



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Mediciones Transitorias Eddy Covariance
del Flujo de CO₂ Registradas en la Zona
Geotérmica de Acoculco, Puebla: Análisis
Estadístico Descriptivo**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Sadoc Abisai García Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez

Temixco, Mor., a 12 de junio de 2020





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

OF/IER/LIER/040/2020

ASUNTO: Notificación de jurado y fecha para examen profesional mediante aula virtual.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informo que el día viernes 12 de junio de 2020, a las 13:00 hrs., mediante Aula Virtual habilitada por la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación de la UNAM, el **C. SADO ABISAI GARCÍA HERNÁNDEZ**, con número de cuenta 414002524 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Mediciones Transitorias Eddy Covariance del Flujo de CO₂ Registradas en la Zona Geotérmica de Acoculco, Puebla: Análisis Estadístico Descriptivo”

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE:	DR. ENRIQUE PORTUGAL MARÍN
VOCAL:	MTRA. MIRNA GUEVARA GARCÍA
SECRETARIO:	DR. EDGAR ROLANDO SANTOYO GUTIÉRREZ
SUPLENTE:	DR. JORGE ALBERTO ANDAVERDE ARREDONDO
SUPLENTE:	DRA. LORENA DÍAZ GONZÁLEZ

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 4 de junio de 2020



Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp.

*Para mi “Abuelita de Batman”, que aunque ya no estás
físicamente conmigo, siempre te llevo en el corazón.
Aquí tienes mi tesis, Mamá.*

Reconocimientos

Se agradece al CeMIE-Geo (Proyecto 207032 CONACyT/SENER) el financiamiento otorgado para la realización del presente trabajo de tesis, a través del proyecto P09 "Desarrollo y aplicación de nuevos métodos avanzados en geoquímica de fluidos y alteración hidrotermal para la exploración de recursos geotérmicos".

Ésto es el resultado de años de trabajo, de muchos desvelos y desalientos. Una meta que no hubiese podido terminar de no ser por mi familia, que nunca me dejó de alentar; de mis padres, que me mostraron que el límite era yo mismo; de Marina, quien no ha dejado de ser mi sostén y mi pareja de vida; de Emmanuel, mi gran amigo, quien me acompaña durante los últimos años.

El reconocimiento también es para mi asesor, el Dr. Santoyo, quien a pesar de todos los contratiempos no dejó de confiar en mí, brindándome todo su apoyo hasta el final.

También doy agradecimientos especiales al Dr. Gamboa, que me mostró el valor de la amistad y del trabajo bien hecho; al Dr. Robles, por sus sabios consejos, no solo para el deber, si no también, para la vida; a Maribel Fernández, gracias por todo tu tiempo y por las atenciones, siempre vamos a ser tus hijos adoptados.

En verdad, gracias.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Sadoc Abisai García Hernández. Temixco, Morelos, Junio 2020.

Resumen

Las altas temperaturas asociadas con los sistemas geotérmicos “ocultos” no siempre se evidencian a través de las manifestaciones hidrotermales tradicionales. Existen otro tipo de anomalías geoquímicas registradas para la prospección efectiva de estos sistemas. La acumulación y emisión de gases es una huella geoquímica importante que debe estudiarse para evaluar la factibilidad de realizar estudios de exploración y explotación de estos sistemas “ocultos” anormales. Uno de los gases principales que dominan en la composición química de los fluidos de estos sistemas geotérmicos es el dióxido de carbono (CO_2). La producción de este gas se deriva de numerosos procesos complejos de interacción roca-fluido, los cuales hacen que su composición varíe entre el 80 y 90 % en peso de la composición química de la fase gaseosa presente en los fluidos. Teniendo en cuenta sus principales características fisicoquímicas (p. ej., solubilidad y propiedades termodinámicas y de transporte), el seguimiento geoquímico de su producción en el subsuelo es una de las herramientas geoquímicas más efectivas para la prospección de tipo de sistemas geotérmicos. Entre estas herramientas de medición destaca la técnica micrometeorológica de “Eddy Covariance”, la cual se basa en un sistema autónomo que permite medir los flujos de CO_2 (de las emisiones naturales existente en los sitios) conjuntamente con los flujos turbulentos de viento, las propiedades del suelo y otras variables meteorológicas para cuantificar el intercambio efectivo de masa, energía y momento que existe en los procesos de emisión de gases entre la superficie del suelo y la atmósfera. Este tipo de mediciones ofrecen la oportunidad de no alterar la superficie del suelo, además de cubrir grandes extensiones de terreno de hasta km^2 .

Las altas concentraciones de CO_2 que se emiten y se miden permiten relacionar su producción anómala con la dimensión o extensión de las fuentes primarias de calor de estos sistemas geotérmicos, también conocidas como cámaras magmáticas de alta temperatura. Sin embargo, aunque el CO_2 tiene un potencial en la exploración geoquímica, es dependiente de las condiciones meteorológicas. A través de correlaciones entre las diversas variables meteorológicas, se estudia

el comportamiento de los flujos de CO_2 para encontrar patrones y explicaciones físicas atribuibles a su aumento o disminución, así como para determinar cuales son las variables meteorológicas que afectan en mayor medida su comportamiento.

