir dolor o daño. La condensación de vapor en el separador Webre debe reducirse al mínimo aislando contra la pérdida de calor, por ejemplo con lana de vidrio.

Cuando el vapor domina el volumen, el agua líquida tiende a existir como gotitas en la fase de vapor. Este patrón de flujo es la más favorable para la separación de fase y la recolección de muestras.

Cuando no sea posible colectar muestras de agua libre de vapor con un separador Webre, desde pozos con alta entalpía ($> 2\ 500$ kJ/kg). Si el separador Webre no puede ser ajustado para descargar el agua a través de la válvula de agua, lo mejor es recoger el agua desde un vertedero. Sin embargo, siempre hay una desventaja en esta técnica

de muestreo, y es que los caudales de agua son muy bajos, y el agua se puede evaporar a medida que fluye a través del vertedero. Esto cambiará la composición del agua, especialmente en el contenido isotópico, el pH y los gases disueltos, como CO_2 y H_2S . Para esto se necesita un serpentín de enfriamiento para llevar la temperatura de la agua por debajo de $100\text{ }^\circ\text{C}$. El flujo de agua del separador debe ajustarse de modo que el agua se enfríe hasta por lo menos $80\text{ }^\circ\text{C}$. Las muestras para la determinación de isótopos en el agua deben ser enfriadas entre $30\text{-}40\text{ }^\circ\text{C}$ con el fin de evitar la evaporación y la contracción térmica de la muestra en el recipiente hermético.

El vapor también puede ser recolectado como condensado con la ayuda de un serpentín de refrigeración (ver C Figura 9). Alternativamente, una muestra de vapor puede ser recogida en una botella con gases evacuados mediante la inmersión de esta botella en agua fría. Este último método de muestreo de vapor requiere una válvula de retención en el tubo atmosférico entre el serpentín de refrigeración y la botella de muestreo de gas, o entre el separador y el bulbo de muestreo de gas, para asegurarse de que la presión no se acumule en el bulbo, ya que puede hacer que el tubo sea expulsado o la botella explote.



Figura 8. Muestreo de agua usando un separador Webre en la línea bifásica del pozo AH-16A en la Central Geotérmica Ahuachapán - El Salvador.

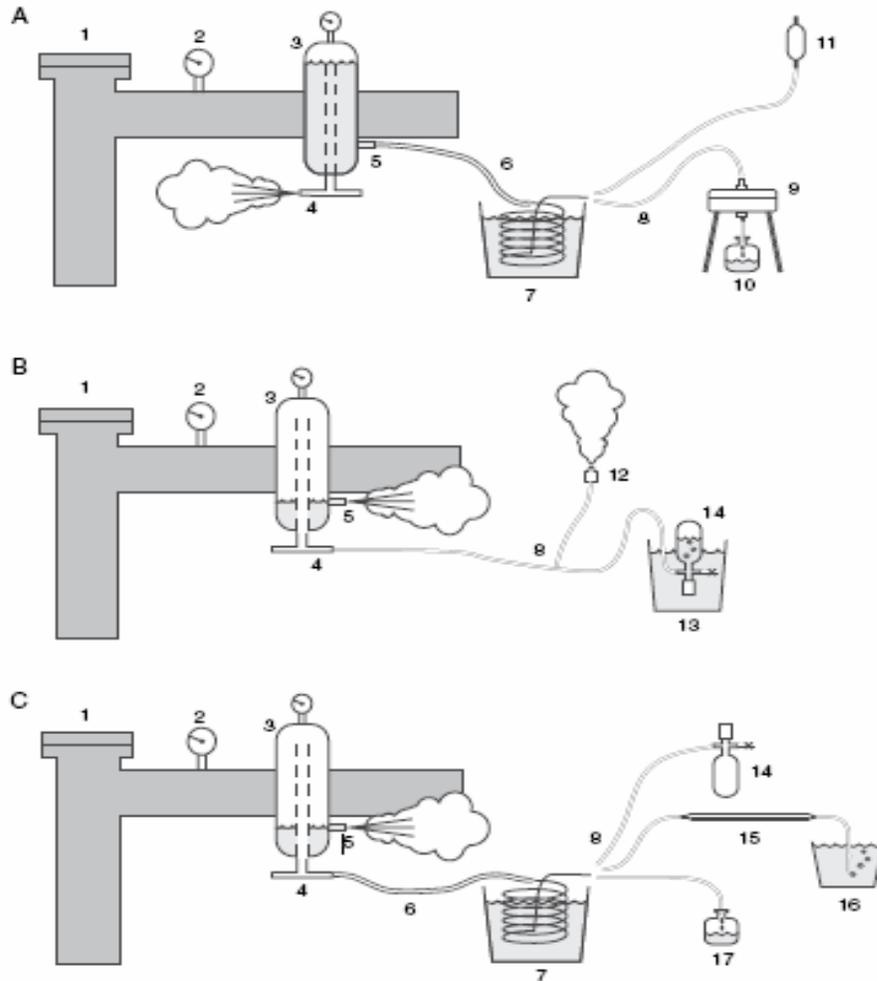


Figura 9. Equipos para toma de muestras de agua y vapor a la descarga de pozos de vapor húmedo utilizando separador Webre

(Amorsson *et al.*, 2006)

(1) cabezal de pozo, (2) Manómetro, (3) separador de vapor Webre, (4) válvula de salida de vapor, (5) válvula de salida de agua, (6) tubos de acero con revestimiento de teflón, (7) Balde con agua fría y serpentín de refrigeración (aproximadamente 6 m de longitud) de acero inoxidable (N316), (8) manguera de silicona de 1/4" de diámetro de pared gruesa que puede estar conectado, ya sea al soporte del filtro o a la botella de muestreo de gases con válvula de cierre en los dos extremos, (9) soporte del filtro de teflón de 20 cm de diámetro con membrana de filtro 0,2 μm , (10) botella de muestreo, (11) botella de muestreo de gas con válvula de paso en ambos extremos, 300 ml, (12) válvula atmosférica de una vía, (13) balde con agua fría, (14) botella de muestreo de gas, 300 ml, (15) tubería de cobre, para la toma de muestras de los gases nobles y mediciones isotópicas, (16) balde pequeño con agua para evitar que el aire entre en la tubería de cobre, (17) botella de muestra para el condensado para la determinación de NH_3 , $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$

6.2.4. Otros muestreos a considerar:

Muestreo de agua a profundidad

Para la realización de este muestreo, el pozo no debe poseer presión en el cabezal. Se usa una herramienta especial que puede ser de dos tipos: Klyen o Kuster. La herramienta se introduce por la tubería a la profundidad deseada y a través de un dispositivo de reloj, se abre para dejar entrar el agua, recuperándose posteriormente. Una vez afuera, la herramienta es enfriada y se colecta la muestra, para análisis de cationes, aniones e isótopos.

Muestreo de trazadores químicos

- **TFT: Tracer Flow Testing:** Estas pruebas se realizan para determinar el flujo de vapor que provee un pozo de producción, para iniciar la etapa de generación eléctrica; en el cual se inyecta una mezcla de alcohol isopropílico y benzoato de sodio. Por afinidad de solubilidad de los trazadores, se colectan muestras para análisis de benzoato de sodio en la fase acuosa y para análisis de isopropanol en la fase de vapor.
- **Sulfonatos:** Se inyecta una mezcla de varias sales sulfónicas en los pozos reinyectores y se toman muestras en los pozos productores para analizar en el agua la presencia de sulfonatos, de esta manera se verifica si existe interconexión entre pozos productores y reinyectores. Y de existir interconexión se puede proyectar el tiempo en el cual puede ocurrir su enfriamiento y tratar de ejecutar una explotación sostenible para aumentar su tiempo de vida útil.

6.3. PRESERVACIÓN DE MUESTRAS:

Algunos constituyentes no permanecen intactos desde la recolección de muestras hasta la ejecución de los análisis, sino se toman precauciones especiales. Las razones más comunes para los cambios de concentración son la interacción con la materia en suspensión, la adsorción en las paredes de los contenedores, la actividad biológica, las reacciones redox, la polimerización y la precipitación. Las muestras de aguas geotérmicas se pueden conservar mediante un tratamiento apropiado luego de ser recolectadas, para que al momento de analizarlas, se obtengan en el laboratorio resultados confiables. Muchas veces es necesario realizar análisis in situ debido a las dificultades que existen para preservar las muestras con respecto a los componentes a analizar. Los métodos de conservación pueden ser físicos o químicos y los más comunes se detallan en la Tabla 3 (Ármansson & Ólafsson, 2007).

Tabla 3. Métodos de preservación de muestras geotérmicas

Tipo	Método	Propósito	Usado para
Físico	Filtración	Evitar interacción con materia suspendida	Aniones y cationes
	Congelamiento (refrigeración)	Evitar actividad biológica	Nutrientes
	Recipiente hermético	Evitar interacción con aire atmosférico	Volátiles
	Análisis in situ	Evitar reacciones con componentes reactivos	Componentes reactivos
Químico	Adición de una base	Absorción de gases ácidos	CO ₂ , H ₂ S en vapor, δ ³⁴ S en H ₂ S en vapor
	Acidificación	Evitar adsorción en las paredes del recipiente	Cationes
	Precipitación	Evitar que un componente de la reacción cambie la concentración de otro	Sulfuros para preservar sulfatos
	Esterilización	Evitar actividad biológica, usando HgCl o formaldehído	δ ³⁴ S y δ ¹⁸ O en SO ₄ , evitar oxidación biológica y sulfuros
	Dilución	Evitar polimerización y precipitación	Sílice
	Redox	Cambiar estado de oxidación de un componente volátil para hacerlo menos volátil	Hg
	Intercambio iónico	Concentrar y evitar una mayor adsorción de componentes traza, en las paredes del recipiente	Trazas de cationes
	Extracción	Concentrar y evitar una mayor adsorción de componentes traza, en las paredes del recipiente	Trazas de cationes

6.4. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS EN EL LABORATORIO:

La medición de pH, conductividad y temperatura de las muestras en el campo son útiles para determinar los cambios de la química al momento de efectuar los análisis en el laboratorio. A continuación en la Tabla 4, se resume los parámetros a ejecutar en las diferentes muestras de fluidos geotérmicos (Simmons, 1998).

