



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**Medición y análisis del flujo de CO₂ en las
zonas geotérmicas Alcaparrosa y Los Azufres
en el Estado de Puebla, México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Emmanuel Hiram Hernández Arias

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Daniel Pérez Zárate



IER
Instituto de Energías
Renovables



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Temixco, Mor., marzo 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

A mi madre, quien me ha enseñado que la vida es una constante lucha.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CeMIE-Geo (Proyecto 207032 CONACyT/SENER) el financiamiento otorgado a través del proyecto P09 para la realización de la presente tesis.

Se agradece el apoyo brindado para la terminación de la tesis al proyecto 352 de CÁTEDRAS CONACYT: Exploración de recursos geotérmicos de alta y mediana entalpia.

Le agradezco a mi familia por su apoyo brindado a lo largo de toda mi carrera, en especial a mi tío Manuel Germán Hernández Ramírez quien fue la espina dorsal en todo mi periodo universitario.

A Denise Salgado Callejas y su madre Irama Callejas Samperio por brindarme su hogar en mi estadía en Morelos por más de 3 años.

Al Dr. Zárate por haberme apoyado y motivado para la terminación de este trabajo y al Dr. Santoyo por su apertura a mi profesionalización.

A mis amigos y profesores quienes me han acompañado en esta etapa y han sido de los grandes pilares de mi vida.

	CONTENIDO	Página
ÍNDICE DE TABLAS		<i>iii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS		<i>iv</i>
RESUMEN		<i>vi</i>
INTRODUCCION		-1-
Planteamiento del problema		-1-
Justificación		-2-
Hipótesis		-2-
Objetivos		-2-
Capítulo 1. Energía Geotérmica		-3-
1.1 Conceptos Generales		-3-
1.1.1 Sistemas geotérmicos		-4-
1.1.1.1 Sistemas geotérmicos convectivos		-4-
1.1.1.2 Sistemas geotérmicos conductivos		-5-
1.2 Situación actual de la Geotermia en el Mundo		-5-
1.2.1 Producción de electricidad		-6-
1.2.2 Usos directos de la geotermia		-6-
1.3 Situación actual de la geotermia en México		-7-
1.3.1 Antecedentes		-7-
1.3.2 Situación actual		-8-
1.3.3 Principales Centrales Geotérmicas		-8-
1.3.4 Usos directos		-10-
1.3.5 Prospectivas: Potencial geotérmico y proyectos a futuro		-11-
1.3.5.1 Aspectos institucionales, jurídicos e inversión		-12-
Capítulo 2. Marco Teórico		-15-
2.1 Exploración geotérmica		-15-
2.1.1 Métodos geológicos		-15-
2.1.2 Métodos geofísicos		-17-
2.1.2.1 Método de corriente directa		-18-
2.1.2.2 Método Magnetotelúrico		-18-
2.1.2.3 Método sismológico		-18-
2.1.2.4 Método Gravimétrico		-18-
2.1.2.5 Método Magnético		-18-
2.1.3 Métodos geoquímicos		-19-
2.1.3.1 Muestreo de agua geotérmica		-19-
2.1.3.2 Muestreo de gases geotérmicos		-21-
2.2 Medición de flujo de gases en sistemas geotérmicos		-22-
2.2.1 Gases magmáticos		-22-
2.2.2 Gases hidrotermales		-22-
2.2.3 Gases meteóricos y biogénicos		-23-

CONTENIDO	Página
2.2.4 Método de la cámara de acumulación (MCA)	-24-
2.2.4.1 Sensores	-26-
2.2.4.2 Cámaras de Acumulación	-27-
2.2.4.3 Medición del flujo con el equipo WestSystem	-28-
2.2.4.4 Métodos estadísticos para el cálculo del flujo de gas total	-30-
Capítulo 3. Descripción de la zona de estudio	-31-
3.1 Marco geológico regional	-31-
3.2 Marco geológico local	-32-
3.3 Estudios previos	-34-
Capítulo 4. Metodología	-37-
4.1 Campaña de medición de flujo de gases en superficie	-37-
4.1.1 Calibración de equipo	-39-
4.1.2 Acondicionamiento del equipo en campo	-40-
4.1.3 Conocimiento de la zona y mallado	-41-
4.1.4 Medición del flujo de gases usando el método MCA	-42-
4.2 Procesamiento de los datos	-43-
4.2.1 Depuración de bases de los datos	-44-
4.2.2 Fuentes de error en la medición de flujo de gases	-44-
4.2.2.1 Efecto de la diferencia de presión entre el suelo y el medio ambiente	-45-
4.2.2.2 Efectos de dilución por vapor de agua y precipitaciones	-45-
4.2.2.3 Velocidad del viento dentro de la cámara	-46-
4.3 Cálculo del flujo de gas total	-46-
4.3.1 Cálculo directo del flujo de gas total	-46-
4.3.2 Cálculo del flujo de gas total usando el método gráfico estadístico	-46-
4.4 Comparación de flujos con respecto a sistemas volcánicos en el mundo	-48-
4.4.1 Agrupamiento de valores mediante jerarquización	-48-
Capítulo 5. Resultados y discusión	-49-
5.1 Depuración de los datos	-49-
5.2. Cálculo del área de estudio	-49-
5.3 Flujo total de CO₂ usando el método gráfico estadístico (GSA)	-50-
5.3.1 Los Azufres	-50-
5.3.2 Alcaparroza	-53-
5.4 Comparación de flujos mediante el método de agrupamiento	-56-
CONCLUSIONES	-57-
BIBLIOGRAFÍA	-59-
ANEXOS	-67-

ÍNDICE DE TABLAS

No. de Tabla		Página
Tabla 1	Usos directos de la energía geotérmica en México	-11-
Tabla 2	Técnicas analíticas comúnmente usadas durante la exploración geológica.	-17-
Tabla 3	Técnicas analíticas usadas durante la exploración geoquímica.	-20-
Tabla 4	Estratigrafía del pozo EAC-1	-33-
Tabla 5	Estratigrafía del pozo EAC-2.	-33-
Tabla 6	Concentración en mg/kg de gases medidos en Acoculco.	-36-
Tabla 7	Resultados de los estadísticos y valor de la media de flujo de CO ₂ para la zona de estudio en Los Azufres, Acoculco, Puebla.	-52-
Tabla 8	Estadísticos de Shichel y rango de flujos obtenidos en Los Azufres con un intervalo de confianza del 90 % usando la aproximación gráfica estadística.	-52-
Tabla 9	Resultados de los estadísticos y valor de la media de flujo de CO ₂ para la zona de estudio en Alcaparrosa, Acoculco, Puebla.	-55-
Tabla 10	Estadísticos de Shichel y rango de flujos obtenidos en Alcaparrosa con un intervalo de confianza del 90 % usando la aproximación gráfica estadística.	-55-
Tabla 11	Flujos de CO ₂ en sistemas geotérmicos incluyendo los valores de Los Azufres y Alcaparrosa	-56-

ÍNDICE DE FIGURAS

No. de Figura		Página
Figura 1	Esquema general de un sistema geotérmico de tipo hidrotermal.	-4-
Figura 2	Países con recursos geotérmicos explorados y explotados.	-6-
Figura 3	Capacidad Instalada de Energía Geotérmica por Continente.	-7-
Figura 4	Plantas Geotérmicas de la República Mexicana.	-8-
Figura 5	Edificio Oficial del CeMIE-Geo (CICESE).	-12-
Figura 6	Resumen de la Ley Geotérmica Mexicana 2017.	-13-
Figura 7	Cráter formado por una explosión hidrotermal en la zona de Alcaparrosa.	-16-
Figura 8	Representación gráfica de recolección de muestra de agua geotérmica.	-20-
Figura 9	Configuración de la botella Giggenbach.	-21-
Figura 10	Recolección de muestra de gas en sistemas geotérmicos.	-21-
Figura 11	Composición de una cámara de acumulación WestSystems Portable LI-8210.	-25-
Figura 12	Principio de operación de la CA WestSystems Portable LI-8210.	-25-
Figura 13	Tipos de cámaras de acumulación WesSystem™ para la medición de flujos de gases en suelo y sobre cuerpos de agua.	-27-
Figura 14	Configuración de la cámara de acumulación WestSystem™.	-28-
Figura 15	Representación gráfica de la medición de flujo de gases obtenida con el software FluxManager™.	-29-
Figura 16	Localización de la zona de Aocolco.	-31-
Figura 17	Localización y mapa geológico simplificado de la zona de estudio.	-32-
Figura 18	Metodología general para la medición y estimación del flujo de gases en superficie.	-38-
Figura 19	Flujómetro portable WestSystem™.	-39-
Figura 20	Conexiones neumáticas de la cámara de acumulación y la caja que contiene los sensores para medir el flujo de gases.	-40-

ÍNDICE DE FIGURAS

No. de Figura		Página
Figura 21	Zona de estudio en Los Azufres.	-41-
Figura 22	Zona de estudio en Alcaparrosa.	-42-
Figura 23	Localización de las zonas bajo estudio.	-42-
Figura 24	Mediciones realizadas en campo.	-43-
Figura 25	Ejemplo ilustrativo del análisis de datos usando el programa FluxRevision en una lectura de flujo de gases.	-44-
Figura 26	Malla de estudio en la zona de Los Azufres.	-49-
Figura 27	Malla de estudio en la zona de Alcaparrosa.	-50-
Figura 28	Gráfica de Probabilidad usando la $BDLAZ_{n=176}$.	-50-
Figura 29	Histograma y parámetros estadísticos obtenidos con la $BDLAZ_{n=176}$.	-51-
Figura 30	Método de Sinclair (1974) usando el valor z de la distribución normal probabilística con la base de datos $BDLAZ_{n=176}$.	-52-
Figura 31	Gráfica de Probabilidad usando la $BDALC_{n=90}$.	-53-
Figura 32	Histograma y parámetros estadísticos obtenidos con la $BDALC_{n=90}$.	-53-
Figura 33	Método de Sinclair (1974) usando el valor z de la distribución normal probabilística con la base de datos $BDALC_{n=90}$.	-54-
Figura 34	Genograma comparativo de flujos de CO ₂ en sistemas geotérmicos	-57-

Resumen

En este trabajo de tesis se expone la determinación de flujos de CO₂ que emanan de las zonas geotérmicas Los Azufres y Alcaparrosa ubicados en el estado de Puebla, así como la clasificación de dichos flujos a través del método gráfico estadístico. Las mediciones fueron realizadas de una campaña de campo durante febrero del año 2016. Los flujos de CO₂ fueron medidos utilizando la técnica de cámaras de acumulación, la cual utiliza un sensor infrarrojo de doble vía Licor LI-820 con una precisión entre 5-10 %.

La metodología de trabajo incluyó la preparación y verificación del equipo en laboratorio, el acondicionamiento del equipo en campo, el conocimiento de la zona y planeación del mallado, la medición del flujo de gases usando cámaras de acumulación, el procesamiento de los datos en laboratorio de cómputo, la depuración de datos y el cálculo del flujo total a través del método gráfico estadístico.

El método gráfico estadístico aplicado en la zona de los Azufres permitió clasificar los flujos en tres poblaciones diferentes: la población A contiene el 88 % de los datos, con una media de $10 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un rango entre $9\text{-}12 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90% de confianza; la población B representa el 7% de los datos, con una media $2,911 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un rango entre $2,545\text{-}3,596 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90 % de confianza; la población C representa el 5% de los datos con una media de $7,237 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un rango entre $5,984\text{-}10,255 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90% de confianza. Por otra parte, en la zona de Alcaparrosa la población A representa el 69 % de todas las mediciones de flujo de CO₂ mostrando una media de $10 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un rango entre $9\text{-}12 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90% de confianza; la población B representa el 31% de las mediciones restantes con una media de $686 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un rango entre $377\text{-}2,298 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90 % de confianza. Estos resultados indican un flujo de CO₂ total para la zona de Los Azufres de 223 Ton/día y para Alcaparrosa de 12 Ton/día . Estos valores se comparan con zonas volcánicas como el cráter Solfatara en Italia y el volcán Iwo Jima en Japón cuyos flujos reportados son de $5,530$ a $760 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ respectivamente.

Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis muestran los valores naturales de flujo de CO₂ de las zonas Los Azufres y Alcaparrosa, los cuales servirán como base para estudios posteriores de emanaciones de CO₂ en la etapa de explotación de ambos sistemas geotérmicos.

INTRODUCCION

Planteamiento del problema

La energía geotérmica es considerada como una fuente de energía renovable en la generación de electricidad alrededor del mundo. México ha aprovechado sus recursos geotérmicos a través de la explotación de sus sistemas hidrotermales de alta temperatura y actualmente se posiciona en sexto lugar reportando una capacidad geotérmica de 951 MW (TGE, 2018). Sin embargo, para aprovechar al máximo los recursos geotérmicos del país, existen proyectos estratégicos para impulsar la exploración de nuevos sistemas geotérmicos con alto potencial. Entre las zonas geotérmicas se encuentra el área de la Caldera de Acoculco ubicada en el estado de Puebla e identificada como un sistema geotérmico mejorado potencial (Flores-Armenta *et al.*, 2014, López-Hernández, 2009).

El sistema geotérmico de Acoculco se localiza en la franja oriental de la Faja Volcánica Transmexicana a 85 km al NW de la ciudad de Puebla y 180 km de la Ciudad de México (Pulido *et al.*, 2011; Viggiano-Guerra *et al.*, 2009). La zona ha sido estudiada desde 1981 con prospectiva geotérmica, principalmente por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con el objetivo de evaluar la posibilidad de explotar los recursos generados por el magmatismo que originó el complejo volcánico de Tulancingo-Acoculco (López-Hernández *et al.*, 2009). Algunos investigadores han catalogado la zona como un sistema de roca seca caliente por la ausencia de agua en el reservorio debido a una baja permeabilidad (Peiffer *et al.*, 2014). También es considerado como un sistema *kaipohan* cuyas anomalías geotérmicas presentes se asemejan a los sistemas geotérmicos filipinos, por ejemplo, la presencia de mofetas, alteración argílica y pozas de agua fría (Bogie *et al.*, 1987). Las zonas que han sido estudiadas previamente corresponden a Los Azufres y Alcaparrosa.

Los gases en los sistemas geotérmicos consisten en una mezcla de gases magmáticos, geotérmicos y meteóricos, los cuales pueden participar en reacciones de interacción con las rocas huéspedes del reservorio (Christenson y Tassi, 2015). El CO₂ en ambientes geotérmicos es el gas más abundante y los flujos se pueden medir con la técnica de la cámara de acumulación.

El transporte de los gases del reservorio a la superficie puede ser explicado a través de dos mecanismos (Chiodini *et al.*, 1998): mediante flujos difusivos y flujos advectivos. Los flujos bajos de dióxido de carbono se encuentran gobernados por procesos difusivos, mientras que los altos flujos de gas son gobernados por procesos advectivos (Chiodini *et al.*, 1998; Peiffer *et al.*, 2014).

La técnica de la cámara de acumulación es una herramienta analítica que nos permite evaluar las emanaciones de CO₂ en diferentes ambientes geológicos: estudios en relación con el flujo de gas con las estructuras tectónicas, la cuantificación de emanaciones naturales de CO₂ a la atmósfera, la desgasificación volcánica y la desgasificación de sistemas geotérmicos.

Justificación

Con el fin de impulsar la producción de electricidad con energías renovables, en este caso con la geotermia, y mitigar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, es necesario conocer el flujo de gases en los sistemas geotérmicos. En este sentido, existen pocos estudios de flujo de gases en las zonas de Los Azufres y Alcaparrosa los cuales han sido identificados como dos sistemas geotérmicos de alto potencial. Es aún necesario realizar mediciones de flujo de gases usando un número de mediciones alta, así como un mallado extenso para evaluar de mejor manera la estructura principal de los sistemas y su relación con el origen y las trayectorias de los fluidos. La técnica que nos permite evaluar dicho flujo de gases en suelo es la cámara de acumulación.

Hipótesis

Los flujos de CO₂ observados en las zonas de Los Azufres y Alcaparrosa son emanaciones difusas y advectivas de posible origen magmático.

Objetivo

Determinar las emisiones (*ton/día*) del flujo de CO₂ en los sistemas geotérmicos de Los Azufres y Alcaparrosa.

Objetivos específicos

- Medir los flujos de CO₂ usando el método de cámara de acumulación en Los Azufres y Alcaparrosa con un número de mediciones mayor a 100.
- Elaborar una base de datos de trabajo con mediciones depuradas.
- Realizar la clasificación de poblaciones aplicando el método de Sinclair.
- Evaluar el flujo total mediante la aplicación del método gráfico estadístico.

Capítulo 1

Energía Geotérmica

1.1 Conceptos Generales

La energía geotérmica se define como el calor natural que se encuentra en el interior de la superficie terrestre (Torres-Rodríguez, 1993). El 60% de este calor se origina por el decaimiento nuclear de elementos radioactivos y el 40% restante por el enfriamiento de la litosfera (Harsh y Sukanta, 2007). Debido a los procesos térmicos y de transferencia de calor, se estima un flujo térmico de $65 \text{ mW}/\text{m}^2$ en la corteza continental y $101 \text{ mW}/\text{m}^2$ en la corteza oceánica, generando un promedio global de $85 \text{ mW}/\text{m}^2$ (Pollack *et al.*, 1993).

En algunas regiones particulares existen valores anómalos de flujo de calor. Una hipótesis que explica este flujo es el movimiento de placas o deriva continental, la cual tiene dos teorías básicas (Harsh y Sukanta, 2007): (1) en la parte superficial de la litosfera existen largas placas rígidas sin ninguna deformación en su interior y (2) cada placa tiene un movimiento relativo con respecto a otras placas; donde los procesos de deformación tienen lugar en sus límites.

Existen tres principales movimientos entre placas, (Harsh y Sukanta, 2007): (1) la subducción de placas oceánicas con respecto a placas continentales, provocando la destrucción de la placa oceánica y las intrusiones magmáticas; (2) el proceso de divergencia entre placas, las placas se separan entre sí dejando un espacio que es rellenado con material proveniente de la Astenosfera y (3) debido a movimientos transformantes, en el cual las placas se mueven a distintas velocidades una con respecto a la otra promoviendo la entrada de material magmático. Estos movimientos de placa transportan material de mayor temperatura hacia la superficie provocando gradientes térmicos más elevados

La interacción entre la Placa Norteamericana, la Placa del Pacífico, la Placa de Cocos y la Placa del Caribe en la República Mexicana, genera regiones con alta actividad geotérmica, por ejemplo, localidades geotermales en la Cresta Oceánica Activa del Golfo de California, el Sistema de Fallas de San Andrés, el Sistema de Fallas de la Sierra Madre Oriental, el Cinturón Volcánico Transmexicano, la Cadena Volcánica Centroamericana, el Sistema de Fallas Motagua-Polochic, el Arco Magmático Peripacífico del Sur de México, la Sierra Madre Oriental, la Planicie Costera del Golfo de México y la grieta del Río Bravo. Por este motivo y acorde a Torres-Rodríguez (1993) se

han identificado 1,380 manifestaciones termales en 27 Estados, de los cuales, 808 corresponden a manantiales termales, 526 a pozos de agua caliente, 25 fumarolas, 11 zonas con hervideros, 6 volcanes de lodo, 3 de suelos calientes y una noria de agua templada.

1.1.1 Sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos pueden ser ubicados en regiones con gradientes térmicos superiores al normal ($\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$) especialmente sobre los márgenes de las Placas Tectónicas (Dickson y Fanelli, 2004). Los componentes necesarios para que un sistema geotérmico exista son (Santoyo *et al.*, 1993): una fuente de calor (comúnmente originada por la presencia de cuerpos intrusivos de alta temperatura relacionados a un vulcanismo reciente), un fluido de trabajo (tanto de acuíferos termales como de recarga de aguas meteóricas) y una capa sello que facilita la presurización del sistema, impidiendo fugas de masa y energía (Figura 1).

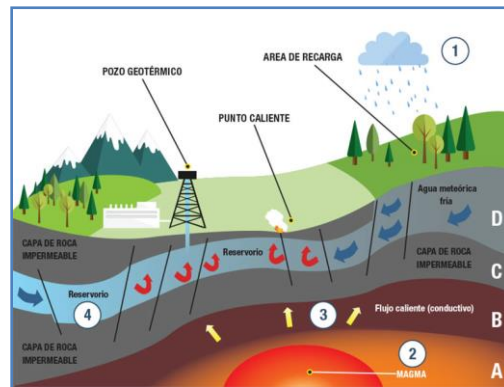


Figura 1 Esquema general de un sistema geotérmico de tipo hidrotermal: (1) Zona de recarga, (2) Fuente de calor, (3) Zona de transferencia de calor por conducción y (4) Yacimiento geotérmico. Tomado de UREE (2016).

Los sistemas geotérmicos se clasifican en función de su ambiente geológico y el régimen de transferencia de calor (Santoyo *et al.*, 1993) dividiéndose en dos categorías principales: sistemas geotérmicos convectivos y sistemas geotérmicos conductivos (Rybach, 1981).

1.1.1.1 Sistemas geotérmicos convectivos

Estos sistemas están relacionados con una porosidad y permeabilidad altas, que permite la circulación natural del flujo, el cual genera el mecanismo de convección dentro del reservorio. En esta categoría existen dos subdivisiones (Santoyo *et al.*, 1993):

a) Sistemas de vapor dominante.

En estos sistemas el fluido principal es vapor de agua, el cual proviene de la ebullición del agua en la profundidad. Dicho vapor es transportado por fracturas hasta la superficie donde se condensa y se drena como líquido a través de la roca matriz.

b) Sistemas de líquido dominante

Son sistemas cuya característica principal es la producción de agua presurizada a temperaturas altas (entre 350 °C a 150 °C), intermedias (entre 90 °C a 150 °C) y bajas (≤ 90 °C). En este tipo de sistema, una fracción del líquido pasa como vapor al acercarse a la superficie debido a la caída de presión, lo que es conocido como “*flasheo*”. En estos sistemas el agua líquida domina el perfil de presión-profundidad. Otra forma en la cual se conocen estos sistemas es por su alta o baja entalpía. Los sistemas de alta entalpía son usados principalmente para la producción de energía eléctrica, mientras que los de baja entalpía son utilizados en usos directos como secado de maderas, insumos orgánicos y/o balneología.

1.1.1.2 Sistemas geotérmicos conductivos

Estos sistemas tienen una baja permeabilidad en el reservorio, ocasionando poca presencia de líquido y vapor. Dentro de esta categoría se encuentran los siguientes sistemas descritos a continuación (Santoyo *et al.*, 1993):

a) Sistemas de roca seca caliente.

Este tipo de sistema geotérmico es concebido como una nueva generación de sistemas con un alto potencial geotérmico (Santoyo y Torres-Rodríguez, 2010). Como característica geológica propia, generalmente están compuestos por rocas cristalinas no permeables (Tester *et al.*, 2007). Los sistemas de roca seca caliente son nombrados sistemas geotérmicos mejorados cuando se desarrolla un yacimiento artificial fracturado mediante técnicas de fractura hidráulica acompañado de inyección de agua a temperatura ambiente (Santoyo y Torres-Rodríguez, 2010).

b) Sistemas geotérmicos geopresurizados

Este sistema contiene agua y metano disuelto a presiones elevadas (aproximadamente 790 atm) y temperaturas entre 90 °C y 200°C. Generalmente estos sistemas están confinados en yacimientos de roca sedimentaria (Sanyal, 2010). Existen detectados algunos sistemas en

Texas y Luisiana EE. UU. (Lund *et al.*, 2010). Se desconoce el potencial de este recurso en México (Santoyo y Torres-Rodríguez, 2010).

c) Sistemas geotérmicos radiogénicos

Son sistemas asociados a intrusiones graníticas con el calor generado por el decaimiento radiactivo de isótopos de torio, potasio y uranio, lo cual calienta el agua subterránea local. Este calentamiento incrementa los gradientes geotérmicos arriba del promedio global y provee un fluido factible de aprovecharse con la perforación de pozos profundos (Santoyo y Torres-Rodríguez, 2010).

1.2 Situación actual de la geotermia en el Mundo

En el rubro de las energías renovables, la energía geotérmica excede tres veces la producción de electricidad en comparación con las energías eólica y solar a nivel mundial, aunque estas últimas crecen de forma exponencial (Rybach, 2010).

1.2.1 Producción de electricidad

La capacidad instalada de energía geotérmica aumentó 1.8 *GW*, con una tendencia lineal de 350 *MW* por año, durante el periodo 2010-2015 alrededor del mundo (Bertani, 2015). En la Figura 2 se muestran los principales países productores de energía geotérmica, así como aquellos que tienen perspectivas de generación.



Figura 2. Países con recursos geotérmicos explorados y explotados.