Dentro de este marco general de investigación, se reportan los resultados de mediciones transitorias Eddy Covariance del flujo de CO_2 obtenidos en una campaña de medición de 4 meses (Marzo-Abril-Mayo-Junio) efectuada durante la temporada de secas en la Zona Geotérmica de Acoculco, Puebla. Como parte de esta investigación, se presenta un análisis estadístico descriptivo de los patrones de emisión existentes en esta importante zona promisoría geotérmica de México que permiten describir los procesos de emisión y captura de CO_2 presentes en este ecosistema. Detalles del estudio son ampliamente discutidos en este trabajo de tesis de licenciatura.

Índice general

Índice de figuras	XIII
1. Generalidades de la Energía Geotérmica	1
1.1. Estructura de la tierra	1
1.1.1. La corteza:	1
1.1.2. El manto:	1
1.1.3. El núcleo:	2
1.2. Tectónica de placas	2
1.2.1. Cordilleras de divergencia	4
1.2.2. Zonas de convergencia	6
1.2.3. Zonas de deslizamiento	6
1.3. ¿Qué es la energía geotérmica?	7
1.4. La energía geotérmica en el mundo	8
1.5. La energía geotérmica en México	10
1.6. Futuro de la energía geotérmica	11
2. Fundamentos básicos de la energía geotérmica	13
2.1. Sistemas geotérmicos	13
2.1.1. Sistemas de roca seca caliente	13
2.1.2. Sistemas hidrotermales	16
2.1.2.1. Sistemas de agua caliente	16
2.1.2.2. Sistemas de vapor húmedo	17
2.1.2.3. Sistemas de vapor dominante	17
2.1.3. Sistemas magmáticos	17
2.2. Manifestaciones geotérmicas	19
2.2.1. Manantial hidrotermal	19
2.2.2. Fumarolas	20
2.2.3. Géisers	20
2.2.4. Suelos vaporizantes	22
2.2.5. Volcanes	22

3. Exploración geotérmica	25
3.1. Técnicas geológicas	25
3.1.1. Mineralogía de alteración hidrotermal	28
3.2. Técnicas geoquímicas	29
3.2.1. Composición química e isotópica de fluidos	30
3.2.2. Clasificación de fluidos	31
3.2.2.1. Aguas de cloruro de sodio	31
3.2.2.2. Aguas ácidas sulfatadas / cloruradas	31
3.2.2.3. Aguas ácidas sulfatadas	32
3.2.2.4. Aguas bicarbonatadas	32
3.2.3. Geotermometría	32
3.2.3.1. Gases	33
3.2.3.2. Isótopos	34
3.2.3.3. Solutos	35
3.2.3.3.1. Sílice:	35
3.2.3.3.2. Cationes:	36
3.2.4. Cámaras de acumulación: $CO_2, CH_4, ^3He$	37
3.2.5. Eddy Covariance	41
3.3. Técnicas geofísicas	42
3.3.1. Gravimetría	42
3.3.2. Sismología	43
3.3.2.1. Ondas sísmicas	43
3.3.2.2. Sísmica de reflexión	47
3.3.2.3. Microsismicidad natural	49
3.3.2.3.1. Atenuación:	51
3.3.3. Resistividad	52
3.3.3.1. Método magnéticos	52
3.3.3.2. Eléctricos	54
4. Fundamentos básicos de estadística descriptiva	57
4.1. Medidas de posición:	57
4.1.1. Media aritmética:	57
4.1.2. Media Winsorizada:	58
4.1.3. Media geométrica:	59
4.1.4. Media armónica :	59
4.1.5. Mediana	59
4.2. Medidas de dispersión:	60
4.2.1. Varianza:	60
4.2.2. Desviación estándar	60
4.3. Diagrama de caja:	61
4.4. Errores:	62

4.4.1.	Tolerancia:	62
4.4.2.	Clasificación de errores:	62
4.4.2.1.	Error humano (blunders):	62
4.4.2.2.	Error sistemático (Bias):	63
4.4.2.3.	Error aleatorio:	63
4.4.3.	Exactitud y precisión:	63
4.4.4.	Incertidumbre:	64
4.4.4.1.	Propagación de errores:	65
4.5.	Análisis estadístico	66
4.5.1.	Intervalos de confianza	66
4.5.1.1.	Nivel de confianza	67
4.5.1.2.	Nivel significativo	67
4.5.1.3.	Grados de libertad:	67
4.6.	Pruebas de significancia:	68
4.6.1.	Hipótesis:	68
4.6.2.	Prueba F	68
4.6.3.	Prueba t de Student	69
4.7.	Regresiones lineales	70
5.	Metodología de trabajo	75
5.1.	Zona de estudio	75
5.2.	Principios de operación de la EMEC	79
5.3.	Instrumentos de medición	82
5.3.1.	LI-7500A - Analizador de CO_2/H_2O de Canal Abierto (16)	82
5.3.2.	Anemómetro sónico	84
5.3.3.	Placas de flujo térmico del suelo - HukseFlux HFP01	84
5.3.4.	LI-200R Piranómetro	87
5.3.5.	Pluviómetro de cubeta basculante TR-525M de Texas Elec- tronics	88
5.3.6.	Sensor humedad y temperatura HMP155 - Vaisala	89
5.3.7.	SmartFlux [®]	90
5.4.	Configuración y posicionamiento de la EMEC	90
5.5.	Datos de entrada	91
5.6.	Análisis de datos	92
6.	Resultados	93
6.1.	Eddy Covariance: Flujos de CO_2	93
6.2.	Flujos de CO_2 - “Junio - Septiembre 2016”	95
7.	Conclusiones	109