Tabla 4. Parámetros a analizar en los fluidos geotérmicos y en pruebas de trazadores

Tipo de fluido	Parámetros
Agua geotérmica	pH, Na, K, Mg, Ca, B, Li, Fe, F, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , sólidos totales disueltos, sólidos totales, C.E., isótopos (δ ² H (deuterio) y δ ¹⁸ O), SiO ₂ , NH ₃ , Ni, Hg, Cs, Rb, Al, Cu, Pb, Zn y As.
Vapor condensado	pH, Na, K, Ca, F, Cl, SO ₄ , SiO ₂ , B, Fe, sólidos totales disueltos, sólidos totales, C.E., isótopos (δ ² H (deuterio) y δ ¹⁸ O).
Gases geotérmicos	CO ₂ , H ₂ S, NH ₃ , He, H ₂ , Ar, O ₂ , N ₂ , CO, CH ₄ ,
Agua superficial	pH, Na, K, Mg, Ca, SiO ₂ , Li, Fe, Cd, Cr, Pb, Al, Hg, As, F, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , B, sólidos totales disueltos, sólidos totales, C.E., isótopos (δ ² H (deuterio) y δ ¹⁸ O), NH ₃ .
Pruebas de trazadores químicos	Sales sulfónicas, benzoato de sodio y alcohol isopropílico.

A continuación se describen algunos de los diferentes parámetros que se requieren analizar, para caracterizar los diversos fluidos en sistemas geotérmicos.

Aluminio:

Al Aluminio	Analizado por Absorción atómica (llama directa)				
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica			
Método	La muestra que contiene aluminio es aspirada directamente en una llama de óxido nitroso-acetileno en un equipo de absorción atómica, a absorbancia de 309.3 nm que se compara con la curva de un estándar.				
Rango	0.7 - 60	mg/L			
Reactivos			Métodos de referencia		
Solución estándar Cilindro de gas óxido nitroso Cloruros de potasio		Método APHA 3111: Método directo de llama óxido nitroso-acetileno (D).			
Al Aluminio	Analizado por Absorción atómica (horno de grafito)				
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica			
Método	Para determinar el aluminio mediante horno de grafito se siguen las siguientes condiciones de atomización: Secar: 20 s a 200 ° C Ash: 40 s a 1080 ° C Atomizar: 10 s a 2500 ° C Longitud de onda: 309,3 nm				
Rango	0.02 - 0.2	mg/L			
Reactivos			Métodos de referencia		
Solución estándar Cilindro de gas Argón		Método APHA 3113: Espectrometría de Absorción Atómica Electrothermal (B).			
Al Aluminio	Analizado por ICP-AES				
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente			
Método	La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón acoplado inductivamente y la intensidad de emisión del espectro de aluminio es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda para la medición es 308,22 nm o alternativo.				
Rango	69 - 4792		Precisión	± 1-10%	
Reactivos			Métodos de referencia		
Solución estándar de aluminio		Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Amoníaco:

NH3 Amoníaco	Analizado por electrodo selectivo					
	Equipo	Potenciómetro (con electrodo selectivo de amoníaco)				
Método	El amoníaco es determinado mediante un potenciómetro con electrodo selectivo después de elevar el pH de la muestra entre 10-14					
Rango	1-17000	mg/L	Precisión	± 3%	Exactitud	± 3%
Reactivos			Métodos de referencia			
NaOH Estándar de amoníaco Agua libre de amoníaco		Métodos APHA 4500-NH3: Electrodo selectivo de amoníaco (D), Electrodo selectivo de amoníaco usando adición conocida (E)				

Bicarbonatos y Carbonatos

HCO₃, CO₃ Bicarbonatos y Carbonatos	Analizado por titulación potenciométrica					
	Equipo	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de pH)				
Método	Las concentraciones de las especies de bicarbonato y carbonato se determinan a partir del pH de la muestra, titulando la muestra hasta un pH 8.3 (si la muestra tiene un pH > 8,3), luego hasta pH de 4.5 con estándar de HCl. La concentración de las especies se calcula a partir de las reacciones de equilibrio de carbonato y bicarbonato.					
Rango	> 10	mg/L	Precisión	± 0.5%	Exactitud	± 0.5%
Reactivos	Solución estándar de HCl, solución estándar de NaOH, bicarbonato de sodio y soluciones buffer de pH		Métodos de referencia			
			Métodos APHA 2320: Alcalinidad (B)			

Boro:

B Boro	Analizado por Absorción atómica (llama óxido nitroso-acetileno)					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	El boro es determinado por aspiración de la muestra en una llama óxido nitroso-acetileno a una intensidad de emisión de 249,8 nm.					
Rango	> 2	mg/L	Precisión	± 10-25%	Exactitud	± 10-25%
Reactivos	Ácido bórico o boro Solución estándar de absorción atómica Cilindro de gas óxido nitroso Ácido clorhídrico Isopropanol		Métodos de referencia			
			Dean and Rains, Flame Emission and Atomic Absorption Spectrometry, Vol. III, 1975, pp. 95-116. W. Snelleman, Spectrochim. Acta, 23B, 403 (1968)			
B Boro	Analizado por Espectrofotometría UV-VIS con Azometina H					
	Equipo	Espectrofotómetro UV-VIS				
Método	Este método está basado en el complejo de boro con azometina H para formar un complejo amarillo que puede ser analizado por espectrofotométricamente a 410 nm					
Rango	0.10 - 10	mg/L				
Reactivos	ácido acético glacial, acetato de amonio, EDTA, ácido ascórbico, soluciones buffer, azometina H, soluciones estándar de Boro		Métodos de referencia			
			Cogbill and Yoe (1955); Krug et al. (1981) Edwards (1980); Kirst and Rump (1992); Shucker et al. (1975)			
B Boro	Analizado por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón acoplado inductivamente y la intensidad de emisión del espectro de boro es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es 249.68 nm o alternativa					
Rango	0.05 - 100		Precisión	± 1-10%		
Reactivos	Solución estándar de boro		Métodos de referencia			
			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Calcio:

Ca Calcio	Analizado por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) llama aire acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	Las muestras que contienen calcio son aspiradas dentro de una flama de aire-acetileno u óxido nitroso-acetileno y es determinado por absorción a una intensidad de 422.7 nm.					
Rango	> 0.01-3	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 10%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de Ca de 1000 ppm Cilindro de gas óxido nitroso Cloruro de lantano o nitrato de estroncio Cloruro de potasio o nitrato de estroncio			Métodos APHA 3111: Espectrometría de Absorción Atómica (B, D y E).			
Ca Calcio	Analizado por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón acoplado inductivamente y la intensidad de emisión del espectro de calcio es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es 315.89 nm o alternativa.					
Rango	0.025 - 500		Precisión	± 1-10%		
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de calcio			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Cloruros:

Cl Cloruros	Analizado por Cromatografía Iónica-IC					
	Equipo	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión				
Método	Los componentes aniónicos son separados en columnas de intercambio catiónico, sulfonadas recubiertas con resina aniónica finamente molida. Una solución de carbonato de sodio/ bicarbonato de sodio es usada como solvente de elución.					
Rango	0.073 - 50.0	mg/L	Exactitud	± 5%		
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de cloruros Eluyente carbonato de sodio/bicarbonato de sodio			Métodos APHA 4110 B: Cromatografía Iónica con supresión química de la conductividad del eluyente y detector de conductividad eléctrica			
Cl Cloruros	Analizado por Titulación Potenciométrica (automática)					
	Equipo	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de Ag-AgCl)				
Método	AgCl precipita cuantitativamente como nitrato de plata al añadir un titulante el punto final es indicado por un gráfico de datos de conductancia versus incrementos de volumen de nitrato de plata adicionado. La intersección de las dos líneas en la gráfico indica el punto final.					
Rango	≥ 5					
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de cloruro de sodio Solución estándar de nitrato de plata, HNO ₃			Métodos APHA 4500-Cl-: Método Potenciométrico (D).			

Fluoruros:

F Fluoruros	Analizado por Electrodo de ión selectivo - ISE de fluoruros					
	Equipo	Potenciómetro (con electrodo selectivo de fluoruro)				
Método	La concentración de fluoruros se mide con un electrodo específico que de fluoruros que contiene cristales de fluoruro de lantano.					
Rango	0.1-1000	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 15%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución madre de fluoruros Solución estándar de fluoruros 1-10 ug/L TISAB (Total ionic strength adjustment buffer)			Métodos APHA 4500-F-: Método de electrodo de ión selectivo (C).			
F Fluoruros	Analizado por Cromatografía Iónica-IC					
	Equipo	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión				
Método	Los componentes aniónicos son separados en columnas de intercambio catiónico sulfonadas recubiertas con resina aniónica finamente molida. Una solución de carbonato de sodio/ bicarbonato de sodio es usada como solvente de elución.					
Rango	0.239 - 10.0		Precisión	± 0.55%	Exactitud	± 5%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de fluoruro Eluyente carbonato de sodio/bicarbonato de sodio			Métodos APHA 4110-B-: Cromatografía iónica con supresión química eluyente de conductividad (B)			

Hierro:

Fe Hierro	Analizado por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) con llama aire-acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	Muestras acuosas es de hierro son aspiradas directamente en una llama aire-acetileno y medido a una longitud de onda de 248.3 nm					
Rango	0.01 - 5	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 10%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución madre de Hierro Cilindro de gas óxido nitroso Cloruro de potasio			Métodos APHA 3111:Método directo de llama Aire-Acetileno (B)			
Fe Hierro	Analizado por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de hierro es analizada por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda para la medición es 261.19 o alternativo.					
Rango	0.5 - 10		Precisión	± 1-10%		
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de hierro			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Litio:

Li Litio	Analizado por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) llama aire acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	Las muestras de litio son aspiradas directamente en una llama aire-acetileno y litio es determinado por absorción a una longitud de onda de 670.8 nm					
Rango	0.05 - 2	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 10%
Reactivos				Métodos de referencia		
Solución estándar de litio Cloruro de potasio			Métodos APHA 3111: Método directo de llama Aire-Acetileno (B).			
Li Litio	Analizado por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de litio es analizada por el instrumento y comparada con estándares.					
Rango	Diluido < 1.0					
Reactivos				Métodos de referencia		
Solución madre de litio			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Magnesio:

Mg Magnesio	Analizado por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) con llama aire-acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	La muestra que contiene magnesio es aspirada directamente en una llama de aire-acetileno a una absorbancia de 285.2 nm					
Rango	0.01 - 0.4	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 10%
Reactivos				Métodos de referencia		
Solución madre de magnesio Cloruro de potasio			Métodos APHA 3111: Método directo de llama Aire-Acetileno (B).			
Mg Magnesio	Análisis por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de una radiofrecuencia generada por el plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de magnesio es medida por el instrumento y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es de 279.55 nm o alternativa.					
Rango	3-5 órdenes de magnitud a partir de la línea espectral		Precisión	± 1-10%		
Reactivos				Métodos de referencia		
Solución estándar de magnesio			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

pH:

pH	Analizado por Medición electrométrica de pHmetro					
	Equipo	Medidor de pH				
Método	El pH de una solución se determinado midiendo el potencial de la solución entre los electrodos de vidrio y de referencia.					
Rango	0 - 14	mg/L	Precisión	± 1%	Exactitud	± 1%
Reactivos			Métodos de referencia			
Agua destilada, buffers de pH			Métodos APHA 4500-H+: Método electrométrico (B)			

Potasio:

K Potasio	Análisis por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) con llama aire-acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	El potasio es determinado por aspiración de la muestra dentro de una llama aire-acetileno, la intensidad de absorbancia del potasio es de 766.5 nm					
Rango	0.05 - 2	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 10%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de Potasio o cloruro de potasio Cloruro de sodio Cloruro de sodio o nitrato de cesio			Métodos APHA 3111: Método directo de llama Aire-Acetileno (B).			
K Potasio	Análisis por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de un plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro de potasio es analizada y comparada con la de estándares.					
Rango			Precisión		Exactitud	
Reactivos			Métodos de referencia			
Cloruro de potasio o estándar de potasio			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Sílice:

SiO2 Sílice	Analizado por Espectrofotometría UV-VIS					
	Equipo	Espectrofotómetro UV-VIS				
Método	La sílice soluble reacciona con el ión molibdato para producir un complejo amarillo verdoso el cual luego se reduce para producir un complejo azul que es medido a 815 nm o con sensibilidad reducida a 640-700 nm					
Rango	> 1	mg/L	Precisión	± 15%	Exactitud	± 15%
Reactivos			Métodos de referencia			
Sulfito de sodio, bisulfito de sodio, bicarbonato de sodio, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio o de amonio, molibdato de amonio, ácido oxálico, metasilicato de sodio			Métodos APHA 4500-SiO2: Método del Molibdosilicato (C), Método azul de heterópoli (D)			

SiO₂ Sílice	Analizado por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) con llama óxido nitroso-acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	La muestra es aspirada dentro de una llama óxido nitroso-acetileno. La intensidad de absorbancia del silicio es 251.6 nm. La concentración de sílice es calculada multiplicando el valor de silicio por factor gravimétrico = SiO ₂ /Si = 2.14					
Rango	3 - 150	mg/L	Precisión	± 5-25%	Exactitud	± 5-25%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de silicio o metasilicato de sodio Cilindro de gas óxido nitroso			Método APHA 3111: Método directo de llama óxido nitroso-acetileno (D).			
SiO₂ Sílice	Análisis por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de un plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro es analizada y comparada con estándares. La intensidad de la longitud de onda es 288.16 nm.					
Rango	3-5 órdenes de magnitud a partir de la línea espectral		Precisión	± 1-10%		
Reactivos			Métodos de referencia			
Metasilicato de sodio o solución estándar de sílice			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Sodio:

Na Sodio	Analizado por Espectrometría de absorción atómica (AAS / ICP) con llama aire-acetileno					
	Equipo	Espectrómetro de Absorción Atómica				
Método	La muestra que contiene sodio es aspirada en una llama de aire-acetileno en un equipo de absorción atómica. La intensidad de absorbancia del sodio es de 589 nm.					
Rango	0.02 - 1	mg/L	Precisión	± 5%	Exactitud	± 10%
Reactivos			Métodos de referencia			
Solución estándar de sodio o cloruro de sodio Cloruro de potasio o nitrato de potasio			Métodos APHA 3111: Método directo de llama Aire-Acetileno (B)			
Na Sodio	Análisis por ICP-AES					
	Equipo	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente				
Método	La muestra es aspirada dentro de un plasma de argón y la intensidad de emisión del espectro es analizada y comparada con estándares					
Rango	0.03-100	mg/L				
Reactivos			Métodos de referencia			
Cloruro de sodio o estándar de sodio			Métodos APHA 3120: ICP-AES Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.			

Sulfatos:

SO₄ Sulfatos	Analizado por Espectrofotometría UV-VIS				
	Equipo	Espectrofotómetro UV-VIS			
Método	Este método es aplicable para aguas no tratadas y está basado en la reacción de sulfato con cromato de bario para formar sulfato de bario insoluble. Los iones cromato liberados son determinados espectrofotométricamente a una longitud de onda de 385 nm.				
Rango	20 - 100	mg/L			
Reactivos			Métodos de referencia		
	Ácido acético glacial, carbonato de calcio, hidróxido de amonio concentrado, HCl, etanol absoluto, indicador de bromofenol, NaOH, soluciones estándar.		Giggenbach and Goguel (1989)		
SO₄ Sulfatos	Análisis por Cromatografía iónica - IC				
	Equipo	Cromatógrafo de iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión			
Método	Los componentes aniónicos son separados en columnas de intercambio catiónico sulfonadas recubiertas con resina aniónica finamente molida. Una solución de carbonato de sodio/ bicarbonato de sodio es usada como solvente de elución. Los iones son detectados con un detector de conductividad.				
Rango	0.076 - 50.0	Precisión	± 0.06%	Exactitud	± 5%
Reactivos			Métodos de referencia		
	Ácido sulfúrico, sulfato de sodio u otro estándar de sulfato, NaHCO ₃ , Na ₂ CO ₃		Métodos APHA 4110-B-: Cromatografía iónica con supresión química eluyente de conductividad (B).		

6.5. CONTROL DE CALIDAD:

Es importante realizar el control de calidad de los métodos aplicados para los análisis de laboratorio y de esta manera asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos, este control se basa generalmente en la determinación de la precisión.

La precisión de los métodos se puede comprobar mediante repetición de análisis de la misma muestra o por duplicados o triplicados de varias muestras. Para obtener una idea de la precisión de las determinaciones se pueden utilizar varios enfoques, (Ármansson & Ólafsson, 2007) tales como:

- La adición de un estándar a la muestra para obtener el % de recuperación, llevando a cabo determinaciones del mismo componente por diferentes métodos.
- La utilización de estándares o muestras de referencia que se ejecutan con cada lote de muestras determinadas.
- El control de equilibrio iónico, en donde, la suma de aniones determinados debe estar cerca de la suma de cationes determinados. El error relativo para todos los elementos analizados debe ser $\leq 10\%$ (Joseph *et al.*, 2013).
- O también puede realizarse mediante un control de balance de masa, en donde, la suma de las concentraciones de los componentes coincida con la de la determinación de sólidos totales disueltos.

7. METODOLOGÍA

El proyecto presentado se realizó de acuerdo a los siguientes puntos:

- Revisión de las normativas técnicas e información bibliográfica de análisis físico-químico del ámbito geotérmico.
- Definición de los parámetros a efectuar en los análisis, y el rango de en el cual trabajarán los equipos a seleccionar.
- Definición de procedimientos de muestreo de fluidos geotérmicos, así como las técnicas de preservación de muestras y de eliminación de interferencias.
- Definición de las normas técnicas de referencia a utilizar para cada parámetro.
- Determinación de los equipos necesarios para cada tipo de parámetro.
- Investigación del costo de los equipos a los proveedores disponibles en el mercado.
- Definición del personal necesario para el laboratorio.
- Evaluación económica del proyecto, calculando el VAN y TIR.

8. ANÁLISIS DE DATOS

8.1. APLICACIONES DE LOS RESULTADOS DEL LABORATORIO GEOQUÍMICO

Los análisis a ejecutar servirán para el desarrollo de los proyectos geotérmicos en el Ecuador, específicamente para el ámbito geoquímico, ya que la geoquímica provee información de las condiciones y procesos en profundidad que no podría obtenerse con otras técnicas de exploración. Esto es gracias a que las aguas y gases normalmente son modificados por los procesos que ocurren en profundidad.

8.2. RESUMEN DE LOS TIPOS DE MUESTRAS A COLECTAR

Muestra de agua filtrada y acidificada: Se debe coleccionar al menos 250 mL de muestra para análisis de cationes por absorción atómica (o emisión atómica por ICP). Se debe filtrar con papel de porosidad 0.45 μm y acidificar con ácido nítrico hasta un pH menor a 2. Si la muestra es para análisis de metales pesados se debe coleccionar al menos 1 L y acidificar con ácido nítrico libre de metales hasta un pH menor a 2.

Muestra de agua filtrada y sin acidificar: Se debe coleccionar al menos 250 mL para análisis de aniones.

Muestra de agua sin tratamiento: Se debe coleccionar al menos 250 mL en frasco de vidrio para carbonatos, bicarbonatos, pH, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. La muestra para estas

determinaciones no se filtra para no exponerla al intercambio con los gases del medio ambiente.