La mayor capacidad instalada de energía geotérmica se encuentra en el continente americano con 5,130 *MW* reportados durante el periodo de 2010-2015, seguido de Asia con 3,757 *MW*, Europa con 2,143 *MW*, Oceanía con 1,056 *MW* y África con 643 *MW* como se observa en la Figura 3.

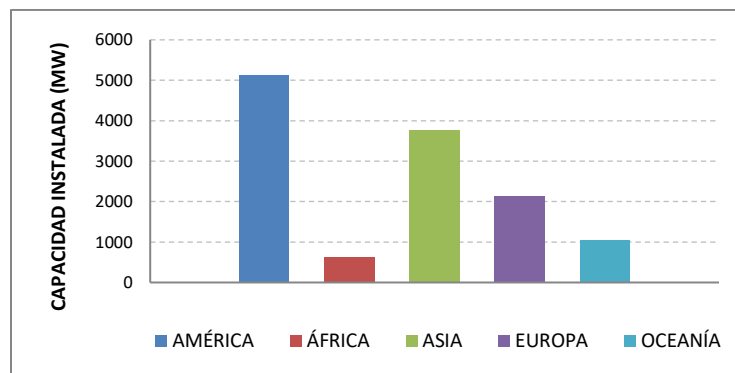


Figura 3. Capacidad Instalada de Energía Geotérmica por Continente

1.2.2 Usos directos de la geotermia

El uso directo de la energía geotérmica es una de las formas más antiguas, versátiles y comunes para la utilización de la energía de la Tierra (Dickson y Fanelli, 2004). Se tiene documentado que el uso directo de la geotermia tiene cerca de 2,000 años (Cataldi *et al.*, 1999; Lund y Boyd, 2015).

La distribución de la energía térmica usada por esta categoría es 55.2% por bombas de calor geotérmicas, 20.2% para baños (incluyendo la balneología, 15% para calentar espacios), 4.9% se usa en invernaderos y para calentamiento a suelo abierto, 2% para calentar estanques de acuicultura y carreteras, 1.8% para procesos térmicos industriales, 0.4% para derretir nieve y enfriamiento, 0.3% para secado de agricultura y 0.2% para otros usos (Lund y Boyd, 2015).

El total de la capacidad instalada para la utilización directa de la energía geotérmica en todo el mundo en el año 2014 es de 70,885 MWt, el cual muestra un incremento del 46.2% con respecto al año 2010. Lo anterior indica un crecimiento anual del 6.9% acorde a Lund y Boyd (2015).

1.3 Situación actual de la Geotermia en México

1.3.1 Antecedentes

El desarrollo de la energía geotérmica en México comenzó en 1955 con la perforación del primer pozo perforado en Pathé, Hidalgo (Hernández-Galán, 1985). En agosto de 1956 fue instalado el primer generador de electricidad dando como resultado la primera central geotermoeléctrica de México y América Latina. Dicho resultado fue debido a los trabajos del Ingeniero Luis F. de Anda quien promovió el uso de la energía de la Tierra para la producción de electricidad (Hiriart y Gutiérrez-Negrín, 2003). Posteriormente en 1980 en el estado de Baja California Norte, cerca del volcán Cerro Prieto, diversos pozos fueron perforados lo que generó el descubrimiento de una

nueva zona promisorio con capacidad de 700 MWe (Hernández-Galán,1985). Actualmente el campo geotérmico de Cerro Prieto es uno de los principales campos productores a nivel internacional (Bertani, 2015).

1.3.2 Situación actual

Existen cuatro centrales geotérmicas operando en el territorio nacional: Cerro Prieto, en Baja California Norte, Las Tres Vírgenes, en Baja California Sur, Los Azufres, en Michoacán, y Los Humeros, en Puebla (Figura 4). Sin embargo, en el año 2014 fue instalado el primer campo geotérmico de iniciativa privada: Domo de San Pedro ubicado en el estado de Nayarit.



Figura 4. Plantas Geotérmicas de la República Mexicana. Tomado de (Hiriart y Gutiérrez-Negrín, 2003).

En el año 2015, el país produjo un total de energía de 261,067 GWh, de la cual 6,291 GWh fueron producidos por las centrales geotérmicas principales (SENER, 2016a).

1.3.3 Principales Centrales Geotérmicas

Cerro Prieto

El campo geotérmico Cierro Prieto se localiza en la parte Norte del país, actualmente es la central geotérmica más importante de México. Se encuentra sobre una cuenca formada del sistema de fallas de San Andrés. La fuente de calor parece ser debido a una intrusión básica (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015), la cual tiene como origen el adelgazamiento de la corteza continental. Una secuencia de rocas sedimentarias (areniscas en esquistos), de un promedio de 2,400 metros de espesor, sirve como anfitrión de los fluidos geotérmicos (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015). Se han perforado un total de 429 pozos con una profundidad promedio de 2,430 m. Actualmente existe un total de 158 pozos

productores y 17 pozos de inyección (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015). En el año 2016 la SENER reportó que la central geotérmica de Cerro Prieto tenía 13 unidades con un potencial neto de 570 MW (SENER, 2016b).

Los Azufres

La central geotérmica Los Azufres se localiza en la parte central de México, a 250 km de la Ciudad de México, en la región del cinturón volcánico transversal mexicano. Los fluidos geotérmicos interactúan con roca volcánica, principalmente andesitas, cuya permeabilidad secundaria se debe a tres fallas dentro del sistema. La fuente de calor parece ser debido a una cámara magmática cerca del volcán San Andrés (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

En el año 2013 se reportaron 39 pozos de producción y 6 pozos de inyección en operación, cada pozo produce en promedio 43.8 toneladas de vapor por hora, generando un consumo de 9.72 toneladas de vapor por cada MWh generado.

La potencia instalada del campo es de 194 MWe, de los cuales 50 MWe son de una unidad de condensación de flasheo, cuatro unidades de flasheo de 26.5 MWe, siete unidades de 5 MWe de *Back-pressure* y dos unidades de ciclo combinado de 1.5 MWe, las cuales se reportaron fuera de operación en el 2013, aportando una capacidad instalada efectiva de 191 MWe (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

Los Humeros

El campo geotérmico Los Humeros se localiza en la parte Oriental del cinturón volcánico transversal mexicano, es de tipo volcánico y el sistema se encuentra en una caldera Cuaternaria. Los fluidos geotérmicos yacen en andesitas que se superponen en una base compleja de rocas metamórficas, sedimentarias y plutónicas. El origen del calor proviene de una cámara magmática producto de las calderas de Los Humeros y Los Potreros (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

En la zona se encuentran 23 pozos productores de los cuales emanan 624 ton/h de vapor y 80 ton/h de agua en promedio anual, siendo esta última reinyectada mediante 2 pozos de inyección. La capacidad instalada del campo es de 93.4 MWe, compuesta por dos unidades de flasheo de 26.5 MWe cada una y ocho unidades de *Back-pressure* de 5 MWe (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

Actualmente se encuentra en construcción Los Humeros III Fase A y en proyección la Fase B, con la instalación de una unidad de 25 MW para la Fase A y de 27 MW para la Fase B en el 2018 (SENER, 2016c; Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015)

Las Tres Vírgenes

La central geotérmica Las Tres Vírgenes, localizada en la parte Norte de Baja California Sur, es el campo más pequeño operando en México. El campo geotérmico se encuentra dentro de un complejo volcánico cuaternario compuesto por tres volcanes alineados de forma N-S. Los fluidos geotérmicos yacen en un conjunto de rocas intrusivas (granodiorita), la fuente de calor es una cámara magmática del volcán más joven localizado en el sur del complejo, el volcán de La Virgen (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

En el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes existen 4 pozos productores cuya producción promedio anual es de 24 *ton/h* de vapor y 69 *ton/h* de salmuera los cuales son reinyectados mediante un pozo inyector. En promedio se consumen 14.4 *ton* de vapor por cada *MWh* producido, la central tiene dos unidades de condensación de 5 *MWe* de potencia con un factor de planta del 62.3% reportado en el año 2013 (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015).

1.3.4 Usos Directos

México cuenta con un total de 1,380 manifestaciones térmicas reportadas, de las cuales 808 corresponden solamente a manantiales termales (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015). Estas manifestaciones son utilizadas principalmente en el área de la balneología y recreación. Por lo que la mayoría de las instalaciones para usos directos son balnearios y centros terapéuticos. Algunas instalaciones son operadas por los tres niveles de gobierno a través de oficinas de turismo y en algunos otros casos a través de instituciones como el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS).

El país tiene una capacidad instalada de 155.8 *MWt* para usos directos (Tabla 1), de los cuales 155.3 *MWt* son en balnearios, 0.46 *MWt* para calentamiento de espacios, 0.004 *MWt* como calefacción de invernaderos y 0.007 *MWt* para el secado de productos agrícolas. De las instalaciones de uso directo de la energía geotérmica, diferentes a la balneología, han sido desarrolladas por la CFE en el campo geotérmico de Los Azufres en Michoacán.

Tabla 1. Usos directos de la energía geotérmica en México.

Localidad	Tipo ¹	Utilización Máxima				Capacidad ³ [MWt]	Utilización Anual			
		Flujo Másico [kg/s]	Temperatura [°C]		Entalpía ² [kJ/kg]		Flujo Prom. [kg/s]	Energía ⁴ [TJ/año]	Factor de Capacidad ⁵	
			Entrada	Salida	Entrada					Salida
Los Azufres, Mich.	A	0.100	77.0	60.0			0.007	0.030	0.067	0.3
Los Azufres, Mich.	B	38.000	72.0	55.0			2.703	34.960	78.391	0.92
Los Azufres, Mich.	G	0.050	60.0	40.0			0.004	0.011	0.028	0.21
Los Azufres, Mich.	H	4.583	110.0	86.0			0.460	1.389	4.397	0.303
La Primavera Jal.	B	63.000	48.0	31.0			4.481	58.650	131.511	0.931
Aguascalientes*	B	265.000	43.0	30.0			14.414	194.139	332.89	0.732
Chiapas*	B	1000.000	36.0	29.0			29.288	847.656	782.64	0.847
Chihuahua*	B	38.000	39.3	25.0			2.274	29.680	55.982	0.781
Coahuila*	B	56.000	32.0	25.0			1.640	33.390	30.829	0.596
Durango*	B	34.000	52.5	38.0			2.063	15.975	30.553	0.47
Guanajuato*	B	293.000	40.8	29.0			14.466	254.232	395.692	0.867
Hidalgo*	B	271.000	41.5	32.0			10.772	250.800	314.265	0.925
Jalisco*	B	368.000	37.8	30.0			12.010	316.350	325.467	0.859
México*	B	103.000	35.1	25.0			4.353	95.424	127.123	0.926
Michoacán*	B	161.000	44.5	33.0			7.747	152.785	231.752	0.949
Morelos*	B	95.000	45.0	30.0			5.962	74.580	147.557	0.785
Nuevo León*	B	295.000	38.0	30.0			9.874	250.700	264.539	0.85
Querétaro*	B	770.000	31.8	26.5			17.075	697.174	487.373	0.905
San Luis Potosí*	B	292.000	36.8	31.0			7.086	233.888	178.929	0.801
Sinaloa*	B	7.000	72.5	61.0			0.337	4.601	6.979	0.657
Tlaxcala*	B	10.000	35.0	28.0			0.293	8.308	7.671	0.831
Veracruz*	B	42.000	65.0	48.0			2.987	39.328	88.185	0.936
Zacatecas*	B	163.000	36.6	28.5			5.524	138.700	148.186	0.851
Total		4,368.73	47.1	35.5			155.819	3,732.75	4,171.00	0.849

*Incluido el estimado total del flujo de todos los sitios de balneología en el Estado y su temperatura promedio de entrada y de salida.

¹ Tipo: A: Secado en Agricultura, B: Balneología y nado, G: Invernaderos, H: Calefacción de espacios (otros que bombas de calor).

² La información de Entalpía es dada solo si hay vapor o un flujo de dos fases.

³ Capacidad (MWt) = Máximo flujo másico (kg/s) x [temperatura de entrada (°C) - temperatura de salida (°C)] x 0.004184

⁴ Uso de Energía (TJ/año) = Promedio de flujo másico (kg/s) x [temperatura de entrada (°C) - temperatura de salida (°C)] x 0.1319

⁵ Factor de Capacidad = [Uso Anual de la Energía (TJ/año) / Capacidad (MWt)] x 0.03171

Tomado de Gutiérrez-Negrín et al., (2015).

1.3.5 Prospectivas: Potencial geotérmico y proyectos a futuro

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) llevó a cabo un cálculo del potencial en base del inventario nacional de manifestaciones termales registradas superficialmente y de temperaturas calculadas por medio de geotermómetros químicos. Se han clasificado 1,380 manifestaciones discernidas en recursos de alta, media y baja entalpía. Posteriormente, el potencial geotérmico nacional fue evaluado utilizando un método volumétrico, lo cual permitió una clasificación de reservas: posibles, probables y probadas (Ordaz *et al.*, 2011).

Las reservas posibles tienen información geológica y de diseño que sugiere una recuperación de una probabilidad del 10%. Como resultados se tienen reservas posibles de alta entalpía de 5,692 MWe, de media entalpía de 881 MWe y de baja entalpía de 850 MWe generando un total de 7,423 MWe en el país (Ordaz *et al.*, 2011).

Las reservas probables involucran el análisis geológico y de ingeniería de yacimientos con mayor factibilidad de ser comercialmente viables. Si se emplean métodos probabilísticos para su evaluación (p. ej., Monte Carlo) habrá una probabilidad de al menos 50% de que las cantidades a recuperar sean iguales o mayores a las reservas estimadas. En este contexto, México cuenta con 1,644 *MWe* de alta entalpía, 220 *MWe* de media entalpía y 213 *MWe* de baja entalpía generando un total de 2,077 *MWe* probables para explotación (Ordaz *et al.*, 2011).

1.3.5.1 Aspectos institucionales, jurídicos e inversión

El Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (conocido como CeMIE-Geo) es un proyecto del gobierno federal el cual tiene como objetivo establecer una alianza entre la academia y la industria mediante el apoyo de la Secretaría de Energía (SENER) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Esta alianza promueve el desarrollo y la innovación en energía geotérmica, la formación de recursos humanos especializados, el fortalecimiento de infraestructura y la creación de laboratorios especializados en geotermia.

El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) es la institución responsable de las actividades del CeMIE-Geo. El 9 de mayo del 2016 se realizó la inauguración del nuevo edificio oficial del CeMIE-Geo donde se encuentran laboratorios especializados para desarrollar proyectos de exploración geotérmica (Figura 5).



Figura 5. Edificio Oficial del CeMIE-Geo (CICESE). Tomado de CeMIE-Geo (2017).

Actualmente las instituciones que forman parte del CeMIE-Geo son: la Universidad Nacional Autónoma de México a través de los siguientes institutos: Instituto de Geofísica, Centro de Geociencias, Instituto de Energías Renovables, Instituto de Ingeniería y el Instituto de Geología. El CICESE, La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, El Instituto Nacional de

Electricidad y Energías Limpias, El Centro de Tecnología Avanzada A.C., La Universidad de Guadalajara y La Universidad Politécnica de Baja California también forma parte del CeMIE-Geo.

Las líneas de investigación se agrupan en cuatro grandes sectores: 1) evaluación de los recursos geotérmicos nacionales, 2) desarrollo e innovación de técnicas de exploración, 3) desarrollo tecnológico para explotación y 4) usos directos del calor geotérmico.

Ley de Energía Geotérmica

La Ley de Energía Geotérmica tiene 67 artículos y 138 transitorios los cuales tienen como objetivo generar un marco jurídico que regule el aprovechamiento de yacimientos geotérmicos, impulsar el desarrollo sustentable, mejorar las tarifas para la competitividad y cuidar la integridad y sustentabilidad de los yacimientos geotérmicos (Gutiérrez-Negrín, 2014). En resumen, la Ley de Energía Geotérmica está estructurada de tres partes principales: (1) reconocimiento, (2) exploración y (3) explotación como se observa en la Figura 6.



Figura 6. Resumen de la Ley Geotérmica Mexicana (2017)

En la fase de reconocimiento se determina la existencia de recursos geotérmicos para la generación de energía eléctrica o usos diversos, se permite el análisis de rocas, muestreos geoquímicos y geohidrológicos, entre otros. Los permisos ante la Secretaría de Energía (SENER) deben ser tramitados dentro de un periodo de ocho meses, se debe realizar una consulta indígena, previa, libre e informada y respetar los derechos humanos y sociales de los particulares, ejidatarios, comuneros o dueños de los predios. En la fase de exploración se llevan a cabo estudios de exploración geológica, geofísica y geoquímica para cuantificar el recurso geotérmico. El área máxima permitida de exploración es de 150 km² y las actividades de exploración se pueden realizar hasta por tres años. Toda la información obtenida en esta fase se debe reportar a la SENER. Finalmente, en la fase de explotación se realizan los trámites necesarios para obtener la concesión de la zona para la producción de electricidad acompañado de estudios de impacto ambiental.

Inversiones y vinculación

En el año 2015 la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a través del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética lanzaron la convocatoria de cooperación internacional en investigación y desarrollo entre México y la Unión Europea en energía geotérmica con el propósito de desarrollar proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en materia de energía geotérmica que permita aplicar y desarrollar metodologías y tecnologías en el campo de los Sistemas Geotérmicos Avanzados (EGS, por sus siglas en inglés, *Enhanced Geothermal Systems*) y de los Sistemas Geotérmicos Súper calientes (SHGS, por sus siglas en inglés, *Super-hot Geothermal Systems*), en cooperación entre México y la Unión Europea

La inversión otorga un financiamiento por partes iguales entre México y la Unión Europea con un total de 20 millones de euros, los cuales serán otorgados en los próximos dos años (2016-2019). Estos recursos provienen de la Unión Europea por el programa Horizonte 2020 y del Fondo de Sustentabilidad Energética (SENER-CONACYT) por parte de México.

Debido a la reforma energética y las bases establecidas por la ley de energía geotérmica, una empresa filipina llamada *Energy Development Corp* está evaluando el desarrollo de proyectos geotérmicos en México. Sin embargo, debido a los bajos costos del petróleo a nivel mundial, la empresa detuvo sus proyectos en otras naciones, mientras se encuentran evaluando posibilidades.

Otro caso de interés lo presenta la empresa francesa *Engie* y la empresa islandesa *Reykjavik Geothermal*, siendo esta última una empresa activa en el sector de la energía geotérmica en México desde 2011 con la participación en el proyecto del volcán Ceboruco, en el Estado de Nayarit. La SENER ha otorgado concesiones a dicha empresa para realizar actividades de exploración geotérmica en el volcán Ceboruco, la cual prevé que la primera planta inicie operaciones en 2018.

Por otra parte, la empresa de seguros *Múnich Re* inicia programas de seguros para explotación geotérmica, esto mediante un paquete financiero de tres partes (Rojas, 2016): (1) los pozos exploratorios a nivel comercial no asegurables pasan a un fondo de riesgo financiado por el Banco Interamericano de desarrollo y el fondo de tecnología limpia (*Clean Technology Fund*), (2) Las primas de seguro de los pozos serán parcialmente subsidiadas por un fondo de “subvenciones “premium” por la SENER y (3) el banco de desarrollo Nafin otorgará a los proyectos de un paquete de préstamos de bajo interés para financiar todas las fases del proyecto.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Exploración geotérmica

El objetivo principal de la exploración geotérmica es la localización del reservorio y la evaluación del recurso geotérmico lo más preciso posible. Para el logro de este objetivo es necesario realizar estudios de exploración geológicos, geofísicos y geoquímicos que permitan ubicar las anomalías geotérmicas. Una vez realizados los estudios se procede a la estimación del recurso energético e inicia la perforación de pozos exploratorios. En el presente capítulo se exponen las principales actividades realizadas durante la exploración geotérmica para la evaluación de sistemas geotérmicos.

2.1.1 Métodos geológicos

La exploración geológica de sistemas geotérmicos incluye tres actividades importantes: (1) trabajo previo a la salida de campo, (2) muestreo en la campaña de campo y (3) análisis en laboratorio. En la primera actividad se realiza una investigación bibliográfica incluyendo reportes técnicos, mapas, consulta de datos satelitales y análisis espectral con el objetivo de generar un mapa geológico preliminar, evaluar rutas y puntos de muestreo. Para esto, es necesario identificar elementos geohidrológicos, arroyos principales, patrones de drenaje, ubicar manifestaciones hidrotermales e interpretar estructuras geológicas, fallas, pliegues y litologías.

El mapeo geológico superficial se realiza con imágenes satelitales y fotografías aéreas. En ambos casos se obtienen rasgos superficiales como: fallas, alineamientos y zonas de alteración hidrotermal. Los satélites que proporcionan estos servicios son: GeoEye, EROS (Digital Globe, Spot Image y Earth Resources Observation Satellites) y Landsat. En el caso del mapeo aéreo este se realiza mediante la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection), en el primer caso funciona para determinar la topología y relieve de la región y en el segundo caso para desarrollar mapeos de temperatura, emisividad y reflectancia mediante tecnología hiperespectral (Hiriart et al., 2011).

Durante la campaña de campo se debe conocer las coordenadas de GPS en el mapa geológico preliminar, reconocer y describir las unidades geológicas, litología y el tipo de alteración hidrotermal. La recolección de muestras de afloramiento debe realizarse sin evidencias de alteraciones para el análisis mineralógico y geoquímico. Posteriormente, se realiza el reconocimiento y descripción de estructuras, fallas, fracturas, pliegues y ventilas. Una parte importante es la descripción de la zona, por ejemplo: la evidencia de explosiones hidrotermales puede ser observada en la zona. A diferencia de las erupciones volcánicas, las explosiones hidrotermales producen hidroclastos, tefras, tobas zeolíticas, escorias de sílice y travertinos como los observados en la Caldera de Acoculco, Puebla (Figura 7).



Figura 7 Cráter formado por una explosión hidrotermal en la zona de Alcaparrosa. Tomado de Canet *et al.* (2015).

Finalmente se realiza el muestreo de alteraciones hidrotermales, recolección de muestras de roca alterada, suelo o sedimento. También se realiza un muestreo detallado de los alrededores de las emanaciones termales (p. ej., costras, agregados, brechas, etc.), muestreo para análisis especializados como carbonatos, sulfatos y fases de sílice para microtermometría de inclusiones fluidas, química mineral, isótopos y arcillas. En la Tabla 2 se muestran los diferentes tipos de análisis que se realizan en las muestras de roca obtenidas en las campañas de exploración geotérmica.

Tabla 2. Técnicas analíticas comúnmente usadas durante la exploración geológica.

Tipo de análisis	Técnicas Analíticas	Aplicación
Mineralógico	Microscopía	Asociaciones minerales, textura
Mineralógico	Difracción de Rayos X (DRX)	Identificación de fases cristalinas
Mineralógico	Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)	Formación de fases secundarias
Mineralógico	Espectroscopía de energía dispersa (EDS)	Determinación de la composición cualitativa de minerales
Mineralógico	Microsonda electrónica	Análisis composicional
Geoquímico	Fluorescencia de rayos X (XRF)	Determinación de óxidos mayores en roca
Geoquímico	Espectrometría de masas acoplado a ICP-MS	Determinación de elementos traza

2.1.2 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos se encargan de brindar información acerca del subsuelo, permitiendo trazar información sobre la estratigrafía, dimensión y localización del sistema geotérmico. Las características propias de cada método han permitido que diferentes autores los clasifiquen en general como (Flóvenz et al., 2010; Bruhn et al., 2010; Hiriart et al., 2010): métodos eléctricos, métodos sísmicos y métodos potenciales.

Los métodos eléctricos son los más importantes para la exploración geotérmica debido a que poseen una alta sensibilidad a la temperatura y a los procesos de alteración hidrotermal, los cuales están directamente relacionadas con los parámetros que caracterizan a los reservorios geotérmicos (Flóvenz et al. 2010). Estos métodos se encargan de medir la resistividad eléctrica en superficie y en subsuelos.

En general la mayoría de las rocas tienen una baja conductividad eléctrica, la cual puede aumentar cuando sus poros se llenan de agua y ésta a su vez se ve afectada en relación de la cantidad de solutos existentes. Otros aspectos que mejoran la conductividad eléctrica de las rocas son las altas temperaturas (Bruhn et al., 2010) y un aumento de temperatura de 25 °C a 200°C puede significar el aumento en una orden de magnitud de la conductividad eléctrica.

Las rocas que forman los sistemas geotérmicos poseen distintos valores de resistividad, las rocas volcánicas y de carbonatos, por lo general, presentan valores altos de resistividad, mientras que las arcillas y los esquistos tienen los valores más bajos (Bruhn et al., 2010).