ÍNDICE GENERAL

A. Tabla de nomenclaturas	113
B. Matrices de correlación del periodo “Junio - Septiembre 2016” Base horaria	115
C. Tabla t de Student	121
D. Valor F de la distribución de Fisher	125
Bibliografía	135

Índice de figuras

1.1. Modelo de corte transversal que muestra la región interior terrestre (100).	2
1.2. Modelo teórico de separación de las placas tectónicas (59).	3
1.3. Las placas tectónicas y sus límites (100).	5
1.4. Distribución de los puntos calientes sobre las zonas de convergencia y divergencia (100).	6
1.5. Modelo de deslizamiento de placas (40).	7
1.6. Situación y prospectiva geotérmica (5)	9
1.7. Capacidad mundial instalada hasta 2015 (5)	10
2.1. Modelo conceptual de un sistema geotérmico (8)	14
2.2. Diagrama esquemático de un sistema geotérmico de roca seca caliente (113).	15
2.3. Sección transversal de modelos análogos mostrando relaciones entre la inyección de magma y la actividad entre el empuje sobre fallas (112)	18
2.4. Sinter en forma de cono en el sistema geotérmico de Yellowstone, E.U. (109)	21
2.5. Clasificación química de los volcanes según su roca lava (65)	23
3.1. Ejemplos de curvas de nivel (108).	26
3.2. Ejemplos de anomalías geográficas (62).	27
3.3. Sección esquemática de un sistema de aguas termales hipotético (38).	30
3.4. Diagrama esquemático de la cámara de acumulación de piso LICOR LI-6200 system (136).	39
3.5. Correlación entre la presión barométrica y el flujo de CO_2 medido en la estación 14, Grotta dei Palizzi, Vulcano Island (19).	40
3.6. Mapa logarítmico del flujo de CO_2 del suelo, basado en mediciones realizadas con cámara de acumulación (puntos negros) (67).	42

ÍNDICE DE FIGURAS

3.7. Ejemplo de variación de densidades versus el rango de alteraciones hidrotermales (53).	43
3.8. Ejemplo de interpretación de anomalías de primer orden (53). . .	44
3.9. Ejemplo de interpretación de anomalías de segundo orden (53). . .	45
3.10. Modelo de una onda P viajando por un medio mediante compresión y dilatación. Las partículas se representan en cubos (14).	46
3.11. Modelo de una onda S viajando por un medio. Las partículas se representan en cubos (14)	47
3.12. Corte transversal SSW-NNE del campo Geotérmico de Larderello. El eje “Y” esta en unidades TWTs (Two ways travel seconds) (133)	48
3.13. Microsismos localizados cerca de Krisuvik. Los números denotan las prundidades del epicentro, (133).	50
3.14. Diagrama esquemático del equipamiento (74)	53
3.15. Ejemplo de corte transversal de la resistividad eléctrica (89). . . .	55
4.1. Ejemplo de diagrama de caja (56).	61
5.1. Ubicación de la EMEC (45).	76
5.2. Columna litológica del pozo EAC-1 (101).	78
5.3. Solubilidad del CO_2 en H_2O (140).	79
5.4. Transporte de partículas ideal del método Eddy Covariance (16). . .	80
5.5. Sensor LI-7500A, estructura interna (16).	83
5.6. Anemómetro sónico, ejemplo de transductores A y B, y distancia (D) (16).	85
5.7. Placas de flujo térmico del suelo HukseFlux HFP01 (114).	86
5.8. Piranómetro LI-200R (68).	87
5.9. Pluviómetro de cubeta basculante TR-525M de Texas Electronics (70).	88
5.10. Sensor humedad y temperatura HMP155 - Vaisala (127).	89
5.11. Sistema Smartflux ® (69).	90
6.1. Comparación entre el flujo de CO_2 y la temperatura del aire, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	97
6.2. Comparación entre el flujo de CO_2 y la humedad relativa, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	98
6.3. Comparación entre el flujo de CO_2 y la presión atmosférica, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	99

6.4. Comparación entre el flujo de CO_2 y la velocidad del viento, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	100
6.5. Comparación entre el flujo de CO_2 y la precipitación, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	101
6.6. Comparación entre el flujo de CO_2 y la dirección del viento, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	102
6.7. Comparación entre el flujo de CO_2 y la evapotranspiración, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	103
6.8. Comparación entre el flujo de CO_2 y el calor latente, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	104
6.9. Comparación entre el flujo de CO_2 y el calor sensible, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)	105
6.10. Correlación de flujo de CO_2 - Base de 24 horas - “Junio - Septiembre 2016”	106
6.11. Flujo de CO_2 del periodo “Junio - Septiembre” 2016, vs. flujo de CO_2 de Junio, Julio, Agosto y Septiembre; del sistema geotérmico de Acoculco, Puebla.	107
C.1. Tabla t-Student (31).	122
C.2. Tabla t-Student (continuación) (31).	123
D.1. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.9$ (55).	126
D.2. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.9$ (continuación) (55).	127
D.3. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.95$ (55).	128
D.4. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.95$ (continuación) (55).	129
D.5. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.975$ (55).	130
D.6. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.975$ (continuación) (55).	131
D.7. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.99$ (55).	132
D.8. Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.99$ (continuación) (55).	133

Capítulo 1

Generalidades de la Energía Geotérmica

1.1. Estructura de la tierra

La tierra está compuesta por diversas capas, la más superficial es:

1.1.1. La corteza:

que es la fracción de la masa continental y oceánica en su parte más somera, puede variar en espesor de entre 3 hasta 70 kilómetros, ya sea en las dorsales oceánicas o en la cordilleras terrestres, respectivamente, su composición principal son rocas ígneas y derivadas de estas (100).