Muestra de dilución 10/100: Esta es una muestra sin filtrar, que se diluye como medida de preservación de las especies químicas. Los análisis realizados a esta muestra diluida, son sílice total y sílice monomérica en agua geotérmica.

Muestra acidificada: Esta muestra se colecta en agua geotérmica o superficial, la muestra se acidifica con ácido sulfúrico y se debe mantener a una temperatura por debajo de 4°C. Y en condensado, el vapor se atrapa en ácido bórico 15% y luego el amoníaco es analizado por electrodo de ión selectivo.

Sólidos totales: Se colecta 1 L de muestra de vapor condensado o 500 mL de agua geotérmica.

Vapor condensado: Muestra de vapor condensado colectado en cabezales, líneas bifásicas, línea al silenciador, fumarolas, separadores de humedad, etc.

Ampollas con sosa cáustica: Se colecta el vapor condensado en una solución de sosa cáustica 4N. Los gases H₂S y CO₂ quedan atrapados en la sosa y en el espacio de cabeza quedan los gases no solubles que se analizan por cromatografía de gases, (He, H₂, Ar, O₂, CH₄, N₂, CO).

En el Anexo I, se presenta un resumen de los tipos de muestras a recolectar y los parámetros a analizar en función de la etapa que se encuentre un proyecto geotérmico.

8.3. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS A EJECUTAR, TÉCNICAS Y EQUIPOS A UTILIZAR EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO

Con base a la investigación realizada en las fuentes bibliográficas y de acuerdo a lo establecido en las normativas referenciales de los parámetros a determinar, las normativas que se tomaron como base para la determinación de los parámetros de laboratorio, son las emitidas por la American Public Health Association, American Water Works Federation and Water Environment en su manual "Standard Methods for examination of wáter and wastewater" y también las descritas en la publicación del Programa de entrenamiento geotérmico de la Universidad de las Naciones Unidas en el "Analytical procedures and quality Assurance for geothermal water chemistry".

Los equipos fueron seleccionados en función de los métodos a utilizar, los cuales fueron definidos en función de los rangos esperados para los tipos de fluidos a analizar. Los métodos seleccionados constituyen métodos oficiales probados, que permiten efectuar determinaciones en el rango de trabajo que se requiere, permite eliminar las interferencias que se presenten y deberán ser validados cuando se desarrollen los métodos una vez que se compren los equipos.

La definición de los parámetros se realiza en función de las necesidades que existen por ejemplo en el área geoquímica para realizar los modelos conceptuales geoquímicos, en el área medioambiental para determinar si existe contaminación de manantiales o pozos domésticos de agua de consumo humano, etc.

8.4. ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO DE LOS RECURSOS NECESARIOS PARA IMPLEMENTAR LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS EN UN LABORATORIO ORIENTADO AL CAMPO GEOTÉRMICO:

Inversión en compra de equipos:

Para este punto se consultaron a los proveedores de equipos (mercado local en San Salvador) y se estableció una lista referencial de costos de todos los equipos que se requieren para implementar el Laboratorio geoquímico, tal como se muestra en el Anexo II. Para realizar el análisis económico del presente proyecto, se debe indicar que existen algunos posibles escenarios que se podrían aplicar, los cuales dependerán de la disponibilidad de recursos de los proyectos a ejecutar, del espacio físico que se cuente en el laboratorio, de la disponibilidad de personal de laboratorio adecuadamente capacitado, entre otras.

Es así que en la Tabla 5, se muestra el detalle de 4, de las posibles alternativas a aplicar, siendo éstas a criterio del autor las más probables. En las alternativas que se detallan debe entenderse que los ítems del 2-10 y el 13 siempre serán considerados en la compra:

A) Incluye la compra de un espectrómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) en sustitución del espectrómetro de absorción atómica, la compra de un espectroscopio láser en sustitución del espectrómetro de masas. Y prescindir de la compra en la etapa inicial (mientras dura la exploración) del cromatógrafo líquido con detector de arreglo de diodos y UV y del cromatógrafo de gases para determinación de alcohol isopropílico con detector FID ya que se volverían obsoletos hasta que se dispongan de plantas de generación geotérmica ya instaladas.

B) Incluye la compra de un espectrómetro de absorción atómica en sustitución del espectrómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente, la compra de un espectroscopio láser en sustitución del espectrómetro de masas. Y prescindir de la compra en la etapa inicial (mientras dura la exploración) del cromatógrafo líquido con detector de arreglo de diodos y UV y del cromatógrafo de gases para determinación de alcohol isopropílico con detector FID ya que se volverían obsoletos hasta que se dispongan de plantas de generación geotérmica ya instaladas.

C) Incluye la compra de un espectrómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) en sustitución del espectrómetro de absorción atómica, la

compra de un espectroscopio láser en sustitución del espectrómetro de masas. Y ejecutar la compra del cromatógrafo líquido con detector de arreglo de diodos y UV y del cromatógrafo de gases para determinación de alcohol isopropílico con la finalidad de dar servicio a clientes externos y desarrollar experiencia en estas técnicas que se aplicarán luego en la etapa de producción cuando ya se disponga de una planta geotérmica.

D) No se considera la compra de espectrómetro de absorción atómica, en esta opción si se considera la compra del espectrómetro de masas en lugar del espectroscopio láser y tampoco se considera la compra del HPLC ni cromatógrafo de gases para análisis de trazadores.

Tabla 5. Posibles escenarios para realizar la compra de equipos

Ítem	Equipo	Costo de equipos USD \$			
		Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D
1	Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS) (con llama y acoplado con horno de grafito)	---	80,310.00	---	---
2	Potenciómetro (con electrodo selectivo de amoníaco)	3,000.00	3,000.00	3,000.00	3,000.00
3	Potenciómetro (con electrodo selectivo de ácido sulfhídrico)	15,000.00	15,000.00	15,000.00	15,000.00
4	Potenciómetro (con electrodo selectivo de dióxido de carbono)	13,000.00	13,000.00	13,000.00	13,000.00
5	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de pH)	13,000.00	13,000.00	13,000.00	13,000.00
6	Espectrofotómetro UV/VIS	10,900.00	10,900.00	10,900.00	10,900.00
7	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión	60,000.00	60,000.00	60,000.00	60,000.00
8	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de Ag-AgCl)	12,000.00	12,000.00	12,000.00	12,000.00
9	Potenciómetro (con electrodo selectivo de fluoruro)	3,000.00	3,000.00	3,000.00	3,000.00
10	Medidor de pH de mesa	1,512.00	1,512.00	1,512.00	1,512.00
11	Espectroscopio láser	45,000.00	45,000.00	45,000.00	---
12	Cromatógrafo Líquido, con detector de arreglo de diodos y UV	---	---	98,500.00	---
13	Cromatógrafo de gases con detector de masas	120,000.00	120,000.00	120,000.00	120,000.00
14	Cromatógrafo de gases	---	---	75,000.00	---
15	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES)	180,000.00	---	180,000.00	180,000.00
16	Espectrómetro de masas	---	---	---	350,000.00
TOTAL USD \$		476,412.00	376,722.00	649,912.00	781,412.00

Para fines prácticos se ha considerado el escenario propuesto en la alternativa A como la más probable a ejecutar, de tal manera que los cálculos del análisis económico se basarán en los montos establecidos en esta alternativa, pero de igual manera se presentan los resultados obtenidos para las otras alternativas.

Consideraciones realizadas para el análisis económico:

Se tomo como referencia el estudio de prefactibilidad realizado en Ecuador para el prospecto geotérmico Chachimbiro, del cual se utilizaron los datos presentados en la Tabla 6. De igual manera se conoce que en El Salvador se obtienen datos similares a los mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos del estudio de prefactibilidad del proyecto Chachimbiro - Ecuador

Especificación	Detalle
Extensión de estudio del proyecto Chachimbiro	49 km ²
N° de campañas	1
Tiempo aproximado de trabajo de campo	35 días
N° de muestras recolectadas	61

Análisis económico para la determinación del VAN y la TIR:

Utilizando el criterio de la teoría financiera en la que se afirma que el mejor método para ver la aceptabilidad u ordenación de los proyectos de inversión consiste en averiguar el valor actual neto (VAN) de los flujos de caja (desembolsos y reembolsos) asociados al proyecto, a lo largo de un período específico de programación, descontados al coste de capital, a utilizar para la financiación del proyecto en estudio. Si el VAN es igual a cero, lo que equivale a decir que la tasa interna de rentabilidad (TIR) del flujo analizado es igual al coste de capital utilizado para el descuento, el proyecto es financieramente aceptable. Si el VAN es negativo, lo que equivale a decir que la TIR es inferior al tipo de descuento, el proyecto es financieramente rechazable. Pero si el VAN es positivo, significa que el proyecto, además de satisfacer las exigencias del capital de deuda, generará un excedente, creando un valor de utilidad (Termes, 2000).

Comparación de costos por el servicio de muestreo y análisis de laboratorio:

Los valores presentados en a Tabla 7 corresponde a precios ofertados por dos laboratorios geotérmicos.

Tabla 7. Precios por servicios de muestreo y análisis en laboratorios geotérmicos

Análisis	Precios Lab. A	Precios Lab. B
Aguas	\$ 300.00	\$ 485.00
Gases en vapor	\$ 200.00	\$ 590.00
Isótopos	\$ 70.00	\$ 105.00
Precio total de análisis / muestra	\$ 570.00	\$ 1,180.00
N° muestras en una campaña de campo	60	60
TOTAL 1	\$ 34,200.00	\$ 70,800.00
Mano de obra personal técnico	Precios Lab. A	Precios Lab. B
Muestreo/(día-geoquímico o químico)	\$ 1,000.00	\$ 2,400.00
Muestreo/(día-técnico)	\$ 1,000.00	\$ 2,000.00
Precio total por mano de obra personal técnico / día	\$ 2,000.00	\$ 4,400.00
N° días que dura la campaña de campo	35	35
TOTAL 2	\$ 70,000.00	\$ 154,000.00
TOTAL (TOTAL 1 + TOTAL 2)	\$ 104,200.00	\$ 224,800.00
Precio total de muestreo + análisis / muestra	\$ 1,736.67	\$ 3,746.67

Se solicitaron cotizaciones de servicios a dos laboratorios internacionales que trabajan dentro del área geoquímica, que son laboratorios de primer nivel y tienen una amplia experiencia en la ejecución de análisis de laboratorio y asesoramiento técnico en geotermia. De tal manera que la confiabilidad de sus resultados son reconocidos mundialmente. Pero como se puede observar el costo total por el servicio a contratar, con el Laboratorio B es mucho más alto que con el Laboratorio A, llegando a costar alrededor de un 115 % por encima del costo de servicios que brinda el Laboratorio A.