2.1.2.1 Método de corriente directa

El método de corriente directa es más usado para medir la resistividad eléctrica en el subsuelo. Los sondeos de corriente directa están basados en el principio de que un campo eléctrico, el cual es producido en la superficie debido a la corriente transmitida en el subsuelo a través de un electrodo. La medición del campo eléctrico se realiza midiendo la diferencia de potencial entre un par de electrodos. Esta diferencia se encuentra relacionada con la distribución de resistividad eléctrica de los suelos y con las rocas que yacen en los alrededores (Flóvenz *et al.*, 2010; IGA, 2014).

2.1.2.2 Métodos Magnetotelúricos

Los métodos magnetotelúricos son métodos pasivos que miden las resistividades del subsuelo a través de corrientes eléctricas debajo de la superficie terrestre que se inducen por las fluctuaciones del campo magnético por procesos naturales como relámpagos, resonancia ionosférica o variaciones en el viento solar (IGA, 2014).

2.1.2.3 Métodos sismológicos

La prospección sismológica consiste en medir las ondas sísmicas que se propagan a través de la masa de roca. Las propagaciones de las ondas sísmicas dependen de las propiedades mecánicas de la roca (p.ej. compresibilidad, rigidez y densidad) cuando las ondas cambian de interfaz con propiedades de roca distintas, esta se refleja y refracta, lo que da información en superficie del tipo de estructura a profundidad. La actividad sísmica se registra mediante sismómetros y sismógrafos. Los equipos de medición de tres componentes son los más adecuados para estudios de prospección (Hiriart *et al.*, 2011).

2.1.2.4 Métodos Gravimétricos

Los métodos gravimétricos son métodos potenciales, los cuales se fundamentan en la observación experimental de las variaciones del campo gravitacional terrestre debido a las variaciones de la masa de la corteza terrestre (p. ej., rasgos litológicos y estructurales), la unidad de medición de las anomalías gravitacionales es el gal [1 cm/s^2] (Hiriart *et al.*, 2011).

2.1.2.5 Métodos Magnéticos

Los métodos magnéticos miden la variación del campo magnético terrestre debido a la magnetización inducida de cuerpos rocosos en el subsuelo. Las mediciones geomagnéticas intentan relacionar dichas anomalías con la naturaleza, forma, tamaño y profundidad de dichos cuerpos

(Telford et al., 1990). En general existen dos formas de medir la variación espacial del campo magnético, en superficie y en muestreos aeromagnéticos donde los perfiles de altura y espacio dependen mayoritariamente en la densidad de los valores, por lo general se realizan a una elevación superior a 100 m del suelo y 100 m de espaciamiento entre las líneas del mallado (Kana et al., 2015).

Los resultados de los muestreos se realizan a través de mapas de contorno, en ellos se puede apreciar las anomalías magnéticas que pueden estar relacionadas a procesos ígneos, sedimentarios y secundarios (alteración por entrada o salida de minerales magnéticos). En particular las principales actividades geotérmicas se encuentran correlacionadas a una baja intensidad magnética (Flóvenz et al., 2012; Kana et al., 2015).

2.1.3 Métodos geoquímicos

Las principales características que presentan la mayoría de los sistemas geotérmicos son las emanaciones de fluidos (agua y gas) a través de manifestaciones geotérmicas como: manantiales calientes, albercas de lodo, fumarolas, pozas calientes, sulfataras, mofetas, filtraciones de gas, geiseres, y suelos vaporizantes (Nicholson, 1993).

En los manantiales termales domina la salida de agua con temperatura mayor a la temperatura ambiente, en las fumarolas existe vapor de agua junto con gases como CO₂ y gases ácidos (p. ej., para el caso de las sulfataras su emanación principal es una fumarola de dióxido de azufre o ácido sulfhídrico; Nicholson *et al.*, 1993), las mofetas emanan principalmente CO₂ y los géiseres son emanaciones principalmente de líquido a presiones y temperaturas altas (Bogie *et al.*, 1987).

En general los métodos geoquímicos utilizados durante la exploración incluyen: el muestreo de fluidos geotérmicos, clasificación del tipo de agua, evaluación de origen del agua, evaluación del equilibrio en reservorio, estimación de la temperatura del reservorio y evaluación del intrusivo.

La exploración geoquímica de los sistemas geotérmicos se realiza una vez identificadas las manifestaciones geotérmicas en superficie. La recolección de muestras se divide en dos partes principales: (1) análisis de muestras de líquidas y (2) análisis de gases geotérmicos.

2.1.3.1 Muestreo de agua geotérmica

La recolección de análisis de muestras líquidas incluye: (1) la preparación y calibración de equipos antes de salir a campo, (2) la recolección de muestras, (3) medición de parámetros en sitio y (4) manejo de coordenadas. Los equipos usados para el muestreo de agua son pH-metro,

conductímetro, termómetro, microbureta y botellas de teflón para el muestreo. Los equipos de pH-metro y conductímetro deben estar debidamente calibrados antes de recolectar la muestra. En el manejo de la microbureta se debe tener valoradas las soluciones usadas para realizar la titulación y las botellas para almacenar los líquidos deben de estar libres de cualquier impureza.

La recolección de muestras líquidas se realiza siguiendo los protocolos de muestreo tradicionales. Un mal muestreo puede invalidar el trabajo de campo, generar interpretaciones erróneas e incrementar costos para la debida corrección de datos. En el laboratorio se debe cumplir con las normas establecidas para no contaminar las muestras y generar los resultados con alto grado de precisión y exactitud. Existen diferentes técnicas de muestreo de líquidos en un sistema geotérmico. La Figura 8 muestra un ejemplo de una técnica de muestreo de un manantial hidrotermal.

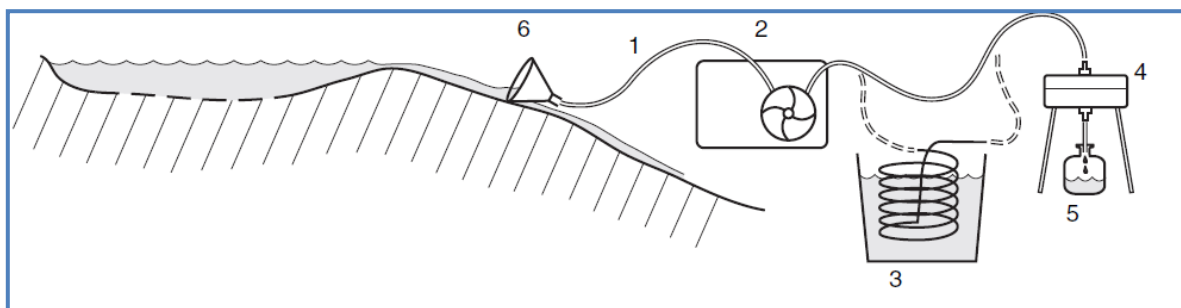


Figura 8. Representación gráfica de recolección de muestra de agua geotérmica: (1) manguera flexible, (2) bomba, (3) enfriamiento de la muestra, (4) filtro, (5) recolección de la muestra, (6) embudo (Tomado de Arnórsson *et al.*, 2006).

El análisis de las muestras de agua incluye la determinación de elementos mayores, elementos traza e isótopos estables. Los resultados generados de la geoquímica del agua son muy importantes ya que con ellos podemos inferir la temperatura del reservorio geotérmico y origen de los fluidos principalmente. En la Tabla 3 se muestran algunas técnicas analíticas usadas durante la exploración geoquímica de líquidos.

Tabla 3. Técnicas analíticas usadas durante la exploración geoquímica.

Tipo de muestra	Técnicas Analíticas	Aplicación
Agua	Cromatografía Iónica	Determinación de componentes mayores
Agua	Espectrometría de masas acoplado a ICP-MS	Identificación de componentes traza
Agua	Espectrofotómetro	Determinación de isótopos estables
Gas	Titulometría	Determinación de gases mayoritarios
Gas	Cromatografía	Determinación de gases traza

2.1.3.2 Muestreo de gases geotérmicos

Los métodos usados para la recolección y análisis de muestras gaseosas en los sistemas geotérmicos son: el método de Giggenbach y la medición de flujo de gases en suelo. El método Giggenbach utiliza botellas especiales para realizar el muestreo. En la Figura 9 se muestra la configuración de una botella tipo Giggenbach.

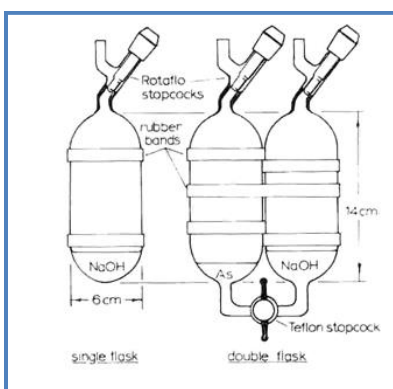


Figura 9. Configuración de la botella Giggenbach (Tomado de Giggenbach, 1975).

La botella de Giggenbach se prepara a vacío con una solución de NaOH para condensar los gases CO_2 y H_2S , los cuales son analizados mediante titulometría y cromatografía iónica respectivamente. La fase gaseosa contiene los siguientes gases traza: H_2 , CO , CH_4 , N_2 , Ar y He ; los cuales son analizados por cromatografía de gases (Tabla 3). El muestreo de gases con botellas Giggenbach debe ser realizado con precaución para evitar la contaminación por aire. En la Figura 10 se muestra el método de muestreo de una fumarola usando botellas Giggenbach.

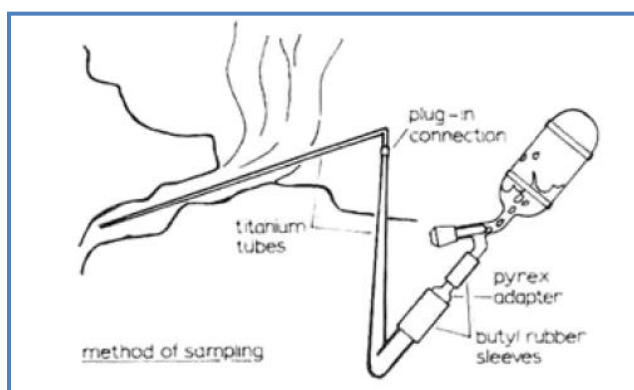


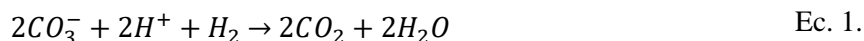
Figura 10. Recolección de muestra de gas en sistemas geotérmicos (Tomado de Giggenbach, 1975).

2.2 Medición de flujo de gases en sistemas geotérmicos

Los gases principales encontrados en los sistemas geotérmicos incluyen: CO₂, H₂S, NH₃, N₂, H₂ y CH₄ (Nicholson, 1993). La composición y proporción de cada gas depende de la contribución de su origen e interacción en el sistema geotérmico hacia la superficie. Las principales composiciones de gases en los sistemas geotérmicos provienen principalmente de fuentes magmáticas, siendo los procesos hidrotermales y biogénicos fuentes secundarias de los mismos (Christenson y Tassi, 2015).

2.2.1 Gases magmáticos

Los gases de origen magmático se constituyen principalmente por los elementos H, O, C, S y Cl (>95%). El CO₂ es el gas predominante (Anderson y Perkins, 1975; Wallace, 2005), su origen está relacionado con la fase fundida del magma como CO₃⁻ el cual al liberarse genera un proceso de oxidación (Ec. 1; Fine y Stolper, 1986):



Los procesos de desgasificación del CO₂ pueden comenzar a una profundidad de 80 km, cerca de la zona de generación de magmas con una concentración de 10,000 mg/kg (Giggenbach, 1989; Christenson y Tassi, 2015).

En el caso del elemento S los rangos de estados de valencia generan una gran variedad de compuestos, los cuales se encuentran en coexistencia dentro del magma como: H₂S, S₂, SO₂ y SO₄²⁻. La solubilidad del azufre depende de la concentración de FeO (Wallace y Carmichael, 1992).

2.2.2 Gases Hidrotermales

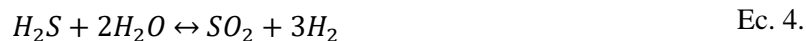
Los gases hidrotermales consisten de una mezcla de gases magmáticos y meteóricos (como N₂, O₂, y Ar) y comúnmente observados en los sistemas geotérmico, los cuales pueden participar en reacciones de interacción con las rocas huéspedes del reservorio (Christenson y Tassi, 2015). Estas interacciones se ven reflejadas en un estado óxido-reducción en el cual las rocas huéspedes sirven como agentes intermediarios.

El CO₂ en ambientes geotérmicos también es el gas predominante y puede tener origen magmático o por la interacción con agua:



La cinética de la Ec.2 es rápida (Giggenbach, 1987) mientras que la reacción de la Ec.3 es más lenta y generalmente se encuentra relacionada con el óxido ferroso y las altas temperaturas del sistema geotérmico (Taran y Giggenbach, 2003).

En el caso del azufre, los gases de ácido sulfhídrico (H₂S) y de dióxido de azufre (SO₂) dejan los magmas en un estado de equilibrio (Ec. 4; Giggenbach, 1987). Los minerales con contenido de FeO, como la Hematita, amortiguan al SO₂ para la formación de H₂S (Giggenbach, 1980):



2.2.3 Gases meteóricos y biogénicos

Los gases meteóricos (N₂, O₂ y Ar) son introducidos al sistema hidrotermal desde la atmósfera debido a la saturación de aire en el agua de lluvia. Los gases biogénicos preceden a la interacción entre los principales gases de los sistemas geotérmicos y los procesos bioquímicos que llevan una relación entre consumo y emisión. En el caso del CO₂, es consumido por algunas microalgas, cianobacterias y plantas en la etapa fotosintética para la producción de fosfatos de azúcar (Christenson y Tassi, 2015). El CO₂ emitido a los suelos también es proporcionado por el metabolismo de las raíces de las plantas y la mineralización de la materia orgánica del suelo (Martínez *et al.*, 2008). Por otro lado, existen microorganismos metanotrofos que oxidan al CH₄ produciendo CO₂. En la producción de CH₄, se realiza a través de procesos metanogénicos en el cual se reducen los carbonatos y a través de fermentación de acetatos (Hanson y Hanson, 1996).

En general los sistemas geotérmicos tienen una fuente de calor de origen magmático (Gupta y Roy, 2007). Estas intrusiones magmáticas liberan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) por sí mismas y mediante reacciones entre carbonatos que permiten la liberación de CO₂. Distintos autores han resaltado la correlación que existe entre áreas con un alto flujo de CO₂ y zonas donde existen reservorios geotérmicos (Marini y Chiodini, 1994; Chiodini *et al.*, 1995; Welles *et al.*, 2001; Lewicki y Oldenburg, 2005; Harvey y Harvey, 2015; Fridriksson *et al.*, 2016; Christenson y Tassi, 2015).

Se ha caracterizado que los flujos elevados de CO₂ son un buen indicador de permeabilidad para la localización de reservorios de distintas temperaturas. Esto se debe a que la migración de los gases que provienen del reservorio puede seguir rutas verticales, mientras que las emanaciones líquidas muestran patrones de flujo lateral (Nicholson, 1993; Bogie *et al.*, 1987; Chiodini *et al.*, 1998). El transporte de los gases del reservorio a la superficie puede ser explicado a través de dos

mecanismos (Chiodini *et al.*, 1998): mediante flujos difusivos y flujos advectivos. En las mediciones de flujo de CO₂, mediante la utilización de las cámaras de acumulación, se mide la suma de los flujos de gas a través de estos mecanismos. Los flujos bajos de dióxido de carbono se encuentran gobernados por procesos difusivos, mientras que los altos flujos de gas son gobernados por procesos advectivos (Chiodini *et al.*, 1998; Peiffer *et al.*, 2014). El transporte por difusión se describe a través de la primera ley de Fick, en la cual existe un flujo proporcional a un gradiente de concentración como se observa en la siguiente ecuación:

$$\varphi_d = -vD \left(\frac{dC}{d\lambda} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

donde φ es el flujo, v y D representan la porosidad del suelo, $dC/d\lambda$ el gradiente de concentración y el signo menos representa que el gas fluye de una zona de alta concentración a una zona de baja concentración.

La advección se describe a través de procesos de advectivos los cuales tienen su principal origen por gradientes de presión, la ecuación que describe dicho proceso es:

$$\varphi = \left(\frac{k}{\mu} \right) \left(\frac{dP}{d\lambda} \right) \quad (\text{Ec.6})$$

donde k es la permeabilidad específica, μ la viscosidad del fluido y $dP/d\lambda$ el gradiente de presión. Dicha ecuación fue obtenida de forma experimental mediante flujos estacionarios en medios porosos. La técnica usada para determinar los flujos de gases en superficie se conoce como el método de la cámara de acumulación (MCA).

2.2.4 Método de la cámara de acumulación (MCA)

La Figura 11 muestra la configuración de una cámara de acumulación portable de la marca WestSystemsTM. Este equipo consiste en una cámara circular invertida, conexiones neumáticas, un convertidor análogo-digital, una PDA y una bomba que transporta el gas de la cámara a tres detectores: (1) un espectrofotómetro de infrarrojos de doble vía LI-820 para medir la *ppm/s* de CO₂, (2) un espectrofotómetro WS-HC-IR para medir las *ppm/s* de CH₄ y (3) una celda electroquímica WS-H₂S-BH para las mediciones de las *ppm/s* de H₂S.

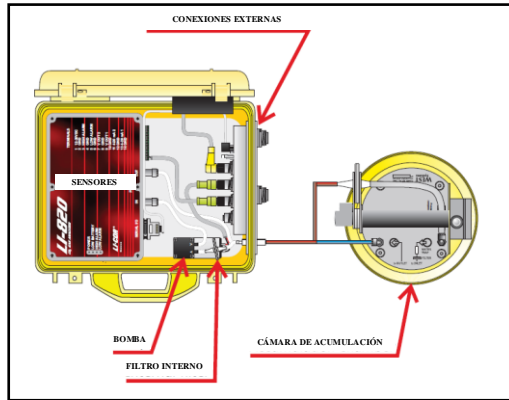


Figura 11. Composición de una cámara de acumulación WestSystems Portable LI-8210.

El principio de funcionamiento del MCA se muestra en la Figura 12. El flujo de gas en la cámara a un tiempo t_n es transportado a los detectores donde es cuantificado, posteriormente el flujo de gas regresa a la cámara de acumulación lo que promueve que el flujo a' se sume al flujo A inicial aumentando la concentración de gas en la cámara de acumulación. La ecuación de balance de masa que describe este principio es:

$$V_c C_{CO_2, t+dt} = V_c C_{CO_2, t} + \varphi_{in} A_c C_{soil CO_2} - \varphi_{out} A_c C_{CO_2, t} dt \quad (Ec.7)$$

Esta ecuación funciona con la suposición de que el gas se encuentra homogéneamente mezclado y que la salida del flujo de gas tiene la concentración del volumen existente de la cámara de acumulación a un tiempo t . Este tipo de mediciones pueden ser afectadas por la lluvia, los cambios de humedad en suelos y por variaciones en la presión atmosférica, por lo que se recomienda que los procesos de medición se realicen en temporada de secas.

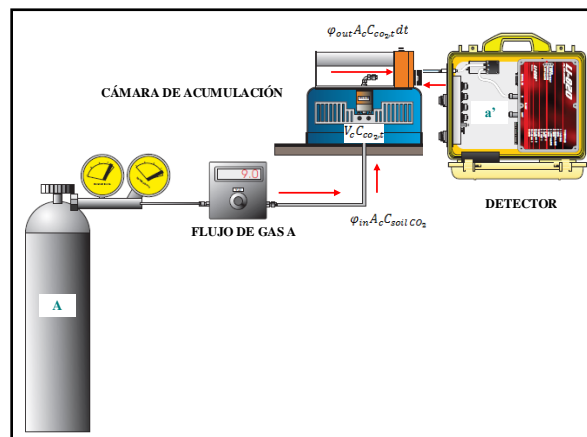


Figura 12. Principio de operación de la CA WestSystems Portable LI-8210.

2.2.4.1 Sensores

El sensor infrarrojo de doble vía LI-820 tiene un intervalo de medición de 0 a 20,000 *ppm* para CO₂, con una precisión entre 5-10 % dependiendo del valor del flujo. El sensor infrarrojo WS-HC-IR tiene un intervalo de medición de 60 a 50,000 *ppm* para CH₄ con un rango de precisión entre 10 a 25 % dependiendo del valor del flujo. Este sensor tiene una deriva debido a la sensibilidad del sensor con la presión y temperatura estimada en 0.086 *ppm/s* a una presión de 1,013 bar y 26 °C durante la medición. Para disminuir esta deriva es necesario fijar periódicamente el cero en la PDA a través del software Flux Manager™. El sensor de metano es sensible a otros hidrocarburos, no es un sensor selectivo, por lo tanto, no es posible asumir que la medición del equipo sea enteramente CH₄ (Jácome-Paz y Delgado-Granados, 2017).

Los sensores infrarrojos se basan en la absorción de la radiación infrarroja de las moléculas debido a las frecuencias de vibración de sus enlaces en función de las longitudes de onda del espectro infrarrojo. Los espectrómetros infrarrojos para el CO₂ son de doble canal donde se pasa un rango de radiación el cual se absorbe debido al CO₂ y en otro canal no se absorbe. El detector estima la diferencia de lo absorbido con lo no absorbido y obtiene la cantidad de CO₂ en la muestra de gas. La celda de infrarrojo WestSystem™ trabaja a una temperatura de 50± 2 °C considerando el proceso como isotérmico.

El gas H₂S se cuantifica mediante un sensor electroquímico el cual tiene un rango de medición entre 0.2 y 200 ppm, con una precisión entre 5 y 10% dependiendo de la cámara de acumulación usada. El sensor puede mostrar sensibilidad con otros elementos como son el SO₂, NO, NO₂, Cl₂, H₂, CH₄, CO, NH₃ generando errores de 1.60 ppm en la concentración de H₂S.

El sensor electroquímico realiza la cuantificación de H₂S mediante una reacción de equilibrio (Handbook, 2012):



En la práctica podría haber una subestimación del flujo de H₂S ya que una mínima parte se transforma en H₂SO₄. Para verificar el buen funcionamiento de dicha cámara se debe realizar una medición periódica de control regulando el flujo de entrada. Es importante realizar una calibración periódica del sensor electroquímico ya que puede dejar de funcionar a pesar de que tenga un tiempo de vida de 5 años.

2.2.4.2 Cámaras de Acumulación

Existen tres tamaños diferentes de cámaras de acumulación (Figura 13, Handbook, 2012). La cámara tipo A se recomienda para explorar zonas con flujos bajos en superficie ya que es la cámara con el menor volumen (área= 0.0308 m², volumen= 0.00277 m³). La cámara tipo B se recomienda para explorar zonas con flujos altos debido a su mayor volumen en comparación con la cámara tipo A (área= 0.0317 m², volumen= 0.006186 m³). Lo anterior es conveniente para evitar la saturación rápida de la cámara tipo A con flujos altos generando posibles problemas con el sensor electroquímico del equipo. La cámara tipo C es la más grande de las tres (área= 0.0712 m², volumen= 0.006878 m³) y se recomienda para medir flujos sobre cuerpos de agua como lagos (Jácome-Paz *et al.*, 2016) donde es necesario que la cámara sea estable usando un flotador.

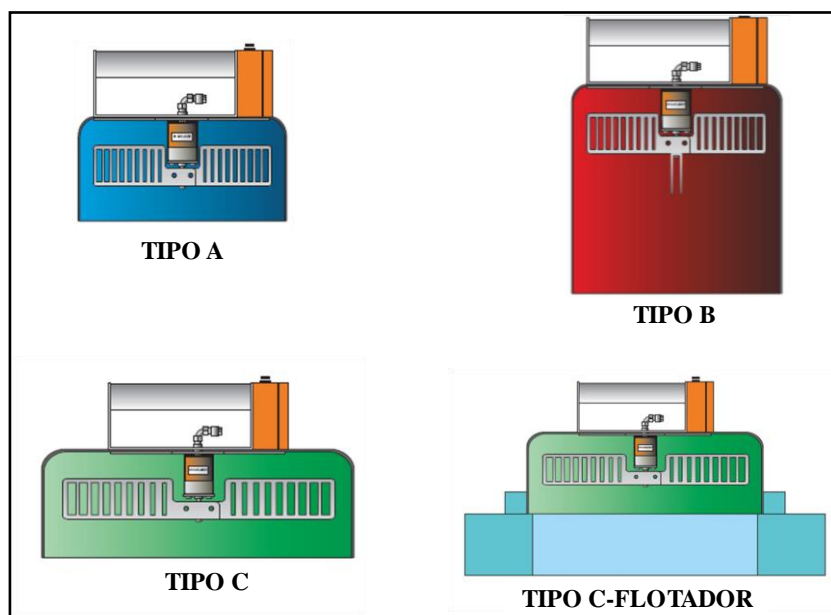


Figura 13. Tipos de cámaras de acumulación WesSystem™ para la medición de flujos de gases en suelo y sobre cuerpos de agua. El área y volumen de la cámara C-flotador es de 0.067 m² y 0.01123 m³ respectivamente.