1.1.2. El manto:

que se extiende hasta 2890 kilómetros desde los límites con la corteza y que se compone principalmente de rocas silíceas que fluyen lentamente (100); por último tenemos:

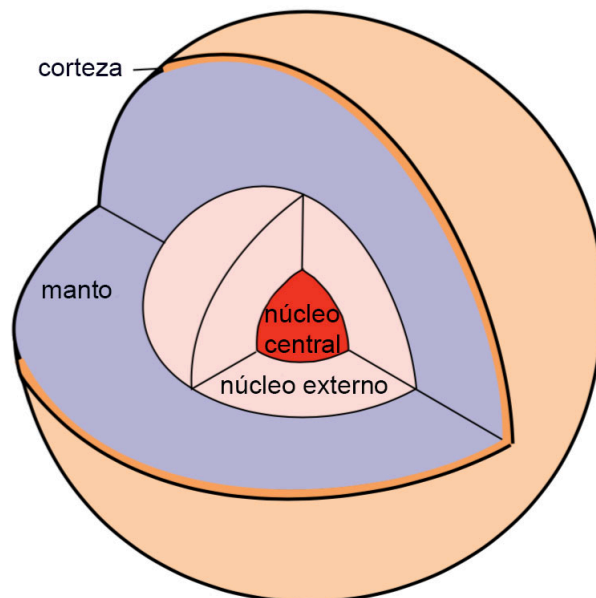


Figura 1.1: Modelo de corte transversal que muestra la región interior terrestre (100).

1.1.3. El núcleo:

integrado por dos conjuntos, una parte sólida (interna) de 1220 km de radio y una capa externa en estado semisólido de hasta 3400 km (40). La composición principal del núcleo es hierro y níquel (40) (100). Lo anterior se describe de manera esquemática en la figura 1.1.

1.2. Tectónica de placas

Alfred Wegner, construyó la teoría de la deriva continental, basándose en evidencia paleontológica, paleomagnética, orogénica entre otras (59). En la teoría se afirma que los continentes en la antigüedad eran parte de un solo súper continente llamado Pangea (100) y que, debido a movimientos de generación y destrucción brownianos de las placas tectónicas, se han deslizado hasta alcanzar la forma y posiciones que se tienen hoy en día (10). En la figura 1.2 se representa un modelo que relata el movimiento de la masa continental a través del tiempo.