8.5. PERSONAL ESPECIALIZADO PARA EL MANEJO Y EJECUCIÓN DE ANÁLISIS

El personal que forma parte de un laboratorio químico debe poseer competencia, experiencia y entrenamiento específico en el área que estará bajo su responsabilidad. Esto debido a que estará expuesto gran parte de su jornada de trabajo a vapores químicos, corrosivos, tóxicos y/o inflamables. Durante sus actividades dentro del laboratorio y en el campo el personal tiene riesgo de sufrir accidentes laborales, motivo por el cual es sumamente importante utilizar los equipos de protección personal para disminuir el riesgo de sufrir accidentes y trabajar con normas de seguridad industrial y salud ocupacional. Los equipos de Laboratorio también requieren ser manipulados por técnicos expertos, ya que algunos, tienen un alto nivel de sensibilidad, que podrían llegar a dañarse por un mal manejo y al ser controlados adecuadamente se pueden tomar las medidas adecuadas, en caso de riesgo. Con esto se evitaría invertir en el mantenimiento de los mismos.

9. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

9.1. PARÁMETROS A EJECUTAR Y TÉCNICAS A UTILIZAR EN EL LABORATORIO GEOQUÍMICO

En la Tabla 8, se resume los parámetros a analizar en el laboratorio geoquímico en función de los diferentes fluidos geotérmicos.

Tabla 8. Métodos a aplicar para la ejecución de análisis físico-químicos de interés geotérmico

PARÁMETRO	TIPO DE FLUIDO			
	AGUA GEOTÉRMICA	VAPOR CONDENSADO	GASES GEOTÉRMICOS	AGUA SUPERFICIAL
Sodio	AAS / ICP	AAS / ICP		AAS / ICP
Potasio	AAS / ICP	AAS / ICP		AAS / ICP
Calcio	AAS / ICP	AAS / ICP		AAS / ICP
Magnesio	AAS / ICP			AAS / ICP
Cloruros	POT	CI		CI
Sulfatos	COL	CI		CI
Fluoruros	ISE	CI		CI
Bicarbonatos y Carbonatos	POT			POT
Sílice total	AAS / ICP/COL	ICP/COL		AAS / ICP/COL
Sílice monomérica	COL			
Boro	AAS / ICP	COL		COL
Litio	AAS / ICP			AAS / ICP
Hierro	AAS / ICP	AAS / ICP		AAS / ICP
Metales trazas (Ni, Hg, Cs, Rb, Al, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, As)	AAS / ICP			AAS / ICP
Sólidos totales disueltos	POT	POT		POT
Sólidos totales	GR	GR		GR
pH	POT	POT		POT
Conductividad eléctrica	POT	POT		POT
Oxígeno 18	EM / EL	EM / EL		EM / EL
Deuterio	EM / EL	EM / EL		EM / EL
Gases (He, H ₂ , Ar, O ₂ , CH ₄ , N ₂ , CO)			CG	
Dióxido de carbono	TIT		POT	TIT
Ácido sulfhídrico	TIT		POT	TIT
Amoníaco	POT		POT	POT
Sales sulfónicas	HPLC			
Benzoato de sodio	HPLC			
Alcohol isopropílico	CG			

Nota: POT: Potenciometría, COL: Colorimetría, CG: Cromatografía de Gases, AAS / ICP: Espectrometría de Absorción Atómica / Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente, EM / EL: Espectrometría de Masas / Espectroscopía láser, GR: Gravimetría, HPLC: Cromatografía líquida de alta eficacia, TIT: Titulación volumétrica.

9.2. LISTADO DE EQUIPOS QUE SE REQUIEREN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS REQUERIDAS EN EL ÁMBITO GEOTÉRMICO

En la Tabla 9 se presentan los equipos que se proponen adquirir para realizar trabajos de campo, tales como muestreo:

Tabla 9. Lista de equipos de campo para análisis geoquímico

Equipo	Costo referencial USD \$
Termocupla tipo K	900
GPS	500
pHmetro	1,000.00
Conductivímetro	1,000.00
Medidor de potencial redox	1,000.00
Medidor de oxígeno disuelto	1,000.00
Separador Webre con accesorios (manguera de silicona de alta T, manómetros, serpentín de acero inox. y embudo de acero)	3,500.00
Cámara fotográfica	150.00
TOTAL USD \$	9,050.00

9.3. FUNCIONES Y ACTIVIDADES A CARGO DEL PERSONAL DEL LABORATORIO:

A continuación se describen algunas de las actividades que estarían a cargo del personal que labora en el Laboratorio y se presenta un organigrama referencial de su distribución

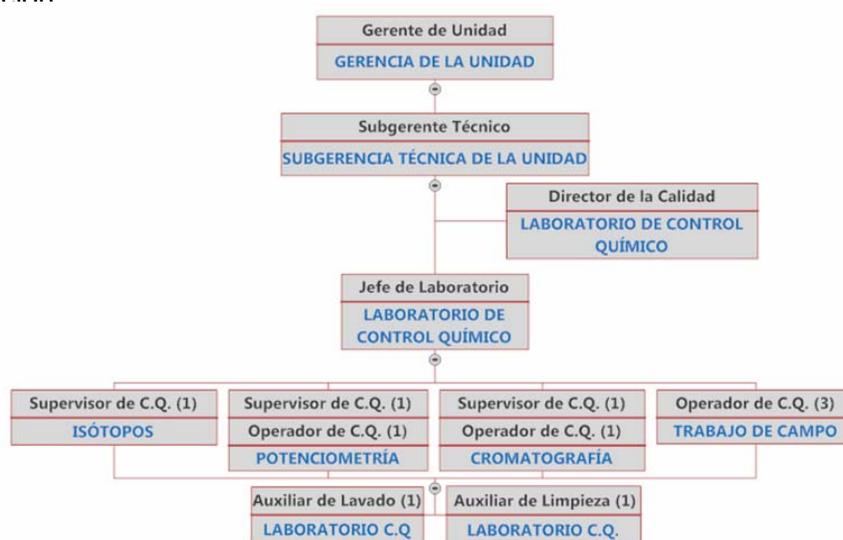


Figura 10. Organigrama referencial de un laboratorio químico

Funciones principales de un Operador de Control Químico (analista de Laboratorio):

- Ejecutar análisis físico-químicos, en las diferentes áreas de Laboratorio de acuerdo a la capacitación recibida y a las destrezas desarrolladas en técnicas específicas de análisis, efectuando el control de calidad de los resultados de análisis.
- Elaborar informes de resultados de análisis químicos para entregar al cliente o área solicitada.
- Diseñar, planificar y ejecutar pruebas de validación e implementación de técnicas de análisis químico.
- Comunicar a los clientes los procedimientos de muestreo que se deben efectuar para los diferentes fluidos a analizar y las técnicas que dispone el Laboratorio para su respectivo análisis.
- Solicitar la compra de los reactivos, instrumentos, materiales, repuestos y accesorios requeridos para la ejecución de los análisis específicos de su área.
- Participar en la recepción de bienes y servicios de su área.
- Colaborar en el orden, limpieza y mantenimiento del laboratorio.
- Elaborar el programa de mantenimiento y calibración de los equipos asignados y darle seguimiento.
- Apoyar en las actividades de muestreo cuando sea necesario.
- Elaborar especificaciones técnicas para adquisición de equipos nuevos.

Funciones principales de un técnico analista de muestreo

- En campo, realizar el muestreo de fluidos geotérmicos para su posterior análisis en el Laboratorio.
- Realizar mediciones in-situ de parámetros físico-químicos durante las actividades de muestreo.
- Registrar la información de campo obtenida durante las actividades de muestreo.
- Ejecutar análisis físico-químicos de laboratorio que le sean asignados.
- Preparar, limpiar y dar mantenimiento el material y equipo necesario para realizar los muestreos.

En el Anexo III se presenta finalmente un diagrama de flujo de los procesos que forman parte de las actividades que se desarrollan en un laboratorio químico.

9.4. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

Cálculo de los costos de operación:

Costo de mano de obra para muestreo

Personal	Supervisor	Operador CQ	Operador CQ	Conductor
Cantidad	1	1	1	1
Salario/mensual	\$ 1,800.00	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00	\$ 700.00
Salario/día	\$ 60.00	\$ 33.33	\$ 33.33	\$ 23.33
N° días	35	35	35	35
Total unitario	\$ 2,100.00	\$ 1,166.67	\$ 1,166.67	\$ 816.67
COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA PARA MUESTREO	\$ 5,250.00			

Costos indirectos:

Personal	Supervisor	Operador CQ	Operador CQ	Conductor	Guía
Cantidad	1	1	1	1	1
Viáticos/Pago	\$ 100.00	\$ 100.00	\$ 100.00	\$ 100.00	\$ 40.00
N° días	35	35	35	35	35
Calibración y Mantenimiento	\$ 150.00				
Total unitario	\$ 3,500.00	\$ 3,500.00	\$ 3,500.00	\$ 3,500.00	\$ 1,400.00
COSTO TOTAL DE INDIRECTOS	\$ 15,550.00				

Considerando un total de 60 muestras, el costo unitario para muestreo es de \$346.67.

Costos de análisis:

En este punto se tomaron como referencia los costos aproximados de los análisis en un Laboratorio de primer nivel. Cabe indicar que este punto deberá ser ampliado mediante un análisis de costos que deberá efectuarse para cada parámetro a analizar.