Todas las cámaras de acumulación están configuradas con una válvula que permite la salida del gas proveniente de la emanación para conservar la presión atmosférica del lugar, así se perturba al mínimo el flujo natural del gas y no se acumula demasiada presión en la cámara (Figura 14). También tienen un ventilador que funciona con una batería AA que garantiza la homogeneidad del sistema, un septum que permiten recolectar muestra del gas mientras se toma la medición, sin embargo este tipo de muestreo afecta el gradiente de la concentración entre la atmósfera y la emanación y es recomendable revisar y considerar la medida cuando se toma la muestra.

La tubería conectada a las cámaras son de teflón o silicón, en tiempos largos de medición se puede tener pérdida por difusión, sin embargo debido a los tiempos cortos usados durante las mediciones la pérdida es nula. También se debe preparar una trampa de humedad usando drierita o silica gel para disminuir la humedad en el flujo del gas permitiendo el óptimo desempeño de los sensores infrarrojos.

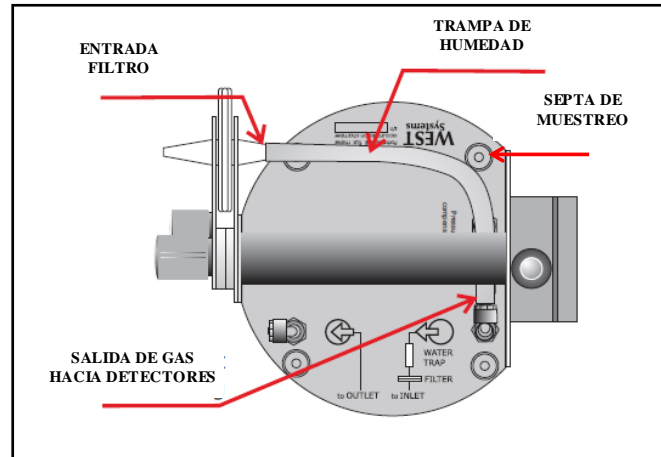


Figura 14. Configuración de la cámara de acumulación WestSystem™.

2.2.4.3 Medición del flujo con el equipo WestSystem™

El método de la cámara de acumulación (MCA) usando los equipos WestSystem™ requiere del manejo e interpretación del software FluxManager™ para medir los flujos de CO₂, H₂S y CH₄ usando un PDA. El software realiza una gráfica mostrando la variación de la concentración en ppm de los gases contra el tiempo de medición (Figura 15). La curva empieza con la concentración del aire (C_{aire}) la cual es ~ 350 ppm. C_{suelo} representa la concentración del gas proveniente de la emanación. Es necesario un periodo de tiempo para la obtención de la mejor curva de regresión lineal. Las dos líneas de control delimitan el intervalo de los datos para obtener la mejor curva de flujo de gases mediante el estadístico $ErrQ$, el cual representa el factor de calidad para la regresión lineal y se calcula de la siguiente manera:

$$ErrQ = \frac{\left(\sum x \cdot y - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}\right)^2}{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right] \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right]} \quad (Ec.9)$$

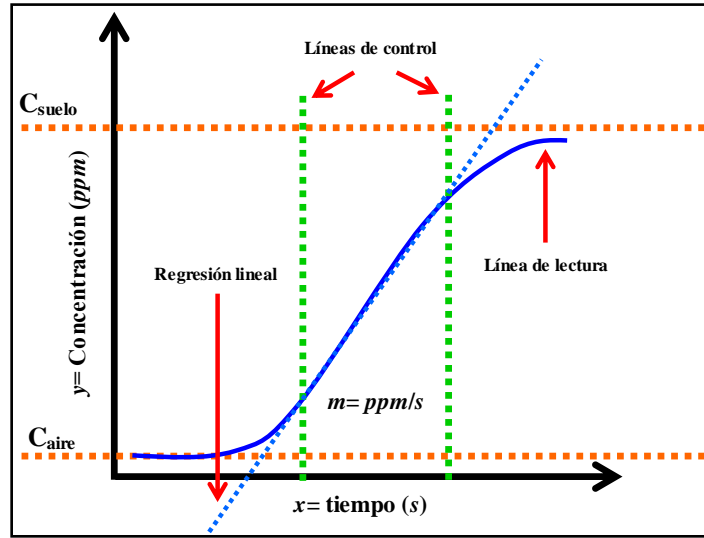


Figura 15. Representación gráfica de la medición de flujo de gases obtenida con el software FluxManager™.

Los valores de $ErrQ$ pueden variar en el rango de 0 a 1. Los valores de $ErrQ$ cercanos al cero ($ErrQ < 0.5$) significa que la regresión lineal no es buena, por ello se necesita que los valores de $ErrQ$ sean cercanos a 1 ($ErrQ > 0.95$) para obtener las mejores curvas de regresión lineal y el flujo calculado sea representativo de los datos obtenidos en campo. Por otro lado, la pendiente de la recta se calcula de la siguiente forma:

$$m = \frac{\sum x \cdot y - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (\text{Ec.10})$$

Para obtener los resultados en $\text{moles } m^{-2} \text{ día}^{-1}$ es necesario conocer el factor de la cámara de acumulación utilizada para realizar las correcciones correspondientes debido a las variaciones de la temperatura del aire o de la presión barométrica medida en campo (Welles *et al.*, 2001). El factor de la cámara de acumulación se conoce como ACK y se calcula de la siguiente manera:

$$ACK = \frac{86400 \cdot P}{10^6 \cdot R \cdot T_k} \cdot \frac{V}{A} \quad (\text{Ec.11})$$

donde P representa la presión barométrica en $mbar$ o HPa , R es la constante de los gases ($0.08314510 \text{ bar } L \text{ } K^{-1} \text{ } mol^{-1}$), T_k es la temperatura del aire en $^{\circ}K$, V y A son el volumen neto (m^3) y el área (m^2) de la cámara de acumulación utilizada respectivamente. Las dimensiones del factor ACK son: $(\text{moles } m^{-2} \text{ día}^{-1}) / (\text{ppm } s^{-1})$

2.2.4.4 Métodos estadísticos para el cálculo del flujo de gas total

Los métodos reportados en literatura para procesar los datos obtenidos por cámara de acumulación en sistemas volcánicos y geotérmicos pueden ser clasificados en tres grupos (Jácome-Paz y Delgado-Granados, 2017): (1) cálculo directo del flujo total del área, (2) aproximación gráfica estadística *GSA* y (3) la simulación gaussiana *SGS*. El primer método es muy robusto y consiste en multiplicar el valor medio de los datos obtenidos en campo por el área total de estudio. El método *GSA*, conocido en literatura como el método de Sinclair, permite obtener un cálculo del flujo por medio de la separación de poblaciones de flujo basados en el análisis de una gráfica de probabilidad acumulada bajo la suposición de que ambas poblaciones tienen una distribución normal (Sinclair, 1974). El método *SGS* estima el cálculo de flujo de gas así como su distribución espacial aplicando simulaciones estocásticas de variables estadísticas del conjunto de datos (Cardellini *et al.*, 2003). En el presente trabajo de tesis solo se aplicará el método *GSA*.

Método de Sinclair (GSA)

El método *GSA* es un método gráfico que permite visualizar la separación de poblaciones de un conjunto de datos geoquímicos usando gráficas de probabilidad acumulada. Las ventajas que tiene el método es que puede ser aplicado para cualquier conjunto de datos donde puede existir más de dos poblaciones, se puede representar diferentes conjuntos de datos en un solo gráfico con mayor claridad que los histogramas múltiples y las gráficas pueden ser comparadas visualmente para una rápida estimación de parámetros estadísticos. Algunas de las desventajas del método *GSA* es la selección del punto de inflexión que separa las poblaciones porque es arbitrario, se recomienda tener un mínimo de 100 datos para la representación en una gráfica probabilística y la dispersión de datos en un gráfico de probabilidad puede ser muy grande para permitir un análisis confiable de los datos. El método *GSA* permite la definición de un intervalo de confianza para la estimación del flujo de gas pero no toma en cuenta la correlación espacial entre los datos.

Los flujos de gases provenientes de emanaciones del suelo pueden tener múltiples fuentes de origen. Estas fuentes de gases resultan en distribuciones bimodales de flujos de gases los cuales al ser graficados en una gráfica de probabilidad se observan puntos de inflexión. Dichos puntos describen la distribución teórica de dos poblaciones ya que una simple línea recta representaría una sola población normal. Acorde a Chiodini *et al.* (2008) el método *GSA* consiste en la partición de distribuciones complejas en diferentes poblaciones log-normales estimando la media y la desviación estándar de cada población siguiendo el procedimiento de Sinclair (1974). El procedimiento del método se describe a detalle en la sección 4.1.8.2 del Capítulo 4.

Capítulo 3

Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio del presente trabajo de investigación se ubica dentro de la caldera de Acoculco, en el estado de Puebla, principalmente en las áreas conocidas como Los Azufres y Alcaparrosa. Ambas áreas presentan el mayor número de anomalías reportadas (Polack et al., 1982; Peiffer et al., 2014; Tello Hinojosa, 1991; López-Hernández, 2009). En este capítulo se presentan las características geológicas, geofísicas y geoquímicas del área de estudio ubicadas en la región del sistema volcánico Tulancingo-Acoculco.

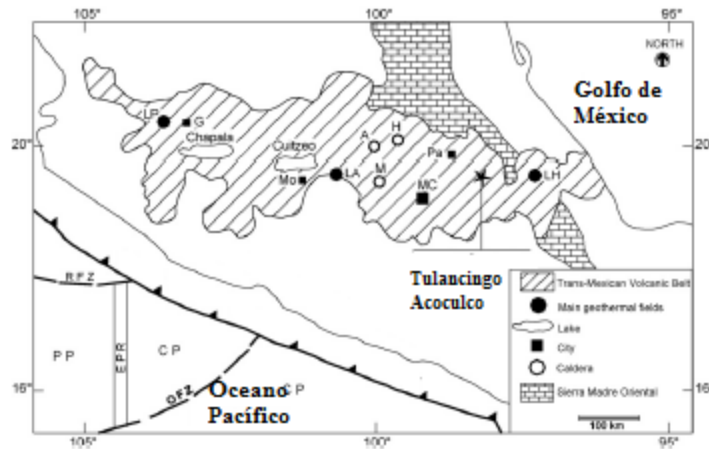


Figura 16. Localización de la zona de Acoculco (modificado de López-Hernández *et al.*, 2009).

3.1 Marco geológico regional

El sistema geotérmico de Acoculco se localiza en la franja oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) a 85 km al NW de la ciudad de Puebla y 180 km de la Ciudad de México (Pulido *et al.*, 2011; Viggiano-Guerra *et al.*, 2009). La zona ha sido estudiada desde 1981 con prospectiva geotérmica, principalmente por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con el objetivo de evaluar la posibilidad de explotar los recursos generados por el magmatismo que originó el complejo volcánico de Tulancingo-Acoculco (López-Hernández, 2009). En 1994 la CFE retomó el estudio de la zona con la perforación del pozo

EAC-1 a una profundidad de 2,000 m encontrando temperaturas de fondo de 300°C (Pulido *et al.*, 2011).

Varios investigadores han catalogado la zona como un sistema de roca seca caliente (HDR) por la ausencia de agua en el reservorio debido a una baja permeabilidad (Peiffer *et al.*, 2014). También es considerado como un sistema *kaipohan* cuyas anomalías geotérmicas presentes se asemejan a los sistemas geotérmicos filipinos por ejemplo la presencia de mofetas, alteración argílica y pozas de agua fría (Bogie *et al.*, 1987).

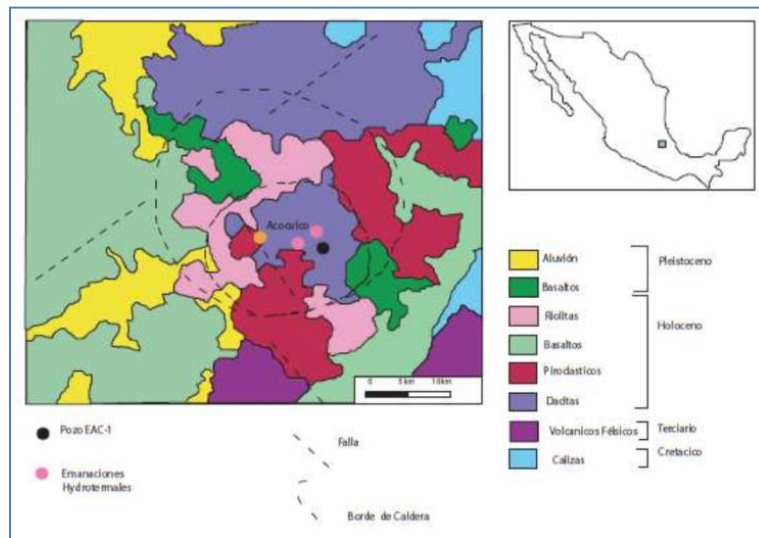


Figura 17. Localización y mapa geológico simplificado de la zona de estudio (modificado de López-Hernández *et al.*, 2009 y Canet *et al.*, 2010).

3.2 Marco geológico local

En el área de Los Azufres, la CFE perforó dos pozos exploratorios, el pozo EAC-1 en 1995 con una profundidad de 2,000 m (Tabla 4) y el pozo EAC-2 en 2008 con una profundidad de 1,900 m (Tabla 5), los cuales alcanzan temperaturas de 300°C (CFE, 2014).

Tabla 4. Estratigrafía del pozo EAC-1, tomada de Viggiano *et al.*, (2009)

Profundidad [m]	Litología	Mineralogía	Origen	Alteración
0-130	Toba vitrea dacita alterada	Vidrio, feldespato potásico, líticos de dacita	Freatomagmático Explosivo freático	Arcillas, calcita, cuarzo, pirita
140-200	Dacita micropórfídica atriz microlítica	Fenocristales de oligoclasa, en una matriz microlítica, feldespato, plagioclasa y cuarzo	Volcanismo efusivo	Arcilla, calcita, pirita, cuarzo y hematita
210-230	Ignimbrita dacítica	Vidrio, fragmentos de cristales y roca	Base de formación brechosa explosivo	Oxidación rojiza
240-390	Riodacita porfídica y microporfídica	Cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. Holocristalina	Volcánico a subvolcanico explosivo	Cuarzo, calcita, arcillas, pirita, hematita
400-790	Pórfido riodacítico. De granito fin. A 740 m metamorfismo presente	Oligoclasa-andesina, ortoclasa y cuarzo	Subvolcánico. Domo pórfido Riodacítico	Disminuye alteración. A partir de 580 m, óxidos
790-1660	Skarn calcáreo. Mezcla calcita, micrita, microespatita, espatita y fragmentos de pórfidos, riodacíticos y cuarzo. Aplitas	Facies Calcárea: 790-900 m; calcita, cuarzo, microespatita, micrita. Granate: 910-1010m Diopsida-epidota: 1010-1200m Marmol: 1210-1290m Diopsida-epidota	Metamorfismo Contacto (termal)	Sobreposición de eventos metasomáticos. Wollastonita, reacción del $SiO_2 + CaCO_3 \rightleftharpoons CaSiO_3 + CO_2$

Tabla 5. Estratigrafía del pozo EAC-2 tomada de Viggiano *et al.*, (2009)

Profundidad [m]	Petrología simplificada	Observaciones
2-340	Ignimbritas, dacitas y andesitas de rasgos primarios relictos por exceso de alteración	Vulcanismo terciario-cuaternalario e hidrotermalismo reciente
350-450	Calizas lutítico-limolíticas metamorfizadas alteradas	Borde del cuerpo metamórfico de contacto cretácico sin intrusiones diasquísticas salvo en la parte superior
450-1580	Hornfels de calcita-wollastonita-granate y diópsida intrusionado por cuerpos de cuarzo monzoníticos y micrograníticos	Metamorfismo de calizas silíceas del cretácico producto del intrusivo subyacente y por abundantes cuerpos diasquísticos cuarzo-monzoníticos y por microgranitos.
1580-1900	Granito de hornblenda intrusionando a las calizas. Contenido de hornfels derivados de calizas asimiladas	Granito post-cretácico o cretácico.

3.3 Estudios previos

Existen trabajos reportados sobre estudios de exploración usando gravimetría, resistividad de corriente directa y magnetotelúricos en la zona de Acoculco. En la presente sección se resumen los resultados principales.

Los estudios de gravimetría fueron realizados por Petróleos Mexicanos (PEMEX) en 1980 y 1981. Posteriormente estos estudios fueron proporcionados a la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos por convenio con esta institución para realizar su interpretación con fines geotérmicos (López-Hernández, 2009). El resultado mostró una tendencia dominante NW-SE que corresponde a la orientación NW del sistema de pliegues de la Sierra Madre Oriental. López-Hernández *et al.* (2009) sugieren que la actividad magmática del área se concentra en la intersección de dos fallas (NW-SE y NE-SW) y existen deformaciones y anomalías con respecto al trazado del contorno basado en la información geológica. Cerca del pozo EAC-1, una anomalía gravimétrica asociada a la presencia de cuerpos ígneos densos y someros fue observada.

El Servicio Geológico Mexicano (SGM) reportó en 1999 los estudios aeromagnéticos de la zona. Los resultados presentados por López-Hernández *et al.* (2009) indican una coincidencia entre los valores de PEMEX y los obtenidos por el SGM siendo los últimos datos que permiten una mayor cantidad de detalles y un mejor reflejo de los cuerpos someros. Algunas anomalías magnéticas fueron observadas con una orientación NE-SW y una zona que rodea el área de la caldera de Tulancingo-Acoculco. Las anomalías positivas de la zona NE-SW pueden ser explicadas por la existencia de cuerpos ígneos someros compatibles con un vulcanismo somero asociado a etapas tardías. Los valores negativos de la caldera sugieren cuerpos con un magnetismo remanente cuya dirección es distinta por lo que se trata de cuerpos más antiguos (López-Hernández, 2009).

Los estudios de resistividad eléctrica se realizaron mediante un muestreo tipo Schlumberger (Sondeos Verticales) que consistió en 61 muestreos en un área de 5,000 km², cada sondeo generó información a 400m de profundidad. Los valores más bajos de resistividad se presentaron cerca de la zona de burbujeo en Los Azufres lo que se relaciona con una alteración argílica la cual se encuentra en los primeros 500 m de profundidad del pozo EAC-1 (López-Hernández, 2009; Gama *et al.*, 1995). El estudio mostró que el área geotérmica donde se encuentra la zona de mayor flujo de gas conocido como Los Azufres posee una resistividad relativa elevada (100 Ω) cuyo valor puede ser explicado como consecuencia de una deposición de minerales hidrotermales o por un levantamiento tectónico del basamento granítico (López-Hernández, 2009).

Las aguas superficiales que se localizan en el complejo calderico Tulancingo-Acocolco pueden ser agrupadas en tres categorías principales (López-Hernández *et al.*, 2009): (1) Ácido sulfatada, (2) Cálculo-Bicarbonatada y (3) Sódico Bicarbonatada. El primer tipo de agua es observada en las zonas de Los Azufres, Alcaparrosa y Cuadro de Fierro, los dos tipos restantes son observados en Chignahuapan, Quetzalapa y Agua Salada.

La composición de las aguas observadas en Los Azufres, Alcaparrosa y Cuadro de Fierro pueden ser explicados a través de la oxidación del ácido sulfhídrico en los gases geotérmicos del reservorio en mantos acuíferos o en charcos de agua (Peiffer *et al.*, 2014). En particular, las aguas encontradas en Los Azufres y Alcaparrosa son charcos que se forman debido a la impermeabilidad provocada por arcillas en la superficie. Cuando los gases transfieren el calor a las rocas del sistema antes de alcanzar la superficie, al mezclarse con las aguas superficiales, no transfiere calor a ellas lo que da origen a que las temperaturas medidas sean ambientales.

Los manantiales hidrotermales que tienen una temperatura mayor a la ambiental se encuentran en el contorno del complejo calderico y corresponden a aguas cálcico-bicarbonatadas de las zonas de Chignahuapan y Quetzalapa. El origen de estas aguas puede ser debido a la mezcla entre aguas profundas y superficiales (Tello-Hinojosa, 1991). Estudios de isotopos no muestran diferencias entre los valores para agua meteórica y de aguas hidrotermales (Peiffer *et al.*, 2014).

La composición bicarbonatada-sódica de los manantiales de los Azufres se debe a la disolución del CO₂ de origen geotérmico. Tello-Hinojosa (1991) resalta valores altos de concentración de 1,321 mg/l de bicarbonatos y sugiere que, debido a las altas concentraciones de boro y cloruros, dichos manantiales deben de interactuar con fluidos de origen magmático.

Las aguas hidrotermales que superan la temperatura ambiente de Quetzalapa (39 °C) y Chignahuapan (49 °C) son los más probables en tener una aportación de un reservorio, pero su interacción con aguas superficiales oculta las probables firmas isotópicas que lo demuestren (Tello-Hinojosa, 1994; López-Hernández, 2009; Peiffer *et al.*, 2014). El estudio realizado por López-Hernández (2009) muestra que las aguas superficiales se encuentran lejos del equilibrio. Lo anterior indica que el uso de geotermómetros de soluto no es el adecuado.

Las zonas de Los Azufres y Alcaparrosa presentan la mayor emanación de gases del complejo calderico Tulancingo-Acocolco (Peiffer *et al.*, 2014). Las áreas comprendidas en estas regiones están caracterizadas por la presencia de un olor ácido sulfhídrico, animales muertos y charcas de agua fría con un burbujeo constante. Los estudios realizados por Peiffer *et al.* (2014) y Tello-

Hinojosa (1993) indican que el CO₂, H₂S, CH₄ y N₂ son los principales gases de ambas zonas (Tabla 5). Conforme a los autores, estos gases tienen origen de la corteza lo cual concuerda con los estudios de He-Ar reportados por López-Hernández *et al.* (2009). Además, los datos reportados de ³He/⁴He indican una contribución del manto (Polak *et al.*, 1982; Peiffer *et al.*, 2014).

Los valores de CO₂ corresponden a datos típicos de gases en sistemas geotérmicos, aunque su origen aún no ha sido detallado. El origen del CH₄ en las zonas pueden ser interpretados por un origen biogénico debido al sistema de charcas pantanosas observados (p. ej., Los Azufres), sin embargo, este mecanismo de aportación no se revela en los datos de análisis isotópicos de carbono (Peiffer *et al.*, 2014).

Tabla 6. Concentración en mg/kg de gases medidos en Acoculco (a) Peiffer *et al.* (2014), (b) Tello-Hinojosa, (1994).

Localidad	Año	CO ₂	H ₂ S	NH ₃	He	H ₂	Ar	O ₂	N ₂	CH ₄	Referencia
Los Azufres	2006	97.02	1.85	na	0.0006	0.01	0.004	na	0.43	0.68	a
Los Azufres	1986	96.63	2.95	0.0305	nd	0.00009	0.06	nd	0.38	0.017	b
Jicolapa	2006	97.97	nd	na	0.0031	nd	0.053	na	2.11	0.36	a
Jicolapa	1986	98.47	0.91	0.0455	0.001	0.001	0.015	0.0344	0.58	0.013	b
Alcaparrosa	2013	93.36	2.94	na	0.0031	nd	0.018	0.18	1.5	2	a
Alcaparrosa	2006	93.36	2.94	na	0.0031	nd	0.003	na	0.61	1.28	a
Alcaparrosa	1986	94.24	2.23	0.0038	0.0135	0.00017	0.004	nd	0.98	2.53	b
Quetzalapa	1986	98.61	0.31	0.0481	0.0004	0.00003	0.01	0.0699	0.5	0.453	b
El Rincón	1986	93.06	0.24	0.0665	0.0175	0.00004	0.185	0.2779	6.15	0.038	b

Las concentraciones del He, N₂ y Ar de la zona de la Alcaparrosa sugieren un origen cortical, las concentraciones relativamente altas del CH₄ pueden ser producidas por la descomposición de sedimentos calcáreos en la profundidad y análisis isotópicos de He³/He⁴ sugieren un cuerpo intrusivo joven como fuente de calor en el sistema de Acoculco (López-Hernández, 2009).

Capítulo 4

Metodología

Actualmente existen diferentes zonas hidrotermales identificadas con un potencial geotérmico promisorio en México (Hiriart *et al.*, 2011; Gutiérrez-Negrín, 2012). Entre estas zonas destaca la Caldera de Aocolco señalada como un posible sistema geotérmico de roca seca caliente o un sistema de tipo Kaipohan (López-Hernández, 2009; Flores-Armienta *et al.*, 2014; Peiffer *et al.*, 2014), sin embargo aún es necesario realizar estudios de exploración geotérmica para conocer la estructura del sistema y la trayectoria del flujo de fluidos. En el presente trabajo de tesis la aplicación del método de la cámara de acumulación se considera como una herramienta importante para evaluar las emanaciones de gases en superficie y describir el origen de los gases presentes en las zonas de Los Azufres y Alcaparrosa.