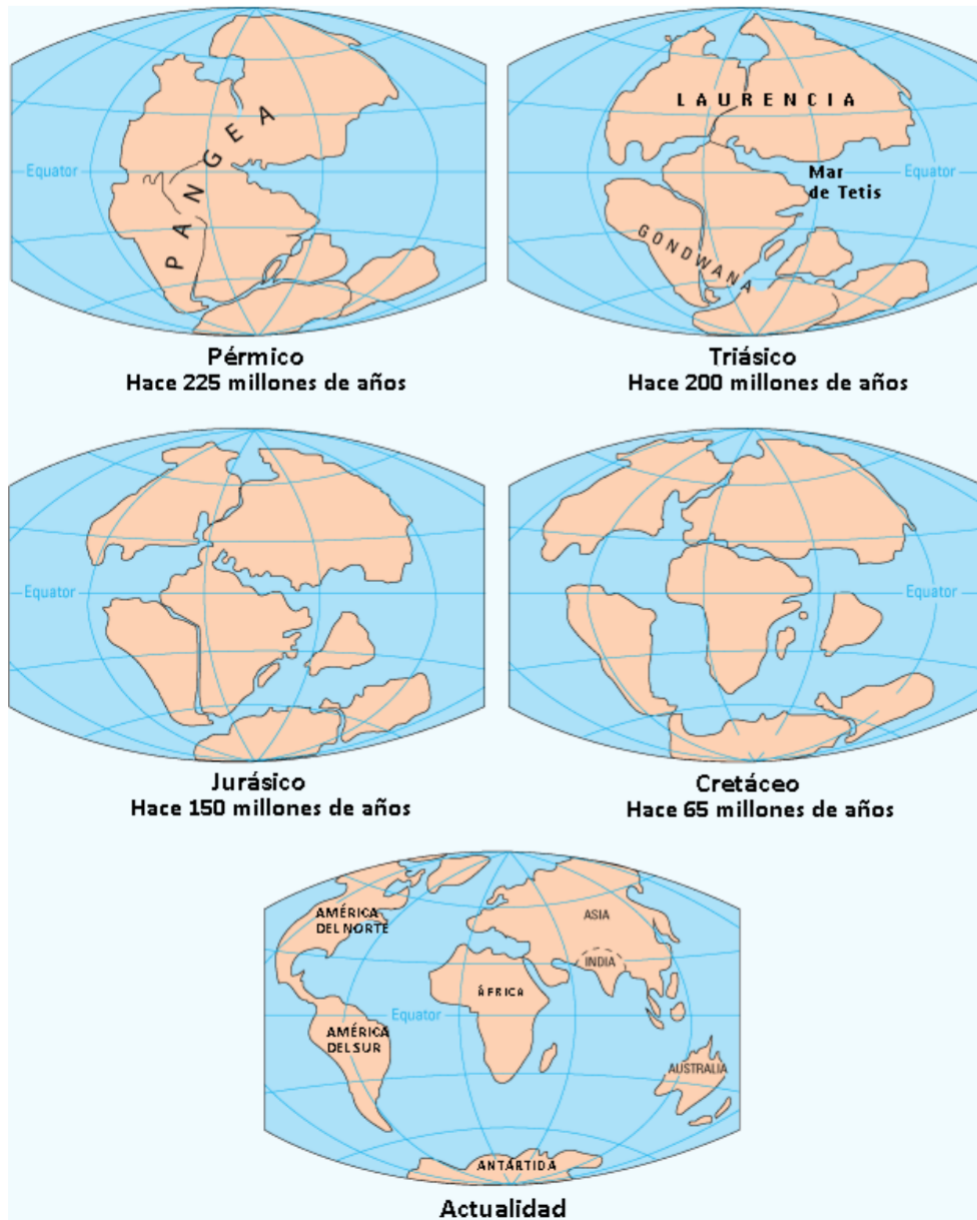


Figura 1.2: Modelo teórico de separación de las placas tectónicas (59).

1. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

La corteza está fragmentada en placas como se muestra en la figura 1.3. Los límites de estas placas son, en su mayoría, formaciones de cadenas montañosas submarinas llamadas cordilleras meso-oceánicas (40). Los movimientos que realizan estas placas son analizados a continuación.

En la figura 1.4, con líneas azules, se detallan los límites constructivos (divergencia); con rojo, los límites destructivos (convergencia); con líneas negras, los conservativos y con puntos rojos los puntos calientes. Los límites son entonces de igual manera zonas con alta sismicidad y volcánicamente activas (100).

Los puntos calientes no forman parte del movimiento de las placas tectónicas, sin embargo son importantes, ya que son ascensos de magma y liberaciones de altos flujos de calor procedentes del manto (10). Algunos de ellos no se encuentran dentro de las zonas de convergencia o divergencia tal como es el caso de Hawái.

En la figura 1.3 se muestra que los límites de las placas están contruidos en tres tipos, constructivos (azules), destructivos (rojos) y conservativos (negros). Los nombres abreviados: Na, Nazca; Co, Cocos; Ca, Caribe; Ph, Filipinas; A, Arabe; SAF, Falla de San Andrés. Las flechas indican la dirección relativa de movimiento respecto a la placa Antártica

1.2.1. Cordilleras de divergencia

En estas zonas se produce una separación donde se crea un vacío el cual es instantáneamente saturado por magma ascendente del manto (10). En los límites se crea, por lo tanto, nueva corteza. Un ejemplo es la dorsal meso-atlántica de divergencia, que separa a las placas de Eurasia con Norteamérica y la de África con Sudamérica.

Una de las pocas fallas terrestres que acotan los límites de placas tectónicas, es la Falla del Gran Rift Africano. Es una zona de divergencia y por consiguiente constructiva, que después de algunos miles de años, se separará por completo a la placa Africana y la de Somalia, espacio que será ocupado por un nuevo mar tal como se afirma en (10).

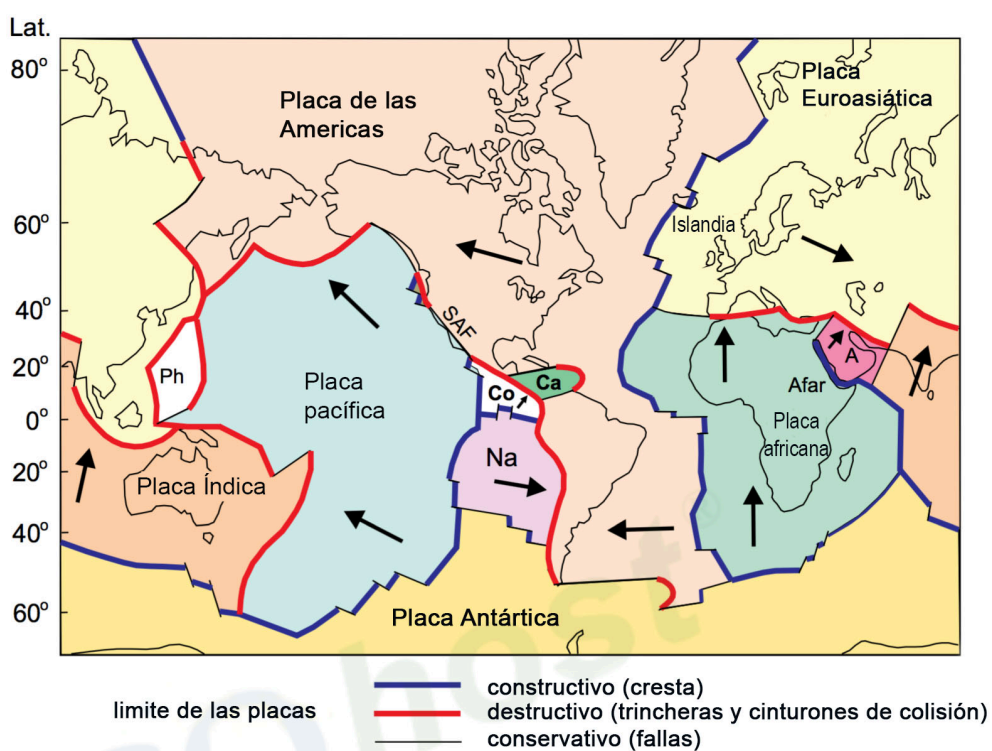


Figura 1.3: Las placas tectónicas y sus límites (100).

1. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

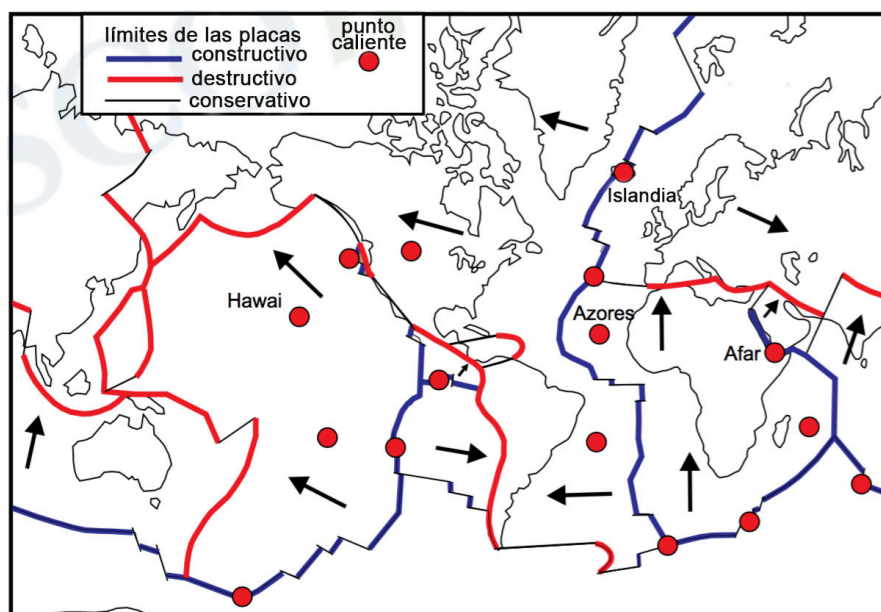


Figura 1.4: Distribución de los puntos calientes sobre las zonas de convergencia y divergencia (100).

1.2.2. Zonas de convergencia

Son zonas de colisión y destrucción de las placas tectónicas (10). En ellas existe subducción de una placa sobre otra que, en ocasiones, llega hasta los 700 kilómetros de profundidad en el punto donde la corteza se funde con el magma existente en el manto (10). Así mismo la subducción no sólo es destructiva, si no que también crea elevaciones montañosas sobre la corteza (100). En la figura 1.3 se puede observar en el Pacífico, contrario a lo que se contempla en la dorsal meso-atlántica, cerca de los límites con Indonesia el llamado cinturón de fuego, una zona de convergencia de placas tectónicas.

1.2.3. Zonas de deslizamiento

No son zonas de convergencia o divergencia, en estas zonas las placas se deslizan en direcciones contrarias, como se muestra en la figura 1.5. También llamadas fallas de transformación, debido a que los movimientos que realiza “transforman una trinchera en una dorsal o una dorsal en otra dorsal” (10). La falla de San

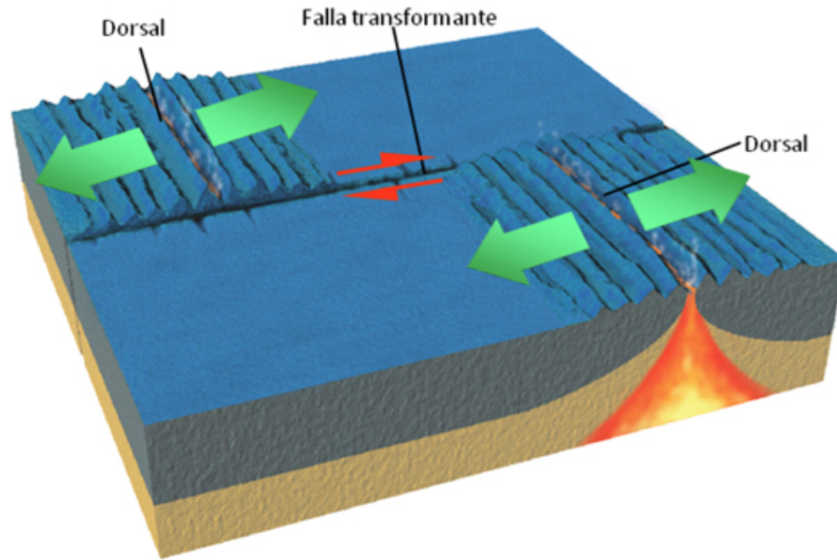


Figura 1.5: Modelo de deslizamiento de placas (40).

Andrés es un ejemplo de este tipo de fallas (40).

1.3. ¿Qué es la energía geotérmica?