Tipo de muestra	Costo de análisis
Aguas	\$ 250.00
Gases	\$ 178.57
Isótopos	\$ 50.00
Costo total unitario de análisis	\$ 478.57
N° de muestras	60
COSTO TOTAL DE ANÁLISIS	\$ 28,714.29

Costos totales de operación:

Mano de Obra de muestreo	\$ 5,250.00
Costos Indirectos	\$ 15,550.00
Servicios de Análisis	\$ 28,714.29
Sub-Total 1	\$ 49,514.29
Imprevistos (10%)	\$ 4,951.43
Total de costos	\$ 54,465.71
N° muestras	\$ 60.00
Costo total unitario por muestra (para muestreo y análisis de aguas, gases e isótopos)	\$ 907.76

El análisis económico del proyecto presentado fue realizado para un período de 10 años, en donde se utilizó una inflación de la proyección calculada por el Trading economics la que misma que se encuentra entre el 4.94% – 4.39% de tasa de inflación.

Así también el precio de venta unitario, para muestreo y análisis de fluidos geotérmicos, corresponde a un 100% de utilidades a partir de los costos de operación calculados. Por otro lado la depreciación utilizada para los equipos nuevos fue de tipo lineal y corresponde al 10% de la inversión inicial. La tasa de impuestos a utilidades es también del 12 %.

Es así que los resultados obtenidos, para las 4 diferentes alternativas se pueden observar en los Anexos IV, Anexo V y Anexo VI.

En la Tabla 10 se presentan los resultados del análisis económico efectuado, considerando que la rentabilidad mínima esperada de la inversión utilizada por las entidades gubernamentales en Ecuador y la SEMPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo - Ecuador) para evaluar proyectos es del 12%.

Tabla 10. Resumen de análisis económico para recuperar la inversión

Descripción	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	Alternativa D
Inversión en equipos USD \$	\$ 476,412.00	\$ 376,722.00	\$ 649,912.00	\$ 781,412.00
VAN	\$ 2476.52	\$ 3937.75	\$ 2157.10	\$ 3326.04
TIR	12.1%	12.2%	12.1%	12.1%
N° muestras requeridas	83	66	113	136

En todos los casos el tiempo de recuperación del la inversión será durante el sexto año de operación de los equipos de Laboratorio, esto si se tiene como mínimo el número de muestras indicadas, pero si son más la recuperación será en menor tiempo.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La implementación de un laboratorio especializado en el ámbito geoquímico, en el Ecuador, permitirá contar con resultados más rápidos al ser ejecutados en el propio país, obteniendo de esta manera un avance más eficiente de los proyectos. El tiempo para disponer de resultados se reducirá debido a que se evitará realizar el envío de las muestras recolectadas hacia otros países para su análisis, ya que no se dispone en el Ecuador de laboratorios que ejecuten ciertos parámetros de interés geotérmico.
- La inversión para la compra de equipos requerida para implementar las técnicas de análisis de un laboratorio orientado al ámbito geotérmico sería de aproximadamente USD \$ 476,412.00 si dentro de la compra de equipos se opta por la alternativa A planteada en la Tabla 5. Logrando así, la recuperación de la inversión al finalizar el sexto año, para esto se deben realizar al menos dos campañas de exploración que brinden al año mínimo 83 muestras para sus correspondientes análisis (si son más la recuperación sería en menor tiempo). El valor del VAN es de USD \$ 2,476.52 y la TIR es de 12.1 % Adicional a esto es oportuno indicar que la visión de implementar un laboratorio geoquímico, no será considerada con fines de lucro si se lo maneja por parte del estado ecuatoriano o por parte de una entidad de apoyo, pero aún de ésta manera se ha verificado que existe viabilidad técnica y económica mediante la alternativa A, teniendo un escenario de demanda de muestras bastante conservador. En el caso que los servicios se brinden a empresas privadas los precios de venta se ajustarían para obtener márgenes de utilidad más elevados.
- Es oportuno indicar que los valores utilizados para elaborar el análisis económico del proyecto fueron obtenidos con base a los costos de los equipos cotizados por proveedores disponibles en El Salvador, por lo que se indica que será necesario actualizar los precios de los mismos en el mercado local ecuatoriano, pero se conoce que están bastante cercanos a los presentados en el presente trabajo.
- La comparación de precios por servicios de muestreo y análisis en dos laboratorios geoquímicos, permite concluir al efectuar tan sólo una campaña de campo, que tenga una duración de 35 días y que permita recolectar alrededor de 60 muestras (como es el caso del prospecto geotérmico de Chachimbiro), al hacer uso de los servicios del Laboratorio A, el costo (USD \$ 104,200.00) serían equivalente al 22 % de la inversión que se requiere para implementar un laboratorio geoquímico considerando la alternativa A de compra (USD \$ 476,412.00). Y de hacerse uso los servicios del Laboratorio B el costo (USD \$ 224,800.00) sería equivalente al 47 % de la inversión para implementar un laboratorio geoquímico de igual manera considerando la alternativa A.

- El personal que forme parte del laboratorio geoquímico debe poseer competencia técnica, experiencia y entrenamiento específico en el área de trabajo, ya que durante sus actividades dentro del laboratorio y en el campo es vulnerable de sufrir accidentes laborales, motivo por el cual es sumamente importante utilizar los equipos de protección personal y cumplir normas de seguridad industrial y salud ocupacional. Así como también es importante considerar jornadas de capacitación en lo referente a muestreo e interpretación de resultados. Al implementar el laboratorio se deberá evaluar la carga de trabajo que se proyecta en función de la demanda de análisis a efectuar y redefinir si es necesario contratar más personal del que se dispone o si tan sólo es conveniente redistribuir mejor las actividades y funciones del personal.
- Se recomienda también ver la posibilidad de buscar fuentes de financiamiento a través de entidades de cooperación institucional tales como: Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), Deutsche Bank, Fondo Nórdico de Desarrollo (NDF), Organización de las Naciones Unidas (ONU) ya que a mas de contar con ayuda económica se puede aprovechar la asistencia técnica, en lo referente a asesoría y capacitaciones. Se conoce que el Laboratorio Geoquímico de LaGe en El Salvador fue beneficiado en sus inicios con el financiamiento e implementación de los primeros equipos que formaron parte de este laboratorio.

11. AGRADECIMIENTOS

En lo personal primeramente, agradezco a Dios por todas las bendiciones recibidas a lo largo de estos cinco meses de estadía en El Salvador, tuve la oportunidad de capacitarme profesionalmente y conocer verdaderos amigos que siempre los recordaré. Siguiendo, en lo más profundo de mi corazón agradezco enormemente a mi amado esposo Juan Sebastián Salazar y a mi hermosa hija, Sabina Salazar, quienes estuvieron presente todo el tiempo en mi mente y en mi corazón, gracias infinitas a mis dos amores por todo el tiempo que sacrificamos estando separados, los amo. También agradezco a toda mi familia, quienes estuvieron pendientes de una u otra manera de mi hermosa hija, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible que yo estuviera en el Diplomado, gracias Sra. Mariita y doña Miriam por cuidar de mi Sabina en mi ausencia.

Expreso un agradecimiento especial a los coordinadores del Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico, que me permitieron formar parte de la capacitación del programa geotérmico, edición 2014, gracias por haberme otorgado la media beca al extranjero.

También agradezco cordialmente al Lic. Roberto Enrique Renderos, Coordinador del Laboratorio Geoquímico de LaGeo, quien me supo guiar y colaborar con su conocimiento y experiencia profesional, para la realización de este trabajo. Agradezco a todo el equipo del Laboratorio Geoquímico de LaGeo: Wilmer, Edwin, Aldo, Almita, Yanci, Claudia y Martín, que aportaron y facilitaron la elaboración de este trabajo. Gracias especiales también a Jeannette Ascencio y a Briseida Salazar por haberme brindado su amistad y por los gratos momentos que compartimos juntas.

No puedo dejar de agradecer a las autoridades de la institución en la cual laboro, CELEC E.P. Unidad de Negocio Termopichincha y en especial a Matilde Urquiza, Jefa de Geotermia de CELEC EP Termopichincha, quien me apoyó y me permitió participar en este Diplomado de formación en geotermia, gracias por la oportunidad "Mati".

A todos ustedes, muchas gracias.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ármansson, H., & Ólafsson, M. (2007). *Geothermal sampling and analysis* (pp. 1–8).
- Arnórsson, S., Bjarnason, J. O., Giroud, N., Gunnarsson, I., & Stefansson, A. (2006). *Sampling and analysis of geothermal fluids. Geofluids* (p. 060620022515002–???). doi:10.1111/j.1468-8123.2006.00147.x
- Arnórsson S, Gunnlaugsson E (1985) New gas geothermometers for geothermal exploration – calibration and application. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 1307–25.
- Arnórsson, S., Stefánsson, A., & Bjarnason, J. Ö. (2007). *Fluid-Fluid Interaction in Geothermal Systems* (Vol. 65, pp. 1–54). doi:10.2138/rmg.2007.65.9
- D’Amore F, Panichi C (1980) Evaluation of deep temperatures in hydrothermal systems by a new gas geothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 549–56.
- Gupta, H.K., Roy, S., (2006). Geothermal energy – An alternative Resource for the 21st century. *Elsevier publications*, 292 p.
- Joseph, E. P., Fournier, N., Lindsay, J. M., Robertson, R., Beckles, D. M., & Lucia, S. (2013). Chemical and isotopic characteristics of geothermal fluids from Sulphur Springs , Saint Lucia, 254, 23–36.
- Lloret, A., & Labus, J. (2014). Geothermal Development In Ecuador : History , Current Status And Future, 1–11.
- Marini, L. (2000). Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy, 1–82.
- Mazor E, Truesdell AH (1984) Dynamics of a geothermal field traced by noble gases: Cerro Prieto, Mexico. *Geothermics*, 13, 91–102.
- Muñoz, J. (2013). Análisis de la matriz energética ecuatoriana - Monografias.com. Retrieved October 31, 2014, from <http://www.monografias.com/trabajos97/analisis-matriz-energetica-ecuadoriana/analisis-matriz-energetica-ecuadoriana.shtml>
- Servicios y Remediación S.A. (2012). *Consultoría para el Estudio de Prefactibilidad Inicial para Elaborar el Modelo Geotérmico Conceptual del Proyecto Chachimbiro INFORME FINAL*.
- Simmons, S. (Geothermal I. the U. of A. (1998). *Geochemistry lecture notes 1998* (Vol. 18, pp. 1 – 78).
- Termes, R. (2000). La decisión de invertir y la teoría de opciones. Retrieved October 24, 2014, from <http://web.iese.edu/RTermes/acer/acer47.htm>
- Trading economics. (2014). Ecuador - Expectativa - Indicadores Económicos - 2014. Retrieved October 29, 2014, from <http://es.tradingeconomics.com/ecuador/forecast>