El método de cámara de acumulación (*MCA*) combinado con la determinación de la composición isotópica de carbono de las emanaciones de CO₂ en superficie es un método capaz de caracterizar cualitativa- y cuantitativamente las fuentes de origen de los flujos de CO₂ durante la exploración geoquímica de sistemas geotérmicos (Chiodini *et al.*, 2008; Peiffer *et al.*, 2014). En el presente capítulo se expone el desarrollo de la metodología desarrollada para la medición del flujo de gases en las zonas Los Azufres y Alcaparrosa ubicados en la Caldera de Aocolco en el estado de Puebla.

4.1 Campaña de medición de flujo de gases en superficie

Se realizaron dos campañas de muestreo en la Caldera de Aocolco durante la temporada de secas del año 2016, la primera se desarrolló del 23 al 24 de Febrero en la zona de Los Azufres y la segunda del 24 al 26 de Febrero en la zona de Alcaparrosa. El desarrollo de la metodología durante la medición y estimación del flujo de gases se muestra en la Figura 18. Dicha metodología incluyó el desarrollo de las siguientes actividades: (i) preparación y verificación del equipo en laboratorio, (ii) acondicionamiento del equipo en campo, (iii) conocimiento de la zona y planeación del mallado, (iv) medición del flujo de gases usando el *MCA*, (v) procesamiento de datos en laboratorio de simulación, (vi) depuración de datos y (vii) cálculo del flujo total a través del método *GSA*.

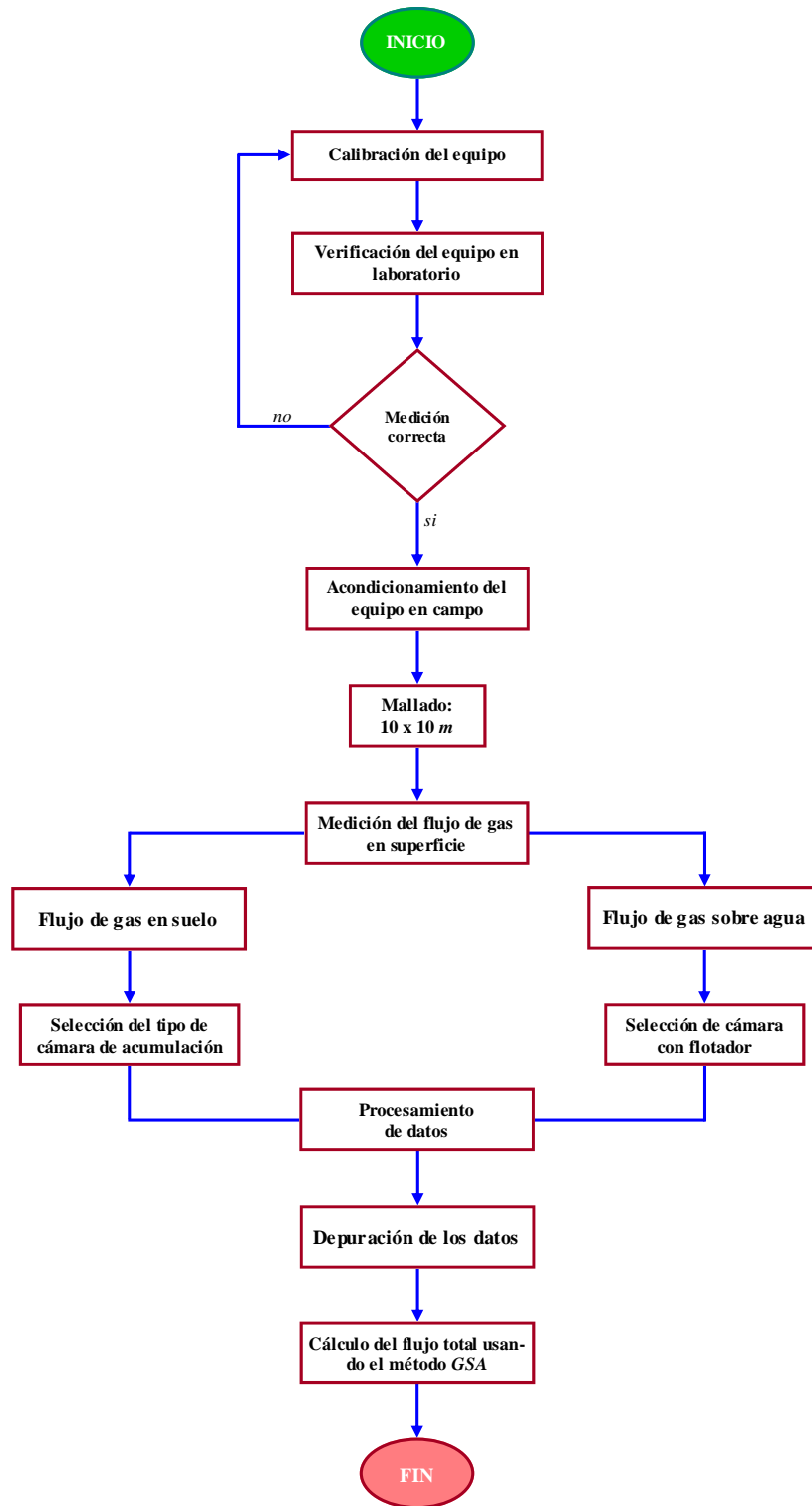


Figura 18. Metodología general para la medición y estimación del flujo de gases en superficie.

4.1.1 Calibración de equipo

El equipo usado para la medición de flujos de gases fue el flujómetro portable WestSystems™ (Figura 19). Este equipo consiste en una cámara de acumulación circular invertida, conexiones neumáticas de silicón, una bomba que transporta el gas de la cámara a tres detectores, dos espectrofotómetros infrarrojos de doble vía (LI-820 y WS-HC-IR), para medir las concentraciones de CO₂ y CH₄, una celda electroquímica (WS-H₂S-BH) para las mediciones de H₂S, un convertidor análogo-digital y una PDA. El principio de operación del equipo se describe en la sección 2.2.4 del Capítulo 2.



Figura 19. Flujómetro portable WestSystem™. Conexiones de la cámara de acumulación y sensores para medir el flujo de CO₂, H₂S y CH₄. (1) sensor Li-820, (2) celda electroquímica WS-H₂S-BH y (3) sensor WS-HC-IR.

Los equipos utilizados durante las campañas fueron debidamente calibrados con el fabricante en la sede operativa de la compañía *West Systems* ubicada en Italia. En el Anexo 1 se muestran los certificados de la calibración de los equipos. Una vez recibidos los equipos en el laboratorio se realizaron pruebas de verificación en el Edificio 3.1 del Instituto de Energías Renovables para evaluar los flujos medidos y revisar que no hubiera algún inconveniente con los equipos antes de la exploración en campo. Además, se prepararon los materiales necesarios para realizar las mediciones de flujo de gases, los cuales incluyen perclorato de magnesio o sílice, tubos de teflón o silicona, esponjas, baterías para el flujómetro, las cámaras de acumulación, cargador de baterías, PDA, jeringas y viales. El perclorato de magnesio o sílice [Mg(ClO₄)₂ ó sílice] fue necesario para elaborar las trampas de humedad y ser instalada sobre la cámara de acumulación.

4.1.2 Acondicionamiento del equipo en campo

El equipo debe ser conectado a una fuente de energía (batería de Ni-MH tipo WS14-4) la cual tiene un voltaje nominal de 14.4 V y una capacidad nominal de 4.0 A/h. Debido a las características de los sensores es necesario dejar encendido el equipo al menos 15 minutos antes de realizar la primera medición con la finalidad de que la celda electroquímica alcance la temperatura de 50 °C. Durante este proceso se enciende la PDA y se inicia la aplicación del programa *FluxManager*TM. Al iniciar el programa, el equipo adquiere la señal satelital para obtener los valores de longitud, latitud y elevación de cada punto medido.

Para la preparación de las cámaras de acumulación es necesario instalar una trampa de humedad entre la salida del gas y el filtro *PTFE* (Figura 20). La trampa de humedad es un tubo de teflón de 8 mm de diámetro con $Mg(ClO_4)_2$ ó sílice. A la salida del filtro *PTFE* se conecta la tubería neumática. El gas que sale de la cámara de acumulación debe ser conectado en la sección *IN* del flujómetro y la sección *OUT* debe ser conectado en la boquilla *OUTLET* de la cámara de acumulación (Figura 20).

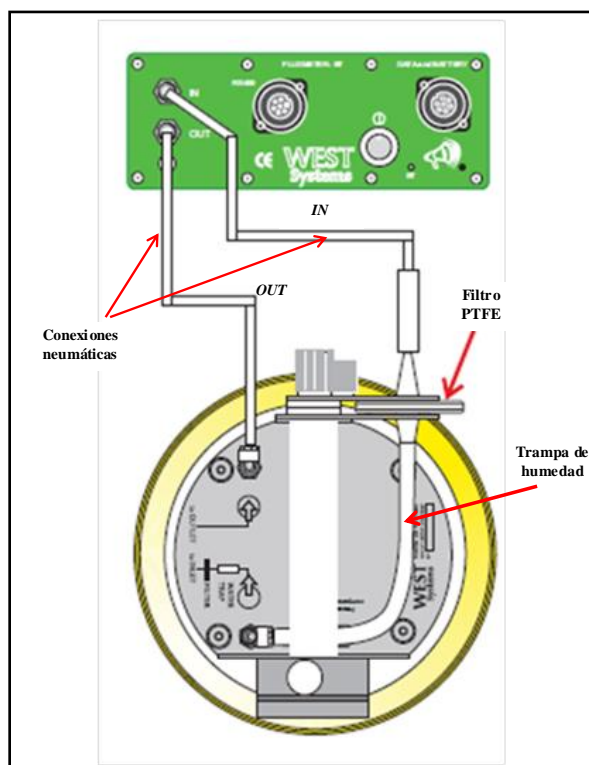


Figura 20. Conexiones neumáticas de la cámara de acumulación y la caja que contiene los sensores para medir el flujo de gases.

Las cámaras de acumulación tienen un agitador de dos aspas para homogenizar el flujo de gas que proviene directamente de las emanaciones. Los gases son transportados por medio de una bomba de vacío hacia el flujómetro a través de las conexiones neumáticas que pasan por dos filtros de membrana para evitar la entrada de vapor de agua y partículas finas que pueden dañar los sensores.

4.1.3 Conocimiento de la zona y mallado

Las zonas exploradas fueron Los Azufres y Alcaparrosa las cuales forman parte de la Caldera de Acoculco ubicada en el estado de Puebla. Ambas zonas son de interés geotérmico debido a la presencia de anomalías observadas en superficie así como alteración hidrotermal (López-Hernández, 2009; Peiffer *et al.*, 2014; Canet *et al.*, 2015).

La zona de Los Azufres está ubicada en las coordenadas 589594 longitud y 2203098 latitud (UTM-WGS 84), tiene un cuerpo de agua de origen meteórico de 100 m de diámetro en la parte central (Figura 21). Este cuerpo de agua es de origen meteórico y fue formado debido a los depósitos de minerales secundarios de baja permeabilidad encontrados en la zona (Canet *et al.* 2015).



Figura 21. Zona de estudio en Los Azufres

La zona de Alcaparrosa se localiza en las coordenadas 589951 longitud y 2204858 latitud (UTM-WGS 84), se caracteriza por ser una zona boscosa con olor fuerte a H_2S (Figura 22). La descripción de ambas zonas se expone en la sección 3.3 del Capítulo 3. La distancia entre la zona Los Azufres y Alcaparrosa y Los Azufres es aproximadamente de 2 km (Figura 23).



Figura 22. Zona de estudio en Alcaparrosa.

En literatura se recomienda realizar entre 3 y 4 mediciones para definir una anomalía, cada punto puede ser realizado con una distancia entre 25 m y 30 m (Fridriksson, 2009).



Figura 23. Localización de las zonas bajo estudio.

4.1.4 Medición del flujo de gases usando el método MCA

Todas las mediciones fueron realizadas bajo condiciones atmosféricas secas y estables. Las mediciones de flujo en suelo fueron realizadas con el equipo WestSystem™ descrito en el Capítulo 2 siguiendo la metodología acorde a Chiodini *et al.* (2008) mientras que las mediciones de flujo sobre agua fueron realizadas acorde a Bernard y Mazot (2004) y Jácome-Paz (2016; Figura 24). Bernard y Mazot (2004) indican que los mecanismos físicos de la desgasificación de CO₂ sobre lagos están normalmente dominados por procesos de convección y advección con el burbujeo de gases (manifestaciones visibles y usualmente con valores altos de flujo de CO₂) a través del cuerpo

de agua y con el proceso de difusión en la interface de ambos medios (manifestación no visible y usualmente con valores bajos de flujos de CO₂ respecto a los valores de burbujeo).



Figura 24. Mediciones realizadas en campo. A) Medición realizada sobre suelo en Alcaparrosa, B) Medición realizada sobre agua en Alcaparrosa.

Una ligera presión fue aplicada sobre la cámara de acumulación durante la medición del flujo de gases para evitar la contaminación atmosférica. El tiempo de medición se mantuvo menor a 1 *min* el cual fue suficiente para establecer la mejor curva de medición usando el programa *FluxManager* en la *PDA*. En los sitios con emanaciones burbujeantes en presencia de agua se utilizó el flotador adecuado para cada tipo de cámara de acumulación.

4.2 Procesamiento de los datos

El programa *FluxRevision* fue usado para revisar y mejorar los registros obtenidos en campo (Figura 25). Dicho procesamiento incluyó la obtención de la mejor correlación lineal a través del estadístico *ErrQ* (>0.9 ; Ec.9), la pendiente de la curva (Ec.10), el flujo de gas fue obtenido en función al tipo de cámara de acumulación usada en campo y al uso del flotador (Ec. 11). Las transformaciones y fundamentos teóricos para obtener el flujo con el software se expone en la sección 2.2.4.3 del Capítulo 2.

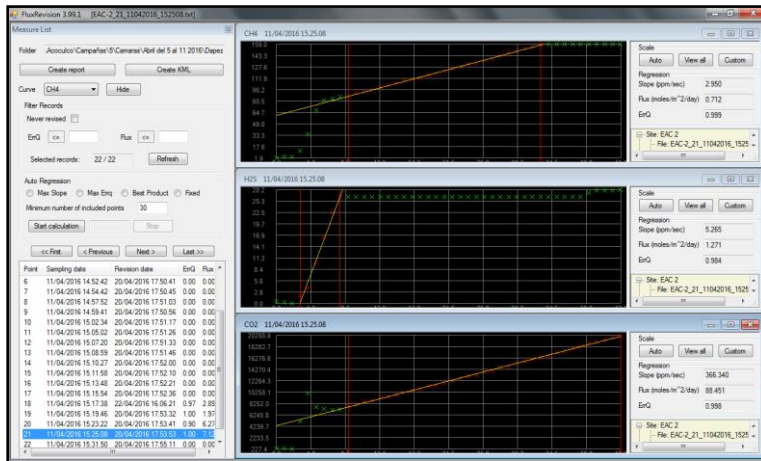


Figura 25. Ejemplo ilustrativo del análisis de datos usando el programa FluxRevision en una lectura de flujo de gases.

4.2.1 Depuración de los datos

La depuración de los datos se realizó una vez terminada la campaña en campo. La depuración incluyó los siguientes puntos:

- Falla en el registro de coordenadas en la *PDA*. Las mediciones obtenidas de las campañas fueron revisadas usando *Google Earth*, aquellas que quedaban fuera de la zona de exploración o en sitios no medidos fueron depuradas.
- Flujos de gases negativos. Las mediciones que mostraban pendientes negativas fueron depuradas. Una pendiente negativa de flujo de gas indica escape dentro de la cámara de acumulación.
- Contaminación atmosférica. Las mediciones que mostraron irregularidades en la curva de medición debido a la entrada de aire dentro de la cámara fueron depuradas.
- Límites de cuantificación. Las mediciones que sobrepasaban los límites de cuantificación del equipo fueron debidamente identificadas y señalados como anomalías importantes.

4.2.2 Fuentes de error en la medición de flujo de gases

El proceso de la estimación del flujo y concentración de gases, mediante el método de la cámara de acumulación, está sujeto a diferentes fuentes de error que pueden afectar las mediciones. Dichas fuentes pueden estar en las diferencias de presión entre la cámara y el exterior, la velocidad del viento dentro de la cámara, la concentración de CO_2 de la anomalía en comparación con la del ambiente y la acumulación de vapor de agua en la cámara (Welles *et al.*, 2001).

4.2.2.1 Efecto de la diferencia de presión entre el suelo y el medio ambiente

Esta fuente de error es causada por efectos del viento en la zona o por los instrumentos de medición (Camarda *et al.*, 2009). La presión dentro de la cámara de acumulación (CA) cambia constantemente debido al flujo de gas de la emanación, pero dicha presión debe de mantenerse igual a la presión atmosférica, sin embargo, si las mediciones se realizan en presencia de mucho viento, la presión disminuirá afuera de la CA y la válvula, encargada de regular la presión dentro de la CA, dejará salir una cantidad de flujo de gas afectando el gradiente de presión natural. Esta fuente de error se disminuye evitando lugares con mucho viento, con circulación de aire subterráneo o en su caso realizar las correcciones correspondientes.

Uno de los componentes más importantes en las cámaras de acumulación es la bomba que hace fluir el gas de la cámara hacia los detectores del equipo. En caso de que se genere un diferencial negativo en la presión dentro de la cámara se formaría una succión hacia la cámara, si el diferencial es positivo se suprimiría el flujo normal y habría una subestimación. Para reducir los diferenciales de presión se puede utilizar un tubo de equilibrio instalado en la cámara (Norman *et al.*, 1992) en su caso se ha reportado un diferencial de presión de 0.02 Pa con el uso del regulador de presión. En el caso del flujómetro *West SystemsTM* este valor se considera dentro del valor de tolerancia en los niveles de ruido dentro del sensor de presión.

4.2.2.2 Efectos de dilución por vapor de agua y precipitaciones

La porosidad disminuye en suelos húmedos debido a la precipitación del agua y normalmente existe cantidades importantes de vapor de agua en el aire debido al proceso de evaporación. Aplicar el método de la cámara de acumulación bajo estas condiciones, la concentración de CO₂ se diluye y el flujo medido resulta menor al flujo real. Acorde a Welles *et al.* (2001) la densidad molar del aire y la fracción molar del vapor de agua son importantes para estimar la concentración del CO₂ en un área de suelo determinada usando una CA de volumen conocido. El error causado por el vapor de agua es significativo cuando el aumento de la fracción molar del vapor de agua es alto en comparación con el flujo de CO₂ en un período de tiempo. Los mayores errores ocurren en suelos donde pueda existir el proceso de evaporación. El error en un flujo de 1 ppm/s de CO₂ es del 20% en caso de haber un incremento de 200 ppm/s de vapor de agua (Welles *et al.*, 2001). Para disminuir esta fuente de error se recomienda realizar las mediciones en temporadas de secas y utilizar una trampa de vapor eficiente.

4.2.2.3 Velocidad del viento dentro de la cámara

Debido a que el gas dentro de la cámara de acumulación debe estar mezclado, este proceso puede afectar el valor del flujo al incrementar la velocidad de mezcla (Hanson *et al.*, 1993). Las cámaras utilizadas en el trabajo de tesis tienen el ventilador perforado, el cual disminuye esta fuente de error y provee una mezcla eficiente del gas al distribuirlo alrededor de la cámara (Norman *et al.*, 1992).

4.3 Cálculo del flujo de gas total

Los datos obtenidos de las depuraciones fueron analizados con técnicas estadísticas reportadas en literatura para el cálculo del flujo de gas total en Los Azufres y Alcaparrosa. El análisis estadístico usado en este trabajo de tesis incluyó la evaluación de la media, mediana, valores máximos, valores mínimos, cuartiles, desviación estándar, histogramas de frecuencia acumulada, gráficas box plot y gráficas de probabilidad acumulada. Los métodos utilizados para el cálculo del flujo total de gases fueron el método directo y el método GSA.

4.3.1 Cálculo directo del flujo de gas total.

Esta primera aproximación no genera información espacial. La estimación del flujo total fue calculada con la siguiente ecuación:

$$F_{CO_2} = f_{CO_2} \cdot A \quad (\text{Ec.12})$$

donde f_{CO_2} es el valor medio en $g\ m^{-2}\ día^{-1}$, A es el área de estudio en m^2 y F_{CO_2} es el flujo total en $g\ día^{-1}$.

4.3.2 Cálculo del flujo de gas total usando el método gráfico estadístico

El método de aproximación gráfica estadística (GSA) fue aplicado en el presente trabajo de tesis acorde a Sinclair (1974), Chiodini *et al.* (1998), Cardellini *et al.* (2003) y Jácome-Paz (2016). El método GSA se resume en los siguientes pasos:

Presentar los datos de flujo en una gráfica de probabilidad acumulada. Los flujos de gas obtenidos fueron transformados aplicando el logaritmo natural (\ln) para ser presentados en una gráfica de probabilidad acumulada usando el software *Mathematica*. Si la familia de valores cumple con una distribución *log-normal* podrán ajustarse a una línea recta, sin embargo, si los valores no cumplen con dicha distribución, entonces la gráfica de probabilidad acumulada puede tener uno o más puntos de inflexión ajustándose a rectas con pendientes diferentes (Sinclair, 1974).

Localizar los puntos de inflexión de la gráfica de probabilidad acumulada. Los puntos de inflexión fueron debidamente identificados a través de un código de programación realizado en *Mathematica*.

Separar los datos en función a los puntos de inflexión identificados. El método de Sinclair (1974) fue aplicado para realizar la evaluación gráfica. Los datos fueron graficados usando una separación de 50 clases para realizar el histograma de trabajo.

Obtención de parámetros estadísticos. Las medidas de tendencia central fueron calculadas con las ecuaciones convencionales de estadística (Verma, 2005). La media y varianza fueron calculadas a través de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Ec.14})$$

$$\beta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{\alpha})^2}{(n - 1)} \quad (\text{Ec.15})$$

donde x_i representa los valores registrados en términos de logaritmos.

Transformación a los valores originales. Los parámetros estadísticos calculados (media, varianza y proporción de las poblaciones) están referidos en logaritmos naturales (\ln) de los flujos registrados de CO₂, por lo que es necesario utilizar el estadístico de Sichel (David, 1977) para realizar la transformación a las concentraciones reales del flujo de gases (Cardellini *et al.*, 2003). La media de los valores debidamente transformados y la varianza es usada para calcular el flujo total de gas asociado con cada población. El cálculo del valor medio y varianza usando dichos estadísticos es:

$$\bar{x} = e^{\bar{\alpha}} \cdot t_s \quad (\text{Ec.16})$$

donde $\bar{\alpha}$ es la media de la distribución *log-normal* de los datos, t_s es el estadístico Sichel el cual está en función al número de datos (n) y de la varianza β^2 de la distribución *log-normal* de los datos y se encuentra en tablas reportadas (ver Anexo 2). Los valores del límite inferior y mayor se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$Lc = t_i \cdot \bar{x} \quad (\text{Ec.17})$$

Donde Lc representa el límite estimado, t_i es el estadístico de Sichel para el valor inferior o superior al 90 % de confianza (Anexos 3 y 4).

Cálculo del flujo total. Una evaluación del área cubierta (A) por cada población debe ser conocida por la proporción correspondiente de la población ($S_i = P_i A$). El flujo total de gas asociado a cada población es entonces estimado multiplicando S_i por el flujo de gas (f_{CO_2}). La liberación de gas de toda el área evaluada puede ser obtenida sumando la contribución de cada población:

$$F_{CO_2} = \sum_i f_{CO_2(i)} \cdot P_i \cdot S_i \quad (\text{Ec.18})$$

donde $f_{CO_2(i)}$ es el valor del flujo medio de cada población ($g \ m^{-2} \ día^{-1}$), P_i es el porcentaje en la gráfica de probabilidad acumulada que representa a cada familia (es decir, por el punto de inflexión) y S_i es el área proporcional a cada familia (m^2).

Si se fija un intervalo de confianza del 90 % significa que el 10 % de los valores calculados serían no confiables. Este 10 % se divide en los límites inferior y superior de la distribución, por lo tanto, se tiene un límite del 5 % de los valores y otro del 95 % de los valores. Existen varias técnicas para determinar los intervalos de confianza. En este trabajo de tesis se usó el estadístico no sesgado t_s de Shichel (1952) reportado en David 1997 y Jácome-Paz (2016). Las tablas para calcular t_s se muestran en los Anexos 3 y 4.