Desde tiempos inmemorables, la humanidad es conocedora de la existencia de una poderosa fuente de calor resguardada por la litografía terrestre. “Pitágoras declaró que existe un gran fuego en el interior de la tierra y este se manifiesta en la superficie en forma de volcanes” (8), de igual manera, “En 1971 Boyle escribió sobre el calor [...] estableciendo que la temperatura incrementa con la profundidad” (8). Esta energía calorífica acumulada en el manto terrestre, es en esencia debida a la física de los procesos geológicos y decaimiento de isótopos radiactivos de larga vida, la cual es emitida al ambiente de forma imperceptible a los sentidos.

Sobre todo el manto terrestre existe un gradiente térmico que se intensifica conforme vamos hacia el centro de la tierra y es en promedio de unos 30 °C /Km de profundidad; el flujo de calor se mueve desde el núcleo hasta la corteza, primero por conducción a través de las rocas y después por convección, ayudándose de

fluidos como el agua contenida a nivel freático. Podemos acceder a estos “puntos calientes” mediante perforaciones para aprovechar esta energía ya sea en electricidad o en usos directos. Los “recursos geotérmicos son energía que puede ser extraída razonablemente a costos competitivos en comparación con otras formas de energía en algún futuro específico” (95).

1.4. La energía geotérmica en el mundo

La energía geotérmica es económicamente benéfica para el sector energético; puede ser una excelente base para lograr avances económicos nacionales, “disminuyendo la dependencia en combustibles fósiles” (75).

Los datos representativos de capacidades instaladas y prospectivas por países con mayor desarrollo en energía geotermal son referenciados en la figura 1.6 y 1.7, las cuales se muestran en el periodo 2010 - 2021.

“A pesar de que las gráficas describen un crecimiento exponencial” (12), el llegar a la expectativa mundialmente acordada, la cual es el promedio de la suma de las tecnologías en los países involucrados en tratados internacionales, la meta aún es lejana. Es necesario llevar los nuevos proyectos a realización y pasar mas allá del papel lo antes posible, esto no solo cumplirá las metas esperadas, sino también “lograr que una de las más importantes fuentes de energía renovable en el mercado sea la geotérmica” (12).

Los “recursos geotérmicos son energía que puede ser extraída razonablemente a costos competitivos en comparación con otras formas de energía en algún futuro específico” (141). Uno de los nichos mas populares y con mayor impacto en la utilización de energía geotérmica, son las bombas de calor. Esta ocupa el “79.9 % de la capacidad mundial instalada (50,258 MWt) y el 55.15 % de la generación neta geotérmica mundial (326,848 TJ/año)” (75), éste tipo de aprovechamiento no requiere altas temperaturas y sus instalaciones son utilizadas para fines más extensos que la producción de electricidad.

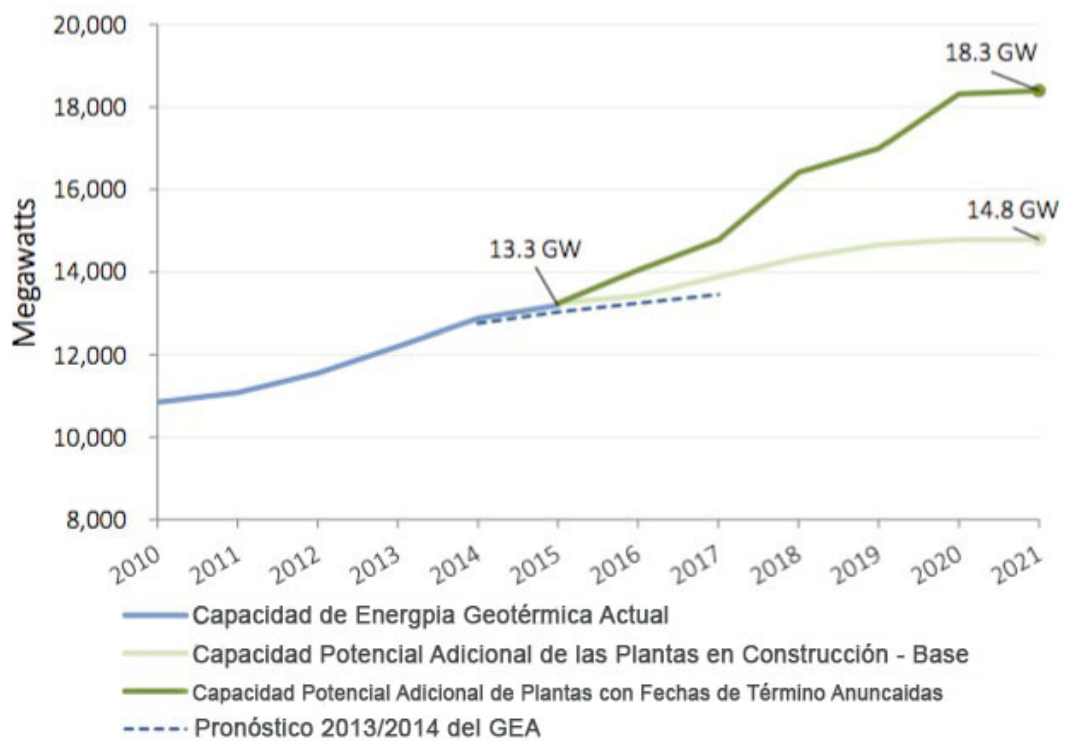


Figura 1.6: Situación y prospectiva geotérmica (5)