13. ANEXOS

ANEXO I

TIPOS DE MUESTRAS A RECOLECTAR Y PARÁMETROS A ANALIZAR EN FUNCIÓN DE LA ETAPA QUE SE ENCUENTRE UN PROYECTO GEOTÉRMICO

ETAPA DEL PROYECTO	TIPO DE FLUIDO	LUGAR DE MUESTREO	PUNTO DE MUESTREO	TIPOS DE PRESERVACIÓN	PARÁMETROS A ANALIZAR
EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN	AGUA SUPERFICIAL	MANANTIALES, POZOS DOMÉSTICOS, FUENTES, RÍOS	PUNTO REPRESENTATIVO	FILTRADA/ACIDIFICADA	Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Sílice total, Litio, Hierro, Metales Trazas para aguas superficiales (Cd, Cr, Pb, Al, Hg, As)
				FILTRADA/SIN ACIDIFICAR	Cloruros, Sulfatos, Fluoruros, Bicarbonatos, Carbonatos, Boro, Sólidos totales disueltos, Sólidos totales, pH, Conductividad eléctrica
				SIN TRATAMIENTO	Oxígeno-18, Deuterio
				ACIDIFICADA CON ÁCIDO SULFÚRICO	Amoníaco
	GASES GEOTÉRMICOS	FUMAROLAS	PUNTO REPRESENTATIVO	AMPOLLA CON NaOH	Gases (He, H ₂ , Ar, O ₂ , CH ₄ , N ₂ , CO), dióxido de carbono y ácido sulfhídrico
				CONDENSADO 1	Oxígeno-18, Deuterio
ACIDIFICADA CON ÁCIDO BÓRICO				Amoníaco	
MANEJO DE CAMPO Y PRODUCCIÓN	AGUA GEOTÉRMICA	POZOS DE PRODUCCIÓN	CABEZAL, SEPARADOR CICLÓNICO Y/O LÍNEA BIFÁSICA	FILTRADA/ACIDIFICADA	Sodio, Potasio, Calcio, Magnesio, Boro, Litio, Hierro, Metales trazas para aguas geotérmicas (Ni, Hg, Cs, Rb, Al, Cu, Pb, Zn, As)
				FILTRADA/SIN ACIDIFICAR	Cloruros, Sulfatos, Fluoruros, Bicarbonatos, Carbonatos, Sólidos totales disueltos, Sólidos totales, pH, Conductividad eléctrica
				SIN TRATAMIENTO 1	Oxígeno-18, Deuterio
				SIN TRATAMIENTO 2	Sales sulfónicas y Benzoato de sodio
				PRESERVADA CON NaF	Alcohol isopropílico
				ACIDIFICADA CON ÁCIDO SULFÚRICO	Amoníaco
	POZOS DE REINYECCIÓN	LÍNEA DE REINYECCIÓN	DILUCIÓN 10/100	Sílice total, Sílice monomérica	
	VAPOR CONDENSADO	POZOS DE PRODUCCIÓN	CABEZAL, SEPARADOR CICLÓNICO Y/O LÍNEA BIFÁSICA	AMPOLLA CON NaOH	Gases (He, H ₂ , Ar, O ₂ , CH ₄ , N ₂ , CO), dióxido de carbono y ácido sulfhídrico
				CONDENSADO 1	Oxígeno-18, Deuterio
		TURBINA	ENTRADA A LA TURBINA	CONDENSADO 2	Sodio, Potasio, Calcio, Cloruros, Sulfatos, Fluoruros, Sílice total, Boro, Hierro, Sólidos totales disueltos, Sólidos totales, pH, Conductividad eléctrica
				AMPOLLA CON NaOH	Gases (He, H ₂ , Ar, O ₂ , CH ₄ , N ₂ , CO), dióxido de carbono y ácido sulfhídrico
				PRESERVADA CON NaF Y ACETATO DE ZINC	Alcohol isopropílico

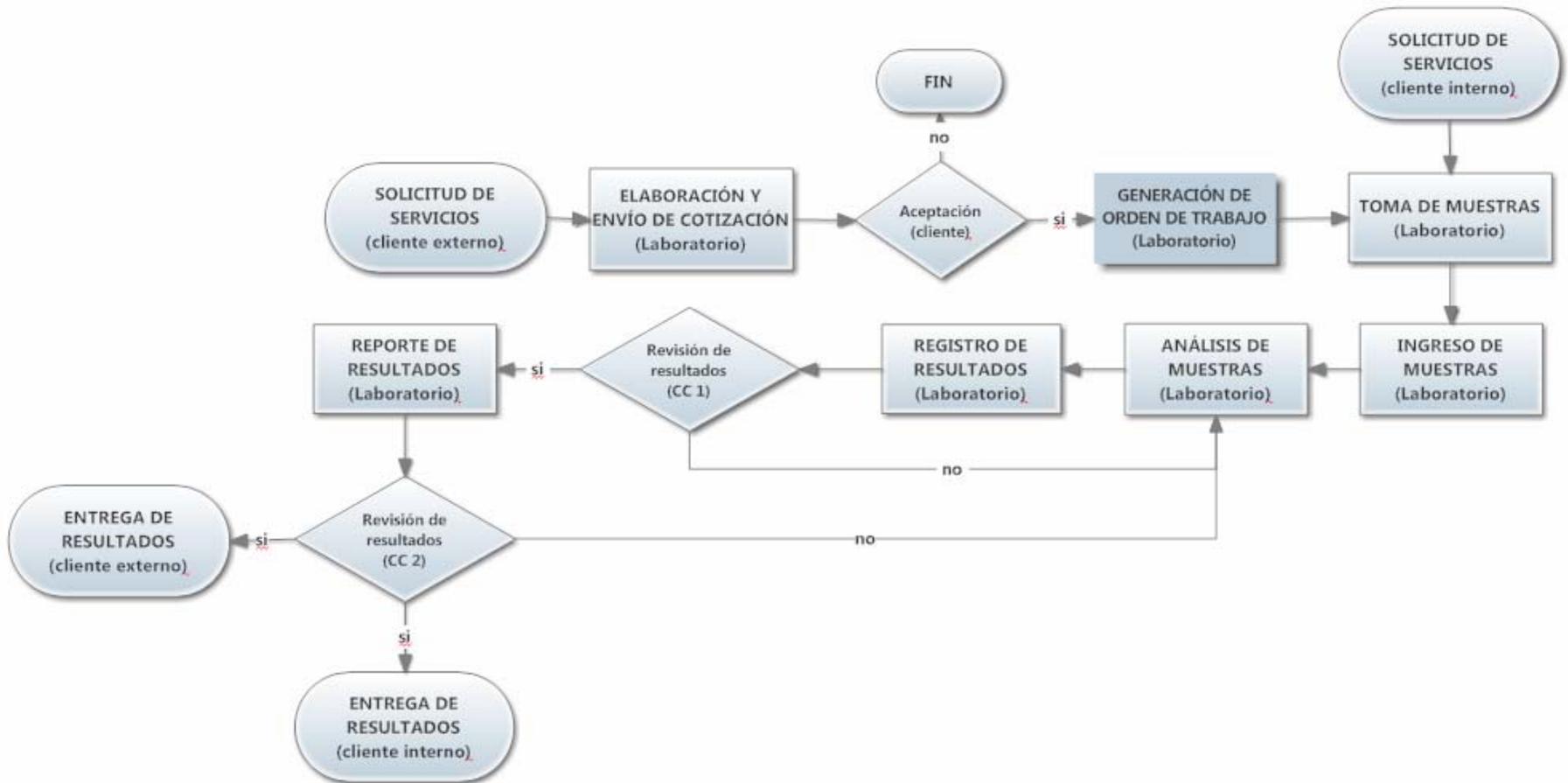
ANEXO II

COSTOS REFERENCIALES DE LOS EQUIPOS DE ANÁLISIS PARA UN LABORATORIO GEOQUÍMICO

Ítem	Equipo	Parámetros a analizar	Costo de equipos USD \$
1	Espectrómetro de Absorción Atómica (con llama y acoplado con horno de grafito)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Na, K, Ca, Mg, B, Li, Fe, SiO₂ total ▪ Metales trazas para aguas geotérmicas (Ni, Hg, Cs, Rb, Al, Cu, Pb, Zn, As) ▪ Metales Trazas para aguas superficiales (Cd, Cr, Pb, Al, Hg, As) 	80,310.00
2	Potenciómetro (con electrodo selectivo de amoníaco)	NH ₃	3,000.00
3	Titulador potenciométrico automático (con electrodo selectivo de ácido sulfhídrico)	H ₂ S	15,000.00
4	Titulador potenciométrico automático (con electrodo selectivo de dióxido de carbono)	CO ₂	13,000.00
5	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de pH)	Bicarbonatos, Carbonatos y dióxido de carbono total	13,000.00
6	Espectrofotómetro UV/VIS	SO ₄ , B, SiO ₂ (monomérica), SiO ₂ total en vapor	10,900.00
7	Cromatógrafo de Iones con detector de conductividad eléctrica y membrana de supresión	Cl, SO ₄ , F	60,000.00
8	Titulador potenciométrico automático (con electrodo de Ag-AgCl)	Cl	12,000.00
9	Potenciómetro (con electrodo selectivo de fluoruro)	F	3,000.00
10	Medidor de pH de mesa	PH	1,512.00
11	Espectroscopio láser	Oxígeno-18 y Deuterio	45,000.00
12	Cromatógrafo Líquido, con detector de arreglo de diodos y UV	Sales sulfónicas, benzoato de sodio	98,500.00
13	Cromatógrafo de gases con detector de masas	He, H ₂ , Ar, O ₂ , CH ₄ , N ₂ , CO	120,000.00
14	Cromatógrafo de gases	Alcohol isopropílico	75,000.00
15	Espectrómetro de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Na, K, Ca, Mg, B, Li, Fe, SiO₂ total ▪ Metales trazas para aguas geotérmicas (Ni, Hg, Cs, Rb, Al, Cu, Pb, Zn, As) ▪ Metales Trazas para aguas superficiales (Cd, Cr, Pb, Al, Hg, As) 	180,000.00
16	Espectrómetro de masas	Oxígeno-18 y Deuterio	350,000.00