4.4 Comparación de flujos con respecto a sistemas volcánicos en el mundo

Los valores de flujo de cada población de la zona de Los Azufres y Alcaparrosa fueron comparados mediante el análisis por agrupamiento (*clustering*). El análisis mediante agrupamiento es una técnica de clasificación de datos. En general, existen cuatro métodos de clasificación: (I) Método por partición, (II) Método de origen arbitrario, (III) Procedimientos de similitud mutua y (IV) Agrupación Jerárquica (John, 2002). En este trabajo de tesis se utilizó el método de agrupación jerárquica.

4.4.1 Agrupamiento de valores mediante jerarquización

La agrupación jerárquica ordena los datos con mayor similitud. Esto se realiza mediante una matriz $n \times n$ de similitudes entre los datos generando pares, los pares con mayores similitudes se unen y la matriz es recalculada. Esto se realiza al evaluar el promedio de similitudes de las observaciones combinadas. El resultado de los niveles de similitud se presenta en un genograma (John, 2002). El análisis de aglomeración mediante jerarquización se realizó con *Mathematica* utilizando el promedio de similitudes combinadas y de distancia euclidiana para la realización del genograma.

Capítulo 5

Resultados y Discusión

5.1 Depuración de los datos

Los Azufres y Alcaparrosa fueron las dos principales zonas de interés con 221 y 121 mediciones respectivamente. Como resultado de las depuraciones realizadas se obtuvo una base de datos de trabajo con 176 mediciones para la zona de Los Azufres ($BDLAZ_{n=176}$) y 90 mediciones para la zona de Alcaparrosa ($BDALC_{n=90}$). El espacio de la malla se mantuvo entre 5 y 10 m dependiendo de las condiciones del campo, por ejemplo, la presencia de cuerpos de agua o pendientes muy inclinadas impedían establecer una malla regular para las mediciones, principalmente en Alcaparrosa.

5.2 Cálculo del área de estudio

Las áreas de estudio en Los Azufres y Alcaparrosa fueron calculadas tomando en cuenta las coordenadas mínimas y máximas registradas durante la campaña de campo. La Figura 26 muestra el área calculada para la zona de Los Azufres la cual fue de $375,798 m^2$ y la Figura 27 muestra el área calculada para la zona de Alcaparrosa la cual cubre dos zonas en total: zona A con $52,839 m^2$ y la zona B con $5,542 m^2$.

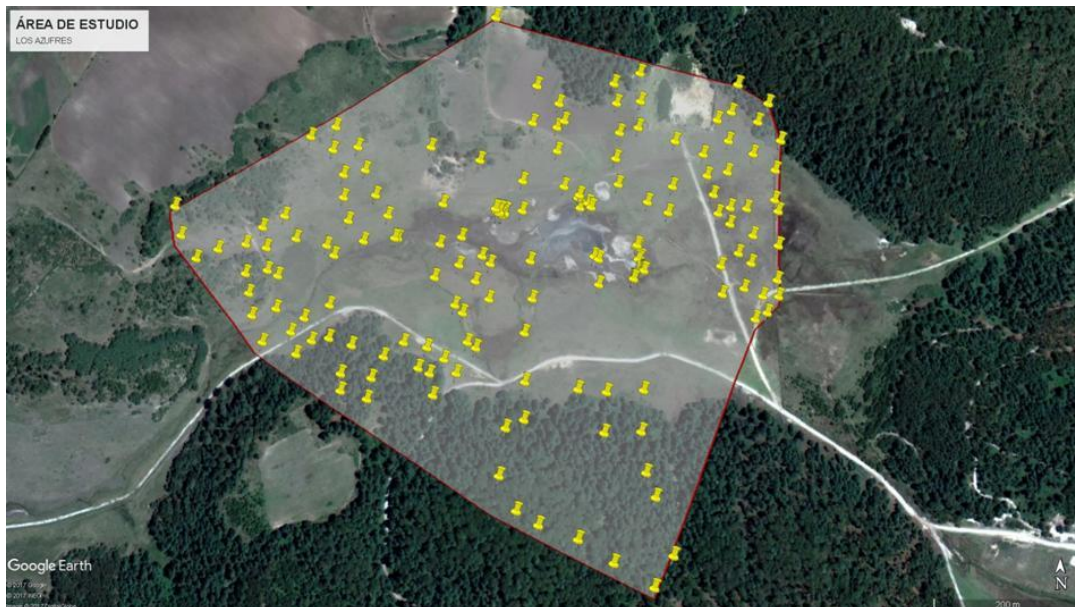


Figura 26. Malla de estudio en la zona de Los Azufres.

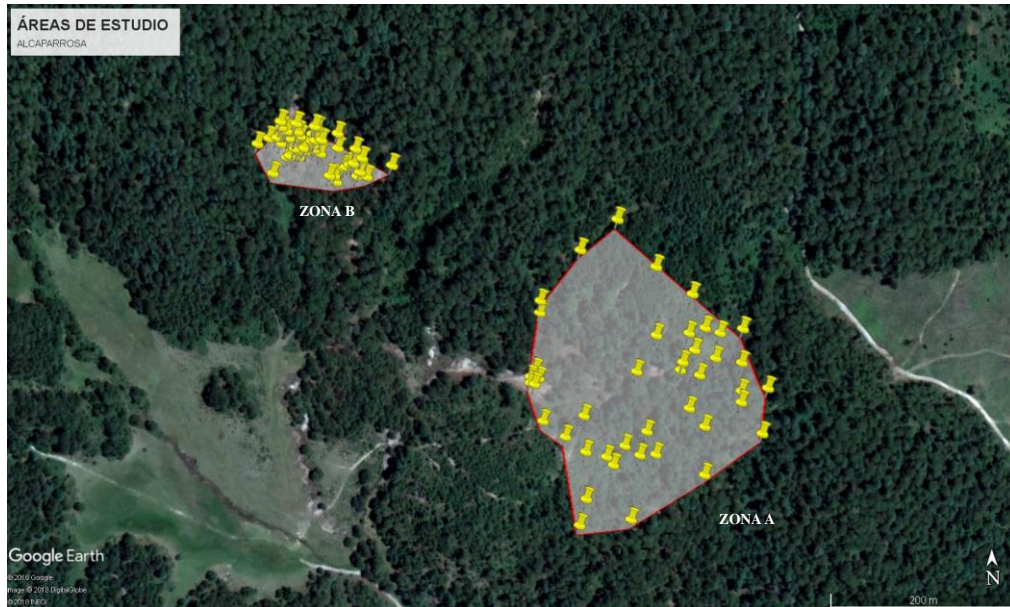


Figura 27. Malla de estudio en la zona de Alcaparrosa.

5.3 Flujo total de CO₂ usando el método gráfico estadístico (GSA)

5.3.1 Los Azufres

Como se observa en la Figura 28 la gráfica de probabilidad obtenida con todos los datos registrados muestra dos puntos de inflexión al 87.13% y al 94.50%. Esta gráfica fue obtenida con el programa *Mathematica*.

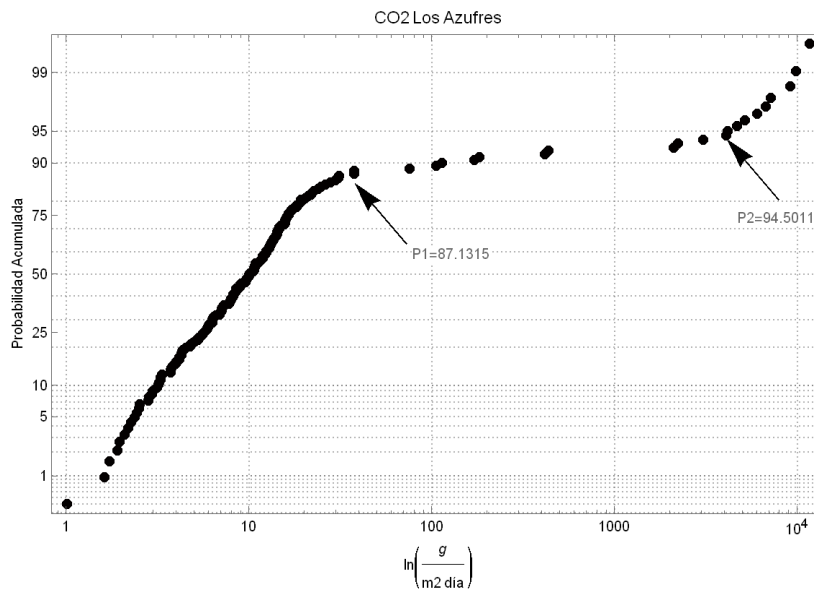


Figura 28. Gráfica de Probabilidad usando la $BDLAZ_{n=176}$

Entre más número de clases se tenga para la división de los datos mejor división de poblaciones se obtendrán (Sinclair, 1974). El número de clases se fijó en 50 el cual generó el histograma de trabajo.

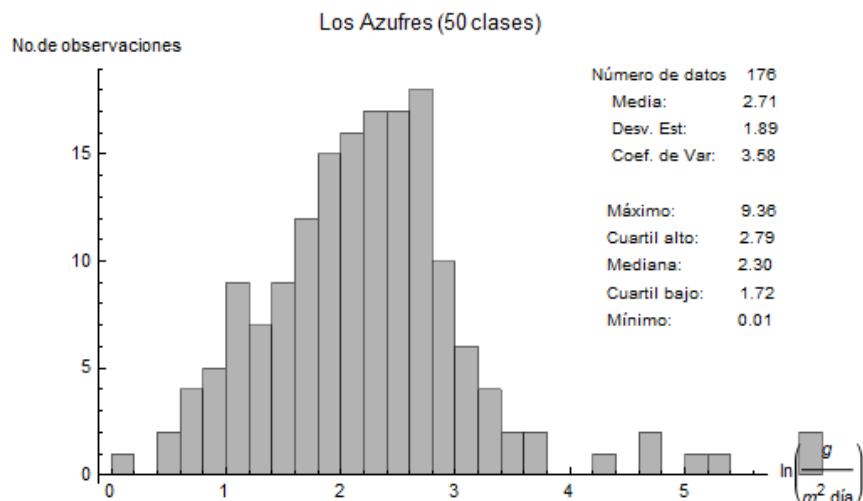


Figura 29. Histograma y parámetros estadísticos obtenidos con la BDLAZ_{n=176}

Acorde al procedimiento de Sinclair (1974) el método estadístico gráfico se realiza con papel probabilístico. En este trabajo de tesis se aplicó el uso de cuantiles para realizar la gráfica de separación y verificación de poblaciones aplicando el método de Sinclair (Figura 30). Analizando la gráfica obtenida se obtuvo tres poblaciones con una probabilidad acumulada de 87.13 % para la población A, 7.37 % para la población B y 5.5% para la población C. Estos valores coinciden con el observado en la gráfica de probabilidad acumulada de la Figura 28.

El método aplicado en Cardellini et al (2003) y Jácome-Paz (2016) fue usado para el cálculo del flujo total. La Tabla 6 muestra los valores estadísticos obtenidos para el cálculo de la media con unidades en $g\ m^2\ día^{-1}$. Con los resultados de la Tabla 6 se estimaron las porciones de cada población de flujo de CO₂ con la media y el rango de flujos usando un intervalo de confianza del 90 %. El flujo promedio de la población A fue de $10\ g\ m^2\ día^{-1}$ con un rango de $9\ a\ 12\ g\ m^2\ día^{-1}$ al 90 % de confianza. Para la población B se obtuvo un flujo promedio de $2,911\ g\ m^2\ día^{-1}$ con un rango de $2,545\ a\ 3,597\ g\ m^2\ día^{-1}$ al 90 % de confianza. Para la población C se obtuvo un flujo promedio de $7,237\ g\ m^2\ día^{-1}$ con un rango de $5,984\ a\ 10,250\ g\ m^2\ día^{-1}$ al 90% de confianza. Finalmente, con los resultados anteriores se estimó un flujo total de $223\ Ton/día$ en la zona de Los Azufres.

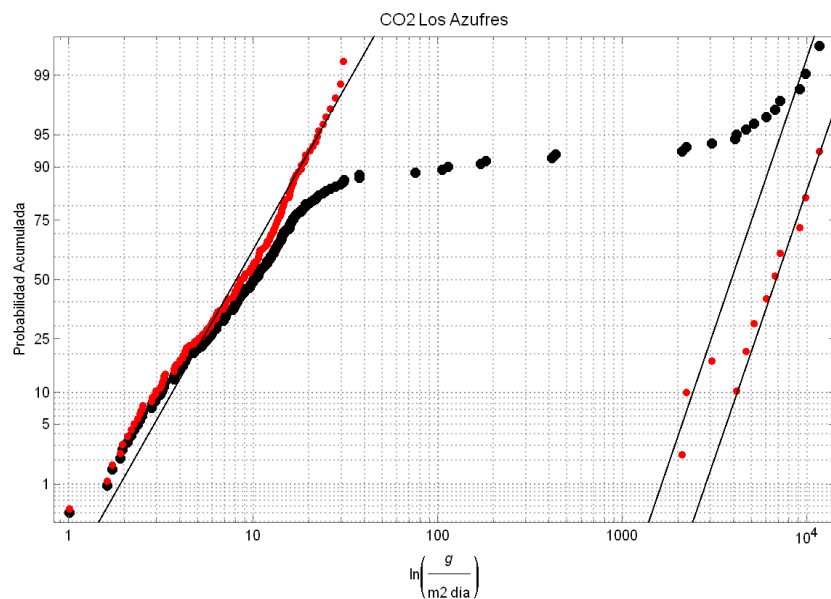


Figura 30. Método de Sinclair (1974) usando los percentiles de los valores de flujo con la base de datos $BDLAZ_{n=176}$

Tabla 7. Resultados de los estadísticos y valor de la media de flujo de CO_2 para la zona de estudio en Los Azufres, Acolulco, Puebla.

ZONA	Registros (n)	$\bar{\alpha}$ (Ec. 14)	β^2 (Ec. 15)	Media (Ec. 16; $g\ m^{-2}dia^{-1}$)
Los Azufres	176			
No. de clases	50			
Población A	154	2.08	0.48	10
Población B	13	7.93	0.01	2,911
Población C	9	9	0.12	7,237

Tabla 8. Estadísticos de Shichel y rango de flujos obtenidos en Los Azufres con un intervalo de confianza del 90 % usando la aproximación gráfica estadística. El cálculo del flujo total fue obtenido para un área de $375,798\ m^2$.

ZONA	t_{si} (Anexo 3)	t_{ss} (Anexo 4)	Mínimo (Ec. 17; ; $g\ m^{-2}dia^{-1}$)	Máximo (Ec. 17; ; $g\ m^{-2}dia^{-1}$)	Flujo Total (Ec. 18; $Ton/día$)
<i>Método directo</i>					2,036
<i>Método GSA</i>					
Población A	0.8935	1.1454	9	12	3
Población B	0.8744	1.2355	2,545	3,596	81
Población C	0.8269	1.4171	5,984	10,255	140

5.3.2 Alcaparrosa

La gráfica de probabilidad obtenida con todos los datos registrados muestra un punto de inflexión del 69.36 % para la población A y 30.64 % para la población B (Figura 31). Esta gráfica fue obtenida usando el programa *Mathematica*.

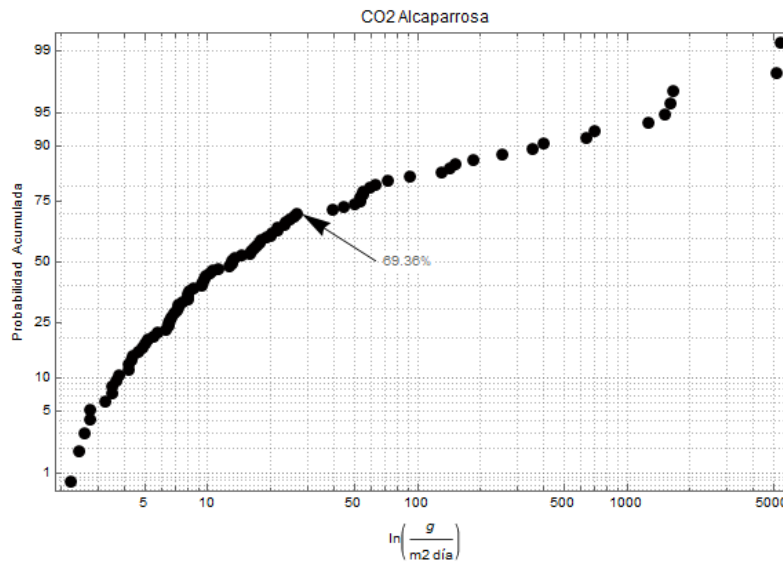


Figura 31. Gráfica de Probabilidad usando la $BDALC_{n=90}$

El número de clases se fijó en 60 el cual generó el histograma de trabajo (Figura 32) ya que entre más número de clases se tenga para la división de los datos mejor división de poblaciones se obtendrán (Sinclair, 1974).

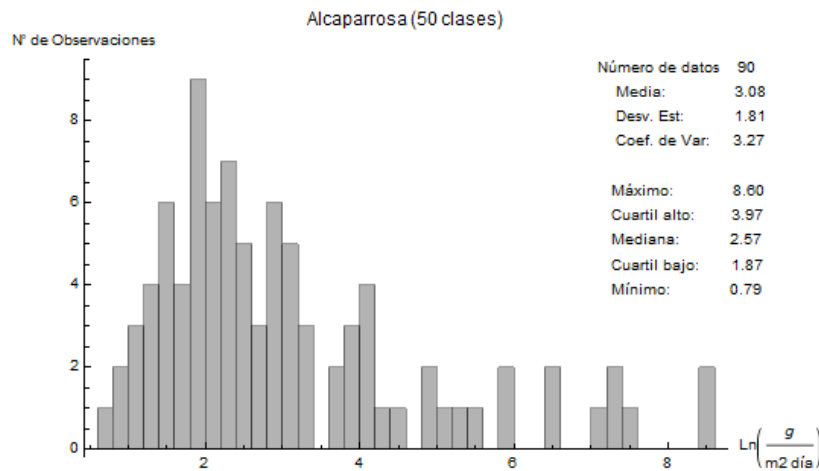


Figura 32. Histograma obtenido con la base de datos $BDALC_{n=90}$.

Acorde al procedimiento de Sinclair (1974) el método estadístico gráfico se realiza con papel probabilístico. En este trabajo de tesis se aplicaron percentiles para realizar la gráfica de separación y verificación de poblaciones aplicando el método de Sinclair (Figura 33). Analizando la gráfica obtenida se obtuvo un punto de inflexión con 69 % y 31 % para la población A y población B respectivamente. Estos valores coinciden con el observado en la gráfica de probabilidad acumulada de la Figura 31.

El método sugerido en Cardellini et al (2003) y Jácome-Paz (2016) fue aplicado para el cálculo del flujo total. La Tabla 8 muestra los valores estadísticos obtenidos para el cálculo de la media con unidades en $g\ m^{-2}\ día^{-1}$. Con los resultados de la Tabla 8 se estimaron las porciones de cada población de flujo de CO₂ con la media y el rango de flujos usando un intervalo de confianza del 90 %. El flujo promedio de la población A fue de $10\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ con un rango de 9 a $12\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ al 90 % de confianza. Para la población B se obtuvo un flujo promedio de $686\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ con un rango de 377 a $2,298\ g\ m^{-2}\ día^{-1}$ al 90 % de confianza. Finalmente, con los resultados anteriores se estimó un flujo total de $12.4286\ Ton/día$ en la zona de Alcaparrosa.

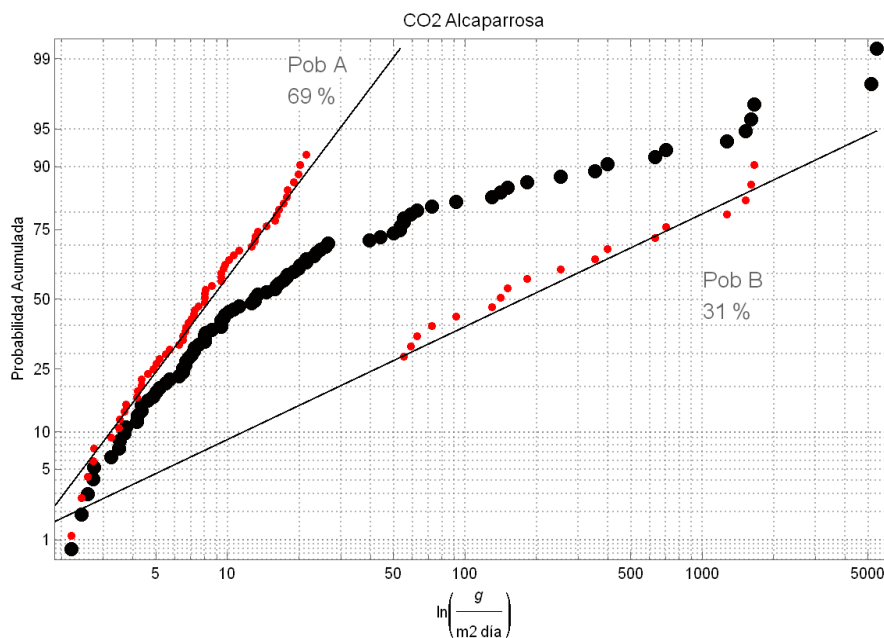


Figura 33. Método de Sinclair (1974) usando percentiles con la base de datos $BDLAZ_{n=90}$

Tabla 9. Resultados de los estadísticos y valor de la media de flujo de CO₂ para la zona de estudio en Alcaparrosa, Acoculco, Puebla.

ZONA	Registros (n)	$\bar{\alpha}$ (Ec. 14)	β^2 (Ec. 15)	t_s (Anexo 2)	Media (Ec. 16; g m ⁻² día ⁻¹)
Alcaparrosa	90				
No. de clases	60				
Población A	63	2.10	0.4436	1.2473	10
Población B	27	5.3534	2.4644	3.2455	686

Tabla 10. Estadísticos de Sichel y rango de flujos obtenidos en Alcaparrosa con un intervalo de confianza del 90 % usando la aproximación gráfica estadística. El cálculo del flujo total fue obtenido para un área de 58,381 m².

ZONA	t_{si} (Anexo 3)	t_{ss} (Anexo 4)	Mínimo (Ec. 17; ; g m ⁻² día ⁻¹)	Máximo (Ec. 17; ; g m ⁻² día ⁻¹)	Flujo Total (Ec. 18; Ton/día)
<i>Método directo</i>					246
<i>Método GSA</i>					
Población A	0.8639	1.2013	9	12	0.42
Población B	0.5492	3.3506	377	2,298	12

5.4 Comparación de flujos mediante el método de agrupamiento

La comparación de los resultados obtenidos fue realizada con sistemas geotérmicos evaluados en zonas volcánicas, cuyas áreas de estudio se concentran en los cráteres volcánicos, lagunas y alrededores. De estos estudios, mediante el uso de la cámara de acumulación, se reportan resultados de flujo con un rango entre 40 y 5,530 g m⁻²día⁻¹, cuyos valores corresponden a la caldera de Nisyrios en Grecia y de La Solfatara en Italia, respectivamente. En comparación, los flujos obtenidos para la caldera de Acoculco se encuentran entre 10 y 686 g m⁻²día⁻¹ en la zona de Alcaparrosa, en la zona de Los Azufres los flujos van desde 10 a 7,237 g m⁻²día⁻¹. Con base a su semejanza los datos se agruparon en la Figura 34.