1. GENERALIDADES DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

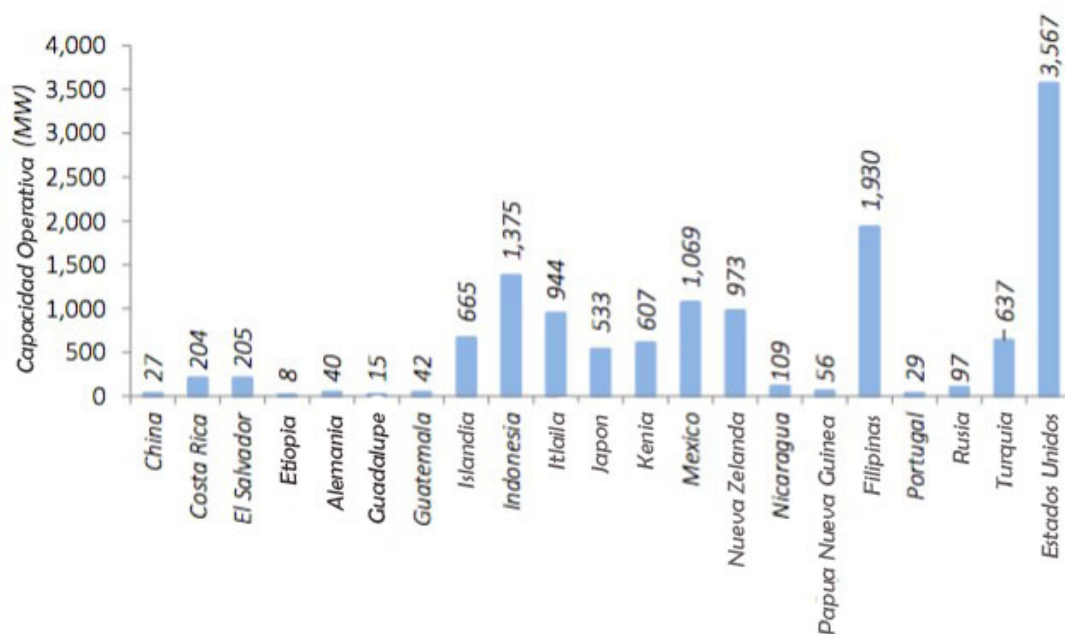


Figura 1.7: Capacidad mundial instalada hasta 2015 (5)

1.5. La energía geotérmica en México

La capacidad instalada es de 1018 MW de los cuales sólo se encuentran en funcionamiento 840 MW. México cuenta con cuatro campos geotérmicos en operación: Cerro Prieto (720 MW), Los Humeros (94 MW), Los Azufres (194 MW) y Tres Vírgenes (10 MW), todas operadas por Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se tienen en construcción dos más: Los Azufres III (50 MW) y Los Humeros III-A (27 MW).

Por lo tanto, la producción fue cercana a los 6000GWh que representa el 2.3% del total energético neto anual. Las plantas en operación cuentan con alrededor de 224 pozos, producen cerca de 57 millones de metros cúbicos de vapor y 66 millones de toneladas cúbicas de salmuera. Los desechos de salmuera son tratados en estanques de evaporación y re-inyectados nuevamente al reservorio.

A principios de 2015 algunos pozos fueron desmantelados y otros iniciaron operaciones: Los Azufres incrementó de capacidad instalada a 227MWe, Domo San Pedro inició operaciones con 10MWe. La capacidad actual de producción en México

es de 1061MW. Dos proyectos adicionales estan en estos momentos bajo construcción: Los Humeros III-A con 27MWe, Domo San Pedro con 25MWe y una planta adicional en Los Azufres de 25MWe. (12)

1.6. Futuro de la energía geotérmica

Para obtener la aceptación de este tipo de tecnologías, es necesario comprobar el grado de competitividad con los combustibles fósiles, regresando beneficios económicos al país en cuestión. Mantener la investigación permanente de los recursos asociados a la explotación geotérmica, incluso cuando no se tengan los recursos monetarios necesarios para llevar a la práctica nuevos proyectos, podría ser primordial para desarrollar innovación en este rubro cuando la situación se torne mejor. Los impactos sociales que éstos sistemas causen al momento de su instalación y operación y los beneficios ambientales son factores fundamentales para poder ser considerados una fuente de energía renovables.

Basándose en el reemplazo de otro tipo de fuentes energéticas, se puede disminuir la dependencia nacional a las importaciones de petróleo. Usando datos de (75) se puede hacer una estimación de la cantidad de barriles equivalentes de petróleo ahorrados, comparado con la energía producida por geotermia. “Para 2015 tenemos 592,638 TJ/año por medios de aprovechamiento directo a nivel mundial” (12) y suponiendo que un barril de petróleo contiene $6.06E9$ J de energía extraíble, los ahorros debido al reemplazo son de más de 90 millones de barriles anuales.

Las inversiones en este campo han sido fuertes con “\$20 billones de dólares invertidos por 49 países para el periodo de 2010 a 2014” (75). Los Mayores inversores son Turquía, Kenia, China, Tailandia, Estados Unidos, entre otros.

Fundamentos básicos de la energía geotérmica

2.1. Sistemas geotérmicos

Los lugares donde se encuentran con mayor frecuencia recursos geotérmicos son en zonas circundantes a los límites de las placas continentales, éstos causados por actividad vulcanológica. El sistema geotérmico explotable debe consistir en un vía constituida de roca permeable conectada con la superficie