ANEXO III

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ANÁLISIS EN UN LABORATORIO GEOQUÍMICO



ANEXO IV

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO PARA CÁLCULO DEL VAN Y LA TIR ALTERNATIVA A

Parámetros de análisis	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N° de muestras		83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
Inflación *		4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%
Precio de venta total por muestra		1,815.52	1,905.21	1,999.32	2,098.09	2,201.74	2,298.39	2,399.29	2,504.62	2,614.57	2,729.35
Costo por muestra		907.76	952.60	999.66	1,049.05	1,100.87	1,149.20	1,199.65	1,252.31	1,307.29	1,364.68
Depreciación de equipos nuevos		47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20
Inversión Inicial total	476,412.00										
Flujos de Operación del Proyecto											
		Año									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas		150688.16	158132.16	165943.88	174141.51	182744.10	190766.57	199141.22	207883.52	217009.61	226536.33
Costos de operación		75,344.08	79,066.08	82,971.94	87,070.76	91,372.05	95,383.28	99,570.61	103,941.76	108,504.80	113,268.16
Depreciación		47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20
Costos totales		122,985.28	126,707.28	130,613.14	134,711.96	139,013.25	143,024.48	147,211.81	151,582.96	156,146.00	160,909.36
Utilidad Antes de Impuestos		27,702.88	31,424.88	35,330.74	39,429.56	43,730.85	47,742.08	51,929.41	56,300.56	60,863.60	65,626.96
Impuestos (12%)		3,324.35	3,770.99	4,239.69	4,731.55	5,247.70	5,729.05	6,231.53	6,756.07	7,303.63	7,875.24
Utilidad (Pérdida) Neta		24,378.53	27,653.89	31,091.05	34,698.01	38,483.15	42,013.03	45,697.88	49,544.49	53,559.97	57,751.73
(+) Depreciación		47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20	47,641.20
Flujos Operativos		72,019.73	75,295.09	78,732.25	82,339.21	86,124.35	89,654.23	93,339.08	97,185.69	101,201.17	105,392.93
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujos Netos	-476,412.00	72,019.73	75,295.09	78,732.25	82,339.21	86,124.35	89,654.23	93,339.08	97,185.69	101,201.17	105,392.93
VAN	\$2,476.52										
TIR	12.1%										

Fuente: * Datos de tasa de inflación, tomados de los indicadores económicos presentados en el (Trading economics, 2014)

ANEXO V

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO PARA CÁLCULO DEL VAN Y LA TIR ALTERNATIVA B

Parámetros de análisis	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N° de muestras		66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Inflación *		4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%
Precio de venta total por muestra		1,815.52	1,905.21	1,999.32	2,098.09	2,201.74	2,298.39	2,399.29	2,504.62	2,614.57	2,729.35
Costo por muestra		907.76	952.60	999.66	1,049.05	1,100.87	1,149.20	1,199.65	1,252.31	1,307.29	1,364.68
Depreciación de equipos nuevos		37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20	37,672.20
Inversión Inicial total	376,722.00										
Flujos de Operación del Proyecto											
	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas		119824.32	125743.64	131955.38	138473.97	145314.59	151693.90	158353.26	165304.97	172561.86	180137.32
Costos de operación		59912.16	62871.82	65977.69	69236.99	72657.29	75846.95	79176.63	82652.48	86280.93	90068.66
Depreciación		37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20
Costos totales		97584.36	100544.02	103649.89	106909.19	110329.49	113519.15	116848.83	120324.68	123953.13	127740.86
Utilidad Antes de Impuestos		22239.96	25199.62	28305.49	31564.79	34985.09	38174.75	41504.43	44980.28	48608.73	52396.46
Impuestos (12%)		2668.80	3023.95	3396.66	3787.77	4198.21	4580.97	4980.53	5397.63	5833.05	6287.58
Utilidad (Pérdida) Neta		19571.16	22175.67	24908.83	27777.01	30786.88	33593.78	36523.90	39582.65	42775.68	46108.89
(+) Depreciación		37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20	37672.20
Flujos Operativos		57243.36	59847.87	62581.03	65449.21	68459.08	71265.98	74196.10	77254.85	80447.88	83781.09
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujos Netos	-376,722.00	57,243.36	59,847.87	62,581.03	65,449.21	68,459.08	71,265.98	74,196.10	77,254.85	80,447.88	83,781.09
VAN	\$3,937.75										
TIR	12.2%										

Fuente: * Datos de tasa de inflación, tomados de los indicadores económicos presentados en el (Trading economics, 2014)

ANEXO VI

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO PARA CÁLCULO DEL VAN Y LA TIR ALTERNATIVA C

Parámetros de análisis	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N° de muestras		113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Inflación *		4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%
Precio de venta total por muestra		1,815.52	1,905.21	1,999.32	2,098.09	2,201.74	2,298.39	2,399.29	2,504.62	2,614.57	2,729.35
Costo por muestra		907.76	952.60	999.66	1,049.05	1,100.87	1,149.20	1,199.65	1,252.31	1,307.29	1,364.68
Depreciación de equipos nuevos		64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20	64,991.20
Inversión Inicial total	649,912.00										
Flujos de Operación del Proyecto											
		Año									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas		205153.76	215288.36	225923.60	237084.23	248796.19	259718.34	271119.97	283022.14	295446.81	308416.93
Costos de operación		102576.88	107644.18	112961.80	118542.11	124398.09	129859.17	135559.99	141511.07	147723.41	154208.46
Depreciación		64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20
Costos totales		167568.08	172635.38	177953.00	183533.31	189389.29	194850.37	200551.19	206502.27	212714.61	219199.66
Utilidad Antes de Impuestos		37585.68	42652.98	47970.60	53550.91	59406.89	64867.97	70568.79	76519.87	82732.21	89217.26
Impuestos (12%)		4510.28	5118.36	5756.47	6426.11	7128.83	7784.16	8468.25	9182.38	9927.86	10706.07
Utilidad (Pérdida) Neta		33075.40	37534.62	42214.13	47124.80	52278.07	57083.81	62100.53	67337.49	72804.34	78511.19
(+) Depreciación		64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20	64991.20
Flujos Operativos		98066.60	102525.82	107205.33	112116.00	117269.27	122075.01	127091.73	132328.69	137795.54	143502.39
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujos Netos	-649,912.00	98,066.60	102,525.82	107,205.33	112,116.00	117,269.27	122,075.01	127,091.73	132,328.69	137,795.54	143,502.39
VAN	\$2,157.10										
TIR	12.1%										

Fuente: * Datos de tasa de inflación, tomados de los indicadores económicos presentados en el (Trading economics, 2014)

ANEXO VII

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO PARA CÁLCULO DEL VAN Y LA TIR ALTERNATIVA D

Parámetros de análisis	Año										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N° de muestras		136	136	136	136	136	136	136	136	136	136
Inflación *		4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.94%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%	4.39%
Precio de venta total por muestra		1,815.52	1,905.21	1,999.32	2,098.09	2,201.74	2,298.39	2,399.29	2,504.62	2,614.57	2,729.35
Costo por muestra		907.76	952.60	999.66	1,049.05	1,100.87	1,149.20	1,199.65	1,252.31	1,307.29	1,364.68
Depreciación de equipos nuevos		78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20	78,141.20
Inversión Inicial total	781,412.00										
Flujos de Operación del Proyecto											
		Año									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por ventas		246910.72	259108.11	271908.05	285340.31	299436.12	312581.36	326303.69	340628.42	355582.01	371192.06
Costos de operación		123455.36	129554.05	135954.03	142670.15	149718.06	156290.68	163151.84	170314.21	177791.00	185596.03
Depreciación		78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20
Costos totales		201596.56	207695.25	214095.23	220811.35	227859.26	234431.88	241293.04	248455.41	255932.20	263737.23
Utilidad Antes de Impuestos		45314.16	51412.85	57812.83	64528.95	71576.86	78149.48	85010.64	92173.01	99649.80	107454.83
Impuestos (12%)		5437.70	6169.54	6937.54	7743.47	8589.22	9377.94	10201.28	11060.76	11957.98	12894.58
Utilidad (Pérdida) Neta		39876.46	45243.31	50875.29	56785.48	62987.64	68771.54	74809.37	81112.25	87691.83	94560.25
(+) Depreciación		78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20	78141.20
Flujos Operativos		118017.66	123384.51	129016.49	134926.68	141128.84	146912.74	152950.57	159253.45	165833.03	172701.45
Valor Residual		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujos Netos	-781,412.00	118,017.66	123,384.51	129,016.49	134,926.68	141,128.84	146,912.74	152,950.57	159,253.45	165,833.03	172,701.45
VAN	\$3,326.04										
TIR	12.1%										

Fuente: * Datos de tasa de inflación, tomados de los indicadores económicos presentados en el (Trading economics, 2014)