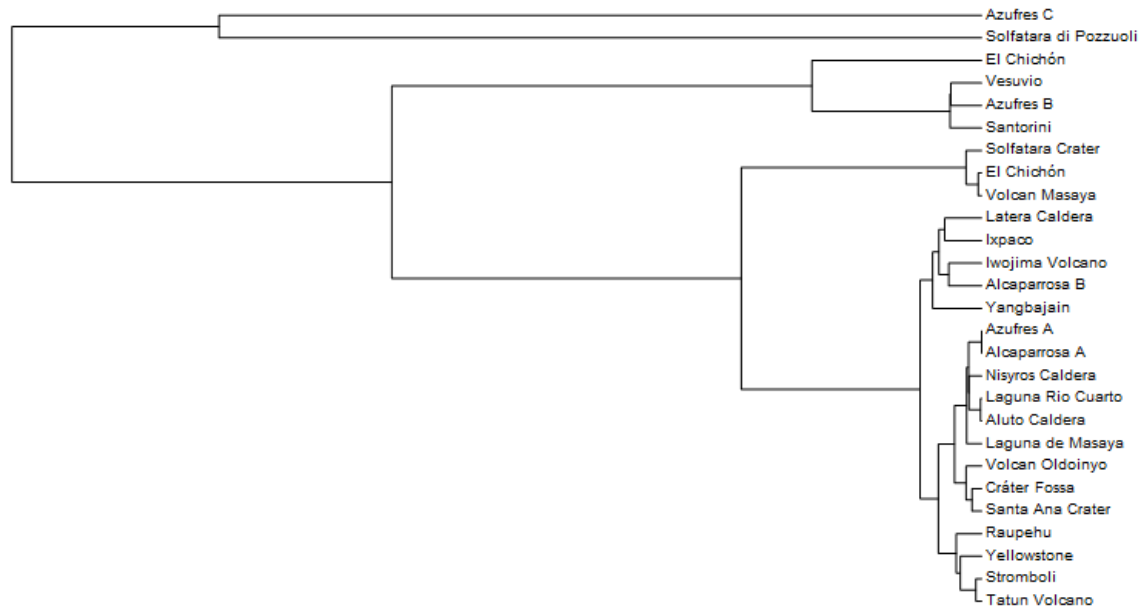


Figura 34. Genograma comparativo de flujos de CO₂ en sistemas geotérmicos

El genograma compara el flujo de gas en los sistemas y no busca una correlación en función de la estructura del sistema debido a las características particulares de cada zona, sin embargo, los sistemas comparados son reportadas como zonas con actividad volcánica. Los valores de flujo de CO₂ se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Flujos de CO₂ en sistemas geotérmicos incluyendo los valores de Los Azufres y Alcaparrosa

ZONA	Flujo [g m ⁻² día ⁻¹]	País	Referencia
Azufres C	7237	México	Este estudio
Solfatara di Pozzuoli	5530	Italia	Cardellini <i>et al.</i> , 2003
Vesubio	2980	Italia	Froncini <i>et al.</i> , 2004
Azufres B	2911	México	Este estudio
Santorini	2840	Italia	Chiodini <i>et al.</i> , 1998
El Chichón	1485	México	Mazot y Taran 2009
Volcán Masaya	1477	Nicaragua	Lewicki <i>et al.</i> , 2005
Latera Caldera	939	Italia	Chiodini <i>et al.</i> , 2007
Ixpaco	856	Guatemala	Pérez <i>et al.</i> , 2011
Volcán Iwojima	760	Japón	Notsu <i>et al.</i> , 2005
Alcaparrosa B	686	México	Este estudio
Yangbajain	576	Italia	Chiodini <i>et al.</i> , 1998
Solfatara	440	Italia	Chiodini y Frondini 2011
Raupehu	438	Nueva Zelanda	Mazot <i>et al.</i> , 2010
Stromboli	381	Italia	Inguaggiato <i>et al.</i> , 2012
Volcán Tatum	368	Taiwán	H.-Y. Wen <i>et al.</i> , 2016
Yellowstone	320	EE. UU.	Werner <i>et al.</i> , 2008
Cráter Santa Ana	223	El Salvador	Bernard <i>et al.</i> , 2004
Cráter Fossa	201	Italia	Chiodini G., <i>et al.</i> , 1996
Volcán Oldoinyo	166	Tanzania	Koepenick <i>et al.</i> , 1996
Laguna de Masaya	105	Nicaragua	Pérez <i>et al.</i> , 2011
Caldera Aluto	71	Etiopía	Hutchison <i>et al.</i> 2015
Laguna Rio Cuarto	68.26	Costa Rica	Pérez <i>et al.</i> , 2011
Caldera Nisyrios	39.7	Grecia	Cardellini <i>et al.</i> , 2003
Azufres A	10	México	Este estudio
Alcaparrosa A	10	México	Este estudio

Conclusiones

Conforme a los objetivos programados en el presente trabajo de tesis, los resultados obtenidos permitieron establecer las siguientes conclusiones:

- La técnica de cámara de acumulación fue exitosamente aplicada para la medición del flujo de CO₂ en las zonas de Los Azufres y Alcaparrosa. El flujo de CO₂ es un indicador importante para la exploración de sistemas geotérmicos ya que genera información sobre la desgasificación del sistema el cual puede ser de origen magmático o biogénico.
- El método gráfico estadístico aplicado en la zona de los Azufres permitió clasificar los flujos en tres poblaciones diferentes: La población A representa el 87.5 % de todas las mediciones de flujo de CO₂ mostrando una media de $10.22 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ con un intervalo de 9 a $12 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90% de confianza. Este flujo de desgasificación probablemente refleja la baja permeabilidad del sistema, así como flujos biogénicos. La población B representa el 7.4% de los datos con flujo de $2,911 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un intervalo entre 2,545 a $5,596 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90 % de confianza. Por otra parte, la población C representa el 5.11% de los datos con un flujo de $7,237 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un intervalo entre 5,983 a $10,25 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$
- El método gráfico estadístico aplicado en la zona de Alcaparrosa permitió también clasificar los flujos en dos poblaciones diferentes: la población A representa el 69 % de todas las mediciones de flujo de CO₂ mostrando una media de $10.19 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ con un intervalo entre 9 - $12 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90% de confianza. Este flujo de desgasificación probablemente refleja la baja permeabilidad del sistema, así como flujos biogénicos. Por otra parte, la población B representa el 31% de los datos restantes con flujo $686 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ y un rango entre $377\text{-}2,298 \text{ g m}^{-2}\text{día}^{-1}$ al 90 % de confianza.
- El flujo de CO₂ total para la zona de Los Azufres fue 223.22 ton/día , mientras que para Alcaparrosa fue de 12.43 ton/día . Estos valores son comparables con los obtenidos en sistemas geotérmicos y volcánicos desgasificantes.

- Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis muestran los valores naturales de flujo de CO₂ de las zonas Los Azufres y Alcaparrosa, los cuales servirán como base para la futura evaluación de emanaciones de CO₂ en la fase de explotación de estos sistemas geotérmicos.

Bibliografía

- Anderson O. L., Perkins P. C., (1975). *A Plate tectonics model involving non-laminar asthenospheric flow to account for irregular patterns of magmatism in the southwestern United States*, En *Physics and Chemistry of the Earth*, pp. 112-122.
- Bernard A., Escobar C.D., Mazot A., Gutiérrez R.E. (2004). *The acid volcanic lake of Santa Ana volcano, El Salvador*. Geological Society of America Special Paper 375, pp. 121-134.
- Bernard A., Mazot A., (2004). *Geochemical evolution of the young crater lake of Kelud volcano in Indonesia*. En *Proceedings of the eleventh international symposium on water-rock interaction*, Saratoga Springs, New York, USA 1, 87-90.
- Bertani R., (2015). *Geothermal Power Generation in the World 2010-2015 Update Report*, *Geothermics*, 60: 31-43.
- Bogie I., Lawless J.V., Pornuevo J.B. (1987). *Kaipohan: An apparently nonthermal manifestation of hydrothermal systems in the Philippines*. En *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 31 pp. 281-292.
- Bruhn David, Adele Manzella, Francois Vuataz, James Faulds, Inga Moeck, Kernal Erbas, (2010). *Geothermal Energy Systems*, Chapter 2 Exploration Methods pp. 37-112. Editado por: Ernst Huenges, Willey-VCH Verlag GmbH & Co.
- Camarda M.S., Gurrieri S., Valenza M., (2009). *Effects of soil gas permeability and recirculation flux on soil CO₂ flux measurements performed using a closed dynamic accumulation chamber*. *Chemical Geology* 265, 387-393.
- Canet C., Arana L., González-Partida E., Pi T., Prol-Ledesma R.M., Franco S.I., Villanueva-Estrada R.E., Camprubí A., Ramírez-Silva G., López-Hernández A., (2010). *A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acozulco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt*. En *Journal of Geochemical Exploration* 105(1-2), 1-10.
- Canet C., Trillaud F., Prol-Ledesma R.M., González-Hernández G., Peláez B., Hernández-Cruz B., Sánchez-Córdova M.M., (2015). *Thermal history of the Acozulco geothermal system, Eastern Mexico: Insights from numerical modeling and radiocarbon dating*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 56-62.
- Cardellini C., Chidini G., Frondini F., (2003). *Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil: mapping and quantification of gas release*. *Journal of Geophysics*, pp. 2425-2437.
- Cardellini C., Chiodini G., Frondini F., (2003). *Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil: mapping and quantification of gas release*. *Journal of Geophysical Research*, 108(B9). 1-13.

- Cataldi, R., Hodgson, S.F., Lund, J.W., (1999). *Stories from a Heated Earth – Our Geothermal Heritage*. Geothermal Resources Council, Davis, California, 580 pp.
- Chiodini G., Baldini A., Barberi F., Carapezza M.L., Cardellini C., Frondini F., Granieri D., Ranaldi M. (2007). *Carbon dioxide degassing at LATERA caldera (Italy): Evidence of geothermal reservoir and evaluation of its potential energy*. En *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B12204.
- Chiodini G., Caliro S., Cardellini C., Avino R., Granieri D., Schmidt A., (2008). *Carbon isotopic composition of soil CO₂ efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO₂ degassing in volcanic-hydrothermal areas*. *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 372-379.
- Chiodini G., Cioni R., Guidi M., Raco B., Marini L. (1998). *Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas*. En *Applied Geochemistry*, Vol 12. No. 5, pp. 543-552.
- Chiodini G., Cioni R., Marini L., Panichi C., (1995). *Origin of the fumarolic fluids of Vulcano Island, Italy, and implications for volcanic surveillance*. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 57, No. 2, pp 99-110.
- Chiodini G., Frondini F., Cardellini C., Granieri D., Marini L., Ventura G., (1998). *CO₂ degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 106, pp. 16213-16221.
- Chiodini G., Frondini F., Raco B., (1996). *Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy)*. En *Bulletin of Volcanology*, Vol 58 pp. 41-50.
- Chiodini G., Frondini, F. (2001) *Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, Central Italy*. *Chemical Geology*, Vol. 177, pp. 67-83.
- Christenson y Tassi, (2015). *Gases in volcanic lakes environments*. Chapter in Rouwet et al (eds.) *Volcanic Lakes, advance in Volcanology*, 125-154.
- David M., (1977). *Geostatistical ore reserve estimation*. El Servier Scientific Pub. Co. New York, pp. 357.
- Dickson M.H., Fanelli M., (2004). *What is geothermal energy?*, Consulta Online, disponible en: <http://www.geothermal-energy.org/geo/geoenergy.php>.
- Kana-Domra, J., Djongyang N., Raidandi D., Njandjock-Nouck P., Dadjé A., (2015). *A review of geophysical methods for geothermal exploration*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 44, pp. 87-95.
- Fine Gerlad y Stolper Edward, (1985). *Dissolved carbon dioxide in basaltic glasses: concentrations and speciation*. En *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 76, pp. 263-278.
- Flores-Armenta M., Ramírez-Montes M., Morales-Alcalá L., (2014). *Geothermal Activity and Development in México – Keeping the Production Going Short course VI on utilization of low-*

and medium-enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization”, organized by UNU-GTP y LaGeo, en SantaTecla, el Salvador, Marzo

- Flóvenz Ó.G., Árnarson F., Gautason B., Axelsson G., Egilson Th., Steindórsson S.H., Gunnarsson H.S., (2010). *Geothermal district Heating in Eyjafjörður, N-Iceland; Eighty years of problems, solution, and success*. En Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 Abril, 8 p.
- Flóvenz ÓG, Hersir GP, Saemundsson K, Ármannsson H y Fridriksson, (2012). *Geothermal Energy Exploration Techniques*. Ed. Comprehensive Renewable Energy, Elsevier. Oxford, Vol 7, pp. 51-95.
- Fridriksson, T., (2009). *Diffuse CO₂ degassing through soil and geothermal exploration. Presented at Short course on surface exploration for geothermal resources*, United Nations University, Geothermal Training Programme, LaGeo S.A. de C.V., El Salvador, 17-30 October, 1-6.
- Fridriksson, T., Padrón, E., Óskarsson, F., Pérez, N.M., (2016). *Application of diffuse gas flux measurements and soil gas analysis to geothermal exploration and environmental monitoring: Example from the Reykjanes geothermal field, SW Iceland*. Renewable Energy 86, 1295-1307.
- Fronzini F., Chiodini, G., Caliro S., Cardellini, D., Ventura, G. (2004). *Diffuse CO₂ degassing at Vesuvio, Italy*. Bulletin of Volcanology, Vol. 66 pp. 642-651.
- Giggenbach W.F., (1975). *A simple method for the collection and analysis of volcanic gas samples*. Bulletin volcanologique 39(1), 132-145.
- Giggenbach W.F., (1980). *Geothermal gas equilibria*. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 44, pp. 2021-2032.
- Giggenbach W.F., (1987). *Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand*. Applied Geochemistry 2(2), 143-161.
- Giggenbach W.F., (1989). *The chemical and isotopic position of the Ohaaki field within the Taupo volcanic zone*. En: Proceedings 11th New Zealand Geothermal, 81-88.
- Gupta H., Roy S., (2007). *Geothermal Energy an Alternative Resource for the 21ST Century*. Ed. ELSEVIER, Kidlington: 279 p.
- Gutiérrez-Negrín L.C.A., (2012). *Update of the geothermal electric potential in México*. Geothermal Resources Council Transactions, 36, 671-677.
- Gutiérrez-Negrín L.C.A., (2014). *Aspectos relevantes de la iniciativa de ley de energía geotérmica*. Archivo Mayo Asociación Geotérmica Mexicana. <http://geotermia.org.mx/geotermia/pdf/ASPECTOS.pdf>
- Gutiérrez-Negrín L.C.A., Maya-González R., Quijano-León J.L. (2015). *Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico*, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 Abril 2015 10 p.

- Handbook, (2012). Portable diffuse flux meter with LI-COR CO₂ detector. Release 8.2, September 2012. West Systems, Italy, 123 p.
- Hanson P.J., Wullschleger S.D., Bohlman S.A., Todd D.E., (1993). *Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest*. Tree Physiology 13(1), 1-15.
- Harvey M.C., Harvey C.C., (2015). *Soil CO₂ flux surveys: a review of the techniques in geothermal exploration*. En Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 Abril 2015, 1-8.
- Henley R.W., Ellis A.J., (1983). *Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review*. Earth-Science Reviews, Vol. 19, pp. 1-50.
- Hernández-Galan, J.L., (1985). *La Energía de la Tierra: El Origen del Calor Terrestre y los Antecedentes y Desarrollo actual de su aprovechamiento*. Ed. Cecsá, México: 230 p.
- Hiriart G., Gutiérrez-Negrín L.C.A. (2003). *Main Aspects of Geothermal Energy in Mexico* Geothermics. 32: 389-396.
- Hiriart G.L.B., Gutierrez-Negrín L.C.A., Quijano-León J., Oruelas-Celis O., Espíndola S., Hernández I., (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*, Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. Inter-American Development Bank. Ciudad de México, México.
- Hsin-Yi Wen, Tsanyao F. Yang, Tefang F. Lan, Hsiao-Fen Lee, Cheng-Horng Lin, Yuji Sano, Cheng-Hong Chen (2016). *Soil CO₂ flux in hydrothermal areas of the Tatun Volcano Group, Northern Taiwan*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 321, pp. 114-124.
- Hutchison, W., Mather, T.A., Pyle, D.M., Biggs, J., Yirgu, G., (2015). *Structural controls on fluid pathways in an active rift system: a case of the Aluto volcanic complex*. Geosphere.
- IGA, (2014). *Best Practices Guide For Geothermal Exploration*, University of Applied Sciences Bochum, Alemania, 196 pp.
- Inguaggiato S., Jácome Paz M.P., Mazot A., Granados Delgado H., Inguaggiato C., Vita F. (2012) *CO₂ output discharged from Stromboli Island (Italy)*, Chemical Geology Vol. 339 pp. 52-60.
- Jácome-Paz- M.P., (2016). *Mapeo de flujos de CO₂ en el volcán Chichón*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 103 p.
- Jácome-Paz M.P., Delgado-Granados H., (2017). *Uso del flujómetro West System y elaboración de mapas con Wingslib. Detalles del uso y calibración del flujómetro Wes System®. Guía para la resolución de problemas durante el trabajo de campo y una introducción al uso del programa Wingslib*. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 46 p.
- John C. Davis (2002). *Statistics and Data Analysis in Geology, 3rd Edition*. John Wiley and Sons. United States, 656 p.

- Koch G.S., Link R.F., (2002). *Statistical Analysis of Geological Data*. Dover Phoenix Editions, New York, USA, 832 p.
- Koepenick, K.W., S.L. Brantley, J.M. Thompson, G.L. Rowe, A.A. Nyblade, C. Moshy (1996). *Volatile emissions from the crater and flank of Oldoinyo Lengai volcano, Tanzania*, Journal of Geophysical Research, 13, 819-830.
- Lewicki Jennifer L., Deborah Bergfeld, Carlo Cardellini, Giovanni Chiodini, Domenico Granieri, Nick Varley, Cynthia Werner. (2005). *Comparative soil CO₂ flux measurements and geostatistical estimation methods on Masaya volcano, Nicaragua*. En Bulletin of Volcanology, Vol. 68 pp. 76-90.
- Lewicki, J., Oldenburg, C.M., 2005. *Near-surface CO₂ monitoring and analysis to detect hidden geothermal systems*. Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-176.
- López-Hernández A. (2009). *Evolución Volcánica del Complejo Tulancingo-Acocolco y su Sistema Hidrotermal, Estados de Hidalgo y Puebla, México*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, pp. 185.
- López-Hernández A., García-Estrada G., Aguirre-Díaz G., González-Partida E., Palma-Guzmán H., Quijano-León J.L., (2009). *Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acocolco caldera complex, central Mexico: Exploratory studies*. Geothermics 38, 279-293.
- Lorenzo-Pulido C., Flores-Armenta M., Ramírez-Silva G., (2011). *Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acocolco, Pue. Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 24, No. 1, pp. 59-70.
- Lund J.W., Boyd T.L., (2015) *Direct utilization of geothermal energy 2015, worldwide review*. World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 31 pp.
- Lund W.J., Freeston H. D., Tonya L. B. (2010). *Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review*, Geothermics, 40: 159-180.
- Marini L., Chiodini G., (1994). *The role of carbon dioxide in the carbonate-evaporite geothermal systems of Tuscany and Latium (Italy)*. Acta Vulcanol.
- Mazot A. y Taran Y., (2009) *CO₂ flux from the volcanic lake of El Chichón (México)*. Geofísica Internacional, Vol. 48, pp. 73-83.
- Mazot A., Christenson B., Bernard A., Taran Y. (2010). *Fluxes of carbon dioxide from volcanic lakes: Temporal evolution of highlighted structure: Workshop on Volcanic Lakes Costa Rica, 7th, IAVCEI Commission of Volcanic Lakes, Abstracts*. Vol 1, p. 23.
- Martínez H. Eduardo, Juan Pablo Fuentes E., Edmundo Acevedo H., (2008). *Carbono orgánico y propiedades del suelo*. Journal of Soil Science, 8 (1) 68-96.
- Nicholson K., (1993). *Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques*. The Robert Gordon University, Editorial Springer Verlag, Berlín Heidelberg: 268 p.

- Norman J., García R., Verma S.B., (1992). *Soil surface CO₂ fluxes and carbón budget of a grassland*. Journal of Geophysical Research Atmospheres 97(D17).
- Notsu, K. Sugiyama, K. House, M. Uemura, A. Shimoike, Y. Tsunomori, F. Sumino, H. Yamamoto, J. Mori, T. Hernández, P.A. (2005). *Diffuse CO₂ efflux from Iwojima volcano, Izu-Ogasawara arc, Japan*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 139, pp. 147-161.
- Ordaz C.A., Flores Armenta M., Ramírez-Silva G., (2011). *Potencial geotérmico de la República Mexicana*. Geotermia 24(1), 50-58.
- Peiffer L., Bernard-Romero R., Mazot A., Taran Y.A., Guevara M., Santoyo E., (2014). *Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO₂-CH₄-H₂S) at promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Aocolco caldera, Mexico*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, pp. 122-137.
- Peiffer L., Wanner C., Pan L., (2015). *Numerical modeling of cold magmatic CO₂ flux measurements for the exploration of hidden geothermal systems*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 120, pp. 6856-6877.
- Pérez M. Nemesio, Pedro A. Hernández, German Padilla, Dácil Nolasco, José Barrancos, Gladys Melían, Eleazar Padrón, Samara Dionis, David Calvo, Fátima Rodríguez, Kenji Notsu, Minoru Kusakabe, M. Carmencita Arpa, Paolo Reniva, Martha Ibarra. (2011). *Global CO₂ emission from volcanic lakes*. Geological Society of America
- Polak B.G., Prasolov E.M., Kononov V.I., Verkhovskiy A.B., Gonzalez A., Templos L.A., Espindola J.M., Arellano J.M., Manón A., (1982). *Isotopic composition and concentration of inert gases in mexican hydrothermal systems (Genetic and applied aspects)*. Geofisica Internacional, Vol. 21, No. 3, pp. 35.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J., Johnson, J.R. (1993). *Heat Flow from the Earth's interior: analysis of the global data set*. Reviews of Geophysics, 31: 267-280.
- Pulido C.L., Flores-Armenta M., Ramírez-Silva G., (2011). *Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Aocolco, Puebla*. Geotermia 24(1), 59-69.
- Rojas F. (2016). Piensa en Geotermia. Información disponible en <http://www.piensageotermia.com/>, consultado en octubre de 2016.
- Rybach, L. (1981). *Geothermal Systems; Principles and Cases Histories*. Ed. John Wiley & Sons, New York: 337p.
- Rybach, L. (2010). *Status and Prospects of Geothermal Energy*, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 Abril 2010, 5p.
- Santoyo E., Barragán-Reyes R.M., Torres-Rodríguez V., (1993). *Estructura de los sistemas geotérmicos*. En *Geotermia en México*, Primera Edición, Documentos de análisis y prospectiva del programa universitario de energía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 162.

- Santoyo E., Torres Alvarado I.S. (2010). *Escenario Futuro de Explotación de la Energía Geotérmica: Hacia un Desarrollo Sustentable*. Revista Digital Universitaria UNAM, 11 (10): 26 p
- Sanyal S.K. (2010). *Future of Geothermal Energy*, Proceedings, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 2010, Stanford, California, 1-3 Febrero 2010, 6p.
- SENER, (2016a). Generación Bruta de Energía Eléctrica, Información disponible en: <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>, consultado en septiembre de 2016.
- SENER, (2016b). Datos Técnicos de las Principales Centrales de CFE en Operación en 2015, Información disponible en: <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>, consultado en septiembre de 2016.
- Shichel H.S., (1966). *The estimation of means and associated confidence limits for small samples from lognormal population*. Symposium an Mathematical Statistics and Computer Applications in Ore Valuation. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 106-122.
- Sinclair A.J., (1974). *Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs*. Journal of Geochemical Exploration, 3, 129-149.
- Taran Yuri A. y Giggenbach Werner F., (2003). *Geochemistry of Light Hydrocarbons in Subduction-Related Volcanic and Hydrothermal Fluids*. En Society of Economics Geologists, Special Publication 10, 2003, p. 61-74.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., (2004). *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge University Press, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 760 p.
- Tello-Hinojosa E., (1991). *Química de los fluidos hidrotermales de la zona geotérmica de La Caldera de Acoculco, Pue*. Revista Mexicana de Geoenergía, Vol. 7, No. 2, pp. 201-229.
- Tester J., Blackwell D., Petty, S., Richards, M., Moore, M, Anderson, B., Livesay, B., Augustine, C., Dippipo, R, Nichols, K, Veatch, R, Drake, E., Toksoz, N., Baria, R, Batchelor, A.S., Garnish, K, (2007) *The Future of Geothermal Energy: An Assessment of the Energy Supply Potential of engineered geothermal systems (EGS) for the United States*, En: Proceedings of the thirty-second workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, EE.UU. Enero 24 p.
- TGE, (2018). Top 10 Geothermal Countries base on installed capacity-Year end 2017. Think Heoenergy, Annual list of the Top Countries based on installed geothermal power generation capacity (MW). <http://www.thinkgeoenergy.com/top-10-geothermal-countries-based-on-installed-capacity-year-end-2017/>
- Torres-Rodríguez V. (1993). *Geotermia en México*. Ed. UNAM, Programa Universitario de Energía, Ciudad de México: 161 p.

- Verma S.P., (2005). *Estadística básica para el manejo de datos experimentales: aplicación en la geoquímica (geoquimiometría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 186 p.
- Viggiano-Guerra J.C., Flores Armenta M.C., Ramírez-Silva G.R., (2009). *Evolución del sistema geotérmico de Acapulco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones*. Memorias del XVII Congreso Anual, Morelia, Michoacán, 13 de noviembre de 2009.
- Wallace Paul J., (2005). *Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data*. En *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 140, pp. 217-240.
- Wallace Paul y Carmichael Ian S. E., (1992). *Sulfur in basaltic magmas*. En *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 56, pp. 1863-1874.
- Welles J.M., Demetriades-Shah M.T.H., McDermit D.K., (2001). *Considerations for measuring ground CO₂ effluxes with chamber*. *Chemical Geology* 177, 3-13.
- Wemer, C., Hurwitz, S., Evans, W.C., Lowenstern, J.B., Bergfeld, D., Heasler, H., Jaworowski, C., Hunt, A. (2008). *Volatile emissions and gas geochemistry of Hot Spring Basin, Yellowstone National Park, USA*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 178, pp. 751-762.

ANEXOS

ANEXO 1. Certificados de calibración de los equipos usados durante la campaña de exploración.



**Calibration certificate
Portable soil flux meter**

Certificate N°	2014/17	Date	25 Nov 2014
Order N°	S_HL_23_UNAM_GLU	Instrument serial number	WS1414
Customer	UNAM		
Address	AV. UNIVERSIDAD N°3006, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO, C.U., DISTRITO FEDERAL, 04510		

Calibration atmospheric conditions

Barometric Pressure (mbar)	1007
Sensor brand, model and sn	VEGA PTE113 - 0003002
Air Temperature (°C)	23
Sensor brand, model and sn	LSI System DMA675 - A31070501

Model and Serial number	Target Gas	Full scale	Sample gas		Expected reading (ppm)	Actual Reading (ppm)*
			Cylinder Code	Composition		
LI-GOR LI-840A sn: USA-2204	CO ₂	2%	W_GAS_43_B	1% CH ₄ , 2% CO ₂ , balance N ₂	19.730	18.015
			W_GAS_48_B	100% N ₂	0	-2
WS-CM-TL II sn 14014	CH ₄	1%	W_GAS_43_B	1% CH ₄ , 2% CO ₂ , balance N ₂	9.873	6.677
			W_GAS_46_B	100% N ₂	0	0.3
WS-TOX-H2S sn 1407	H ₂ S	25 ppm	W_GAS_46_B	20 ppm H ₂ S, balance N ₂	21.9	22.1
			W_GAS_46_B	100% N ₂	0	0.1

* Arithmetic mean of 10 values sampled at 1 Hz

Notes

The instrument is in conformity with the original certificates of the manufacturing company, and has been tested with positive results.

West Systems srl
Diede Continanza

West Systems Srl

Sezione Legale ed Amministrativa - Viale D'Adda, 1 - 20139 Milano (MI) - Italy - Tel: +39 02 85911 - Fax: +39 02 85912
 Sede Operativa - Via D'Adda, 1 - 20139 Milano (MI) - Italy - Tel: +39 02 85911 - Fax: +39 02 85912
 Via D'Adda, 1 - 20139 Milano (MI) - Italy - Tel: +39 02 85911 - Fax: +39 02 85912
 www.westsystemsrl.it email: info@westsystemsrl.it



Calibration certificate Portable soil flux meter

Certificate N°	2014/18	Date	02 Dec 2014
Order N°	C_14_120_UNAM_GECO	Instrument serial number	WS1410
Customer	UNAM		
Address	AV. UNIVERSIDAD N° 3000, UN. VERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO, S.U., DISTRITO FEDERAL, 04510		

Calibration atmospheric conditions

Barometric Pressure (mbars)	1002
Sensor brand, model and s/n	Vaisala PTB110 - 00930002
Air Temperature (°C)	18
Sensor brand, model and s/n	LSI Lactan DMA4575 AG10 0531

Model and Serial number	Target Gas	Full scale	Sample gas		Expected reading (ppm)	Actual Reading (ppm)*
			Cylinder Code	Composition		
LICOR LI-9404 s/n CGA-2206	CO ₂	2%	W_GAS_45_3	1% CH ₄ , 2% CO ₂ , balance N ₂	19,700	19,640
			W_GAS_46_3	100% N ₂	0	2
WS-CH4-TLD s/n 14015	CH ₄	1%	W_GAS_45_3	1% CH ₄ , 2% CO ₂ , balance N ₂	9,870	9,820
			W_GAS_46_3	100% N ₂	0	0.3
WS-TOX-H2S s/n 1406	H ₂ S	25 ppm	W_GAS_45_3	20 ppm H ₂ S, balance N ₂	21.8	21.8
			W_GAS_46_3	100% N ₂	0	-0.1

* Automated mean of 10 values sampled at 1 Hz

Notes: _____

The instrument is in conformity with the original certificates of the manufacturing company, and has been tested with positive results.

West Systems srl
Dovce Santinanza



Calibration certificate Portable soil flux meter

Certificate N°	2015/13	Date	21 Jul 2015
Order N°	c_15_0067	Instrument serial number	WS1501
Customer	Universidad Nacional Autónoma de México		
Address			

Calibration atmospheric conditions

Barometric Pressure (hPa)	1005
Sensor brand, model and s/n	Vaisala PTB110 - G030002
Air Temperature (°C)	24
Sensor brand, model and s/n	LSI Laster CMA375 - AG1310501

Model and Serial number	Target Gas	Full scale	Sample gas		Expected reading (ppm)	Actual Reading (ppm)*
			Cylinder Code	Composition		
LI-200F LI-R20 s/n 004-2258	CO ₂	25K	W_GAS_43_S	1% CH ₄ , 2% CO ₂ , balance N ₂	15,700	15,723
			W_GAS_45_S	100% N ₂	0	1

* Actual reading of 10 values recorded at 1 Hz

Notes

The instrument is in conformity with the original certificates of the manufacturing company, and has been tested with positive results.

West Systems srl

David Caprinanza

West Systems S.r.l.

Sede Legale: Via Amministrativa, Strada 12, 38010 Luserne (Tn) - Tel: +39 0461 855371 - fax: +39 0461 855374

Sede Operativa: Via Don Maurizio, 25 - Zona Industriale La Biemsa - 36015 Bressanone (Tn) - Tel: +39 0471 811111 - fax: +39 0471 811111

C.F. e P.I. 01071000450 - Registro Imposte di Padova, n. 0121980151 - Capitale sociale: € 2.000.000,00

www.west-systems.it

e-mail: info@west-systems.com

ANEXO 2. Valores del estadístico Sichel (t_s) tomada de Sichel (1996)

$\pi \backslash \rho$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40
0.01	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.02	1.014	1.019	1.024	1.029	1.034	1.039	1.044	1.049	1.054	1.059	1.064	1.069	1.074	1.079	1.084	1.089	1.094	1.099
0.03	1.028	1.033	1.038	1.043	1.048	1.053	1.058	1.063	1.068	1.073	1.078	1.083	1.088	1.093	1.098	1.103	1.108	1.113
0.04	1.042	1.047	1.052	1.057	1.062	1.067	1.072	1.077	1.082	1.087	1.092	1.097	1.102	1.107	1.112	1.117	1.122	1.127
0.05	1.056	1.061	1.066	1.071	1.076	1.081	1.086	1.091	1.096	1.101	1.106	1.111	1.116	1.121	1.126	1.131	1.136	1.141
0.06	1.070	1.075	1.080	1.085	1.090	1.095	1.100	1.105	1.110	1.115	1.120	1.125	1.130	1.135	1.140	1.145	1.150	1.155
0.07	1.084	1.089	1.094	1.099	1.104	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.134	1.139	1.144	1.149	1.154	1.159	1.164	1.169
0.08	1.098	1.103	1.108	1.113	1.118	1.123	1.128	1.133	1.138	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.168	1.173	1.178	1.183
0.09	1.112	1.117	1.122	1.127	1.132	1.137	1.142	1.147	1.152	1.157	1.162	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192	1.197
0.10	1.126	1.131	1.136	1.141	1.146	1.151	1.156	1.161	1.166	1.171	1.176	1.181	1.186	1.191	1.196	1.201	1.206	1.211
0.12	1.154	1.159	1.164	1.169	1.174	1.179	1.184	1.189	1.194	1.199	1.204	1.209	1.214	1.219	1.224	1.229	1.234	1.239
0.14	1.182	1.187	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267
0.16	1.210	1.215	1.220	1.225	1.230	1.235	1.240	1.245	1.250	1.255	1.260	1.265	1.270	1.275	1.280	1.285	1.290	1.295
0.18	1.238	1.243	1.248	1.253	1.258	1.263	1.268	1.273	1.278	1.283	1.288	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.323
0.20	1.266	1.271	1.276	1.281	1.286	1.291	1.296	1.301	1.306	1.311	1.316	1.321	1.326	1.331	1.336	1.341	1.346	1.351
0.22	1.294	1.299	1.304	1.309	1.314	1.319	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	1.349	1.354	1.359	1.364	1.369	1.374	1.379
0.24	1.322	1.327	1.332	1.337	1.342	1.347	1.352	1.357	1.362	1.367	1.372	1.377	1.382	1.387	1.392	1.397	1.402	1.407
0.26	1.350	1.355	1.360	1.365	1.370	1.375	1.380	1.385	1.390	1.395	1.400	1.405	1.410	1.415	1.420	1.425	1.430	1.435
0.28	1.378	1.383	1.388	1.393	1.398	1.403	1.408	1.413	1.418	1.423	1.428	1.433	1.438	1.443	1.448	1.453	1.458	1.463
0.30	1.406	1.411	1.416	1.421	1.426	1.431	1.436	1.441	1.446	1.451	1.456	1.461	1.466	1.471	1.476	1.481	1.486	1.491
0.32	1.434	1.439	1.444	1.449	1.454	1.459	1.464	1.469	1.474	1.479	1.484	1.489	1.494	1.499	1.504	1.509	1.514	1.519
0.34	1.462	1.467	1.472	1.477	1.482	1.487	1.492	1.497	1.502	1.507	1.512	1.517	1.522	1.527	1.532	1.537	1.542	1.547
0.36	1.490	1.495	1.500	1.505	1.510	1.515	1.520	1.525	1.530	1.535	1.540	1.545	1.550	1.555	1.560	1.565	1.570	1.575
0.38	1.518	1.523	1.528	1.533	1.538	1.543	1.548	1.553	1.558	1.563	1.568	1.573	1.578	1.583	1.588	1.593	1.598	1.603
0.40	1.546	1.551	1.556	1.561	1.566	1.571	1.576	1.581	1.586	1.591	1.596	1.601	1.606	1.611	1.616	1.621	1.626	1.631
0.42	1.574	1.579	1.584	1.589	1.594	1.599	1.604	1.609	1.614	1.619	1.624	1.629	1.634	1.639	1.644	1.649	1.654	1.659
0.44	1.602	1.607	1.612	1.617	1.622	1.627	1.632	1.637	1.642	1.647	1.652	1.657	1.662	1.667	1.672	1.677	1.682	1.687
0.46	1.630	1.635	1.640	1.645	1.650	1.655	1.660	1.665	1.670	1.675	1.680	1.685	1.690	1.695	1.700	1.705	1.710	1.715
0.48	1.658	1.663	1.668	1.673	1.678	1.683	1.688	1.693	1.698	1.703	1.708	1.713	1.718	1.723	1.728	1.733	1.738	1.743
0.50	1.686	1.691	1.696	1.701	1.706	1.711	1.716	1.721	1.726	1.731	1.736	1.741	1.746	1.751	1.756	1.761	1.766	1.771
0.52	1.714	1.719	1.724	1.729	1.734	1.739	1.744	1.749	1.754	1.759	1.764	1.769	1.774	1.779	1.784	1.789	1.794	1.799
0.54	1.742	1.747	1.752	1.757	1.762	1.767	1.772	1.777	1.782	1.787	1.792	1.797	1.802	1.807	1.812	1.817	1.822	1.827
0.56	1.770	1.775	1.780	1.785	1.790	1.795	1.800	1.805	1.810	1.815	1.820	1.825	1.830	1.835	1.840	1.845	1.850	1.855
0.58	1.798	1.803	1.808	1.813	1.818	1.823	1.828	1.833	1.838	1.843	1.848	1.853	1.858	1.863	1.868	1.873	1.878	1.883
0.60	1.826	1.831	1.836	1.841	1.846	1.851	1.856	1.861	1.866	1.871	1.876	1.881	1.886	1.891	1.896	1.901	1.906	1.911
0.62	1.854	1.859	1.864	1.869	1.874	1.879	1.884	1.889	1.894	1.899	1.904	1.909	1.914	1.919	1.924	1.929	1.934	1.939
0.64	1.882	1.887	1.892	1.897	1.902	1.907	1.912	1.917	1.922	1.927	1.932	1.937	1.942	1.947	1.952	1.957	1.962	1.967
0.66	1.910	1.915	1.920	1.925	1.930	1.935	1.940	1.945	1.950	1.955	1.960	1.965	1.970	1.975	1.980	1.985	1.990	1.995
0.68	1.938	1.943	1.948	1.953	1.958	1.963	1.968	1.973	1.978	1.983	1.988	1.993	1.998	2.003	2.008	2.013	2.018	2.023
0.70	1.966	1.971	1.976	1.981	1.986	1.991	1.996	2.001	2.006	2.011	2.016	2.021	2.026	2.031	2.036	2.041	2.046	2.051
0.72	1.994	1.999	2.004	2.009	2.014	2.019	2.024	2.029	2.034	2.039	2.044	2.049	2.054	2.059	2.064	2.069	2.074	2.079
0.74	2.022	2.027	2.032	2.037	2.042	2.047	2.052	2.057	2.062	2.067	2.072	2.077	2.082	2.087	2.092	2.097	2.102	2.107
0.76	2.050	2.055	2.060	2.065	2.070	2.075	2.080	2.085	2.090	2.095	2.100	2.105	2.110	2.115	2.120	2.125	2.130	2.135
0.78	2.078	2.083	2.088	2.093	2.098	2.103	2.108	2.113	2.118	2.123	2.128	2.133	2.138	2.143	2.148	2.153	2.158	2.163
0.80	2.106	2.111	2.116	2.121	2.126	2.131	2.136	2.141	2.146	2.151	2.156	2.161	2.166	2.171	2.176	2.181	2.186	2.191
0.82	2.134	2.139	2.144	2.149	2.154	2.159	2.164	2.169	2.174	2.179	2.184	2.189	2.194	2.199	2.204	2.209	2.214	2.219
0.84	2.162	2.167	2.172	2.177	2.182	2.187	2.192	2.197	2.202	2.207	2.212	2.217	2.222	2.227	2.232	2.237	2.242	2.247
0.86	2.190	2.195	2.200	2.205	2.210	2.215	2.220	2.225	2.230	2.235	2.240	2.245	2.250	2.255	2.260	2.265	2.270	2.275
0.88	2.218	2.223	2.228	2.233	2.238	2.243	2.248	2.253	2.258	2.263	2.268	2.273	2.278	2.283	2.288	2.293	2.298	2.303
0.90	2.246	2.251	2.256	2.261	2.266	2.271	2.276	2.281	2.286	2.291	2.296	2.301	2.306	2.311	2.316	2.321	2.326	2.331
0.92	2.274	2.279	2.284	2.289	2.294	2.299	2.304	2.309	2.314	2.319	2.324	2.329	2.334	2.339	2.344	2.349	2.354	2.359
0.94	2.302	2.307	2.312	2.317	2.322	2.327	2.332	2.337	2.342	2.347	2.352	2.357	2.362	2.367	2.372	2.377	2.382	2.387
0.96	2.330	2.335	2.340	2.345	2.350	2.355	2.360	2.365	2.370	2.375	2.380	2.385	2.390	2.395	2.400	2.405	2.410	2.415
0.98	2.358	2.363	2.368	2.373	2.378	2.383	2.388	2.393	2.398	2.403	2.408	2.413	2.418	2.423	2.428	2.433	2.438	2.443
1.00	2.386	2.391	2.396	2.401	2.406	2.411	2.416	2.421	2.426	2.431	2.436	2.441	2.446	2.451	2.456	2.461	2.466	2.471

ANEXO 2. Continuación

n \ β^2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	50	100	1000
4.0	3.762	4.252	4.607	4.880	5.099	5.279	5.431	5.562	5.675	5.862	6.011	6.132	6.234	6.319	6.879		
4.1	3.853	4.373	4.751	5.042	5.277	5.471	5.634	5.775	5.897	6.099	6.260	6.392	6.502	6.596			
4.2	3.946	4.496	4.898	5.209	5.460	5.668	5.844	5.995	6.127	6.345	6.519	6.662	6.781	6.883			
4.3	4.040	4.622	5.049	5.380	5.649	5.872	6.060	6.223	6.364	6.599	6.788	6.942	7.072	7.182			
4.4	4.135	4.750	5.203	5.556	5.843	6.081	6.283	6.458	6.610	6.863	7.066	7.233	7.373	7.493			
4.5	4.231	4.881	5.361	5.736	6.042	6.297	6.513	6.700	6.863	7.136	7.355	7.536	7.687	7.816			
4.6	4.328	5.014	5.522	5.921	6.247	6.519	6.750	6.950	7.126	7.419	7.655	7.849	8.013	8.152			
4.7	4.427	5.149	5.687	6.111	6.457	6.747	6.995	7.209	7.397	7.711	7.965	8.175	8.351	8.502			
4.8	4.527	5.288	5.856	6.305	6.674	6.983	7.247	7.476	7.677	8.014	8.287	8.512	8.703	8.865			
4.9	4.629	5.428	6.029	6.505	6.896	7.225	7.507	7.751	7.966	8.328	8.620	8.863	9.068	9.243			
5.0	4.732	5.572	6.205	6.709	7.124	7.474	7.774	8.036	8.265	8.652	8.966	9.227	9.447	9.636			
5.1	4.836	5.718	6.386	6.919	7.359	7.731	8.050	8.329	8.574	8.988	9.324	9.604	9.841				
5.2	4.941	5.866	6.570	7.134	7.600	7.995	8.335	8.631	8.893	9.335	9.696	9.996	10.25				
5.3	5.048	6.018	6.759	7.354	7.847	8.266	8.628	8.944	9.222	9.695	10.08	10.40					
5.4	5.156	6.172	6.951	7.579	8.102	8.546	8.930	9.265	9.563	10.07	10.48	10.82					
5.5	5.266	6.329	7.148	7.811	8.363	8.833	9.240	9.598	9.914	10.45	10.89						
5.6	5.376	6.489	7.350	8.048	8.631	9.129	9.561	9.940	10.28	10.85	11.32						
5.7	5.489	6.652	7.555	8.290	8.906	9.433	9.890	10.29	10.65	11.26							
5.8	5.603	6.818	7.766	8.539	9.188	9.745	10.23	10.66	11.04	11.68							
5.9	5.718	6.987	7.980	8.794	9.478	10.07	10.58	11.03	11.44								
6.0	5.834	7.159	8.200	9.054	9.776	10.40	10.94	11.42	11.85								

ANEXO 3. Estadísticos para el cálculo del intervalo de confianza inferior al 90 % de Confianza (Sichel, 1996)

β^2	$n = 5$	$n = 10$	$n = 15$	$n = 20$	$n = 50$	$n = 100$	$n = 1000$
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.02	0.8978	0.9333	0.9458	0.9540	0.9697	0.9782	0.9927
0.04	0.8589	0.9071	0.9246	0.9344	0.9573	0.9692	0.9895
0.06	0.8302	0.8874	0.9079	0.9200	0.9478	0.9622	0.9872
0.08	0.8070	0.8708	0.8943	0.9077	0.9398	0.9564	0.9852
0.10	0.7870	0.8563	0.8821	0.8972	0.9328	0.9512	0.9833
0.12	0.7693	0.8439	0.8716	0.8878	0.9264	0.9464	0.9817
0.14	0.7535	0.8323	0.8617	0.8790	0.9204	0.9420	0.9801
0.16	0.7389	0.8216	0.8527	0.8709	0.9149	0.9380	0.9787
0.18	0.7255	0.8116	0.8442	0.8632	0.9097	0.9341	0.9773
0.20	0.7129	0.8023	0.8360	0.8558	0.9048	0.9304	0.9760
0.30	0.6605	0.7618	0.8008	0.8243	0.8828	0.9139	0.9701
0.40	0.6187	0.7284	0.7717	0.7981	0.8639	0.8996	0.9648
0.50	0.5838	0.6995	0.7462	0.7744	0.8470	0.8867	0.9600
0.60	0.5538	0.6739	0.7270	0.7534	0.8313	0.8741	0.9554
0.70	0.5277	0.6508	0.7020	0.7338	0.8168	0.8632	0.9511
0.80	0.5044	0.6297	0.6825	0.7156	0.8030	0.8525	0.9470
0.90	0.4836	0.6103	0.6646	0.6987	0.7899	0.8421	0.9429
1.00	0.4650	0.5923	0.6476	0.6826	0.7774	0.8322	0.9389
1.10	0.4481	0.5756	0.6317	0.6674	0.7654	0.8226	0.9351
1.20	0.4328	0.5599	0.6165	0.6530	0.7538	0.8133	0.9313
1.30	0.4189	0.5452	0.6023	0.6393	0.7426	0.8042	0.9276
1.40	0.4062	0.5315	0.5888	0.6262	0.7318	0.7954	0.9240
1.50	0.3946	0.5186	0.5760	0.6137	0.7214	0.7868	0.9203
1.60	0.3840	0.5065	0.5637	0.6018	0.7112	0.7784	0.9168
1.70	0.3743	0.4950	0.5521	0.5904	0.7014	0.7702	0.9133
1.80	0.3655	0.4842	0.5410	0.5794	0.6918	0.7622	0.9098
1.90	0.3574	0.4740	0.5305	0.5688	0.6825	0.7544	0.9064
2.00	0.3501	0.4644	0.5203	0.5587	0.6734	0.7466	0.9030
2.10	0.3433	0.4552	0.5106	0.5489	0.6646	0.7391	0.8996
2.20	0.3372	0.4466	0.5014	0.5395	0.6560	0.7317	0.8962
2.30	0.3316	0.4385	0.4925	0.5304	0.6476	0.7245	0.8929
2.40	0.3266	0.4308	0.4840	0.5217	0.6394	0.7173	0.8896

ANEXO 4. Estadísticos para el cálculo del intervalo de confianza superior al 90 % de Confianza (Sichel, 1996)

β^2	$n = 5$	$n = 10$	$n = 15$	$n = 20$	$n = 50$	$n = 100$	$n = 1000$
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.000	1.000	1.000
0.02	1.2411	1.1170	1.0845	1.0671	1.038	1.026	1.007
0.04	1.3623	1.1712	1.1221	1.0990	1.055	1.037	1.011
0.06	1.4664	1.2156	1.1538	1.1239	1.069	1.046	1.013
0.08	1.5613	1.2559	1.1812	1.1462	1.080	1.053	1.015
0.10	1.6518	1.2934	1.2070	1.1661	1.091	1.060	1.017
0.12	1.7405	1.3272	1.2301	1.1845	1.100	1.066	1.019
0.14	1.8270	1.3606	1.2527	1.2023	1.109	1.072	1.020
0.16	1.9136	1.3930	1.2741	1.2191	1.118	1.078	1.022
0.18	1.9993	1.4247	1.2951	1.2356	1.126	1.084	1.023
0.20	2.0867	1.4554	1.3160	1.2523	1.135	1.089	1.025
0.30	2.5320	1.6065	1.4147	1.3279	1.172	1.113	1.031
0.40	3.0191	1.7564	1.5090	1.3988	1.207	1.135	1.037
0.50	3.5628	1.9099	1.6031	1.4705	1.240	1.156	1.042
0.60	4.1756	2.0696	1.6824	1.5412	1.273	1.175	1.047
0.70	4.8696	2.2374	1.7984	1.6137	1.306	1.196	1.052
0.80	5.6634	2.4149	1.9007	1.6877	1.338	1.215	1.057
0.90	6.5703	2.6037	2.0061	1.7635	1.371	1.235	1.062
1.00	7.6047	2.8050	2.1169	1.8424	1.404	1.254	1.067
1.10	8.7946	3.0194	2.2328	1.9239	1.437	1.274	1.071
1.20	10.1548	3.2501	2.3551	2.0083	1.471	1.294	1.076
1.30	11.7177	3.4968	2.4827	2.0958	1.506	1.314	1.080
1.40	13.5127	3.7610	2.6168	2.1874	1.540	1.334	1.085
1.50	15.5693	4.0454	2.7581	2.2819	1.576	1.354	1.089
1.60	17.9276	4.3507	2.9069	2.3804	1.613	1.374	1.094
1.70	20.6390	4.6799	3.0640	2.4838	1.650	1.395	1.098
1.80	23.7488	5.0341	3.2289	2.5916	1.688	1.416	1.103
1.90	27.3182	5.4141	3.4032	2.7042	1.728	1.438	1.107
2.00	31.3985	5.8248	3.5883	2.8217	1.767	1.459	1.112
2.10	36.0792	6.2676	3.7832	2.9454	1.808	1.481	1.116
2.20	41.4437	6.7454	3.9895	3.0739	1.850	1.504	1.121
2.30	47.5859	7.2596	4.2078	3.2091	1.893	1.526	1.125
2.40	54.6113	7.8149	4.4382	3.3506	1.937	1.549	1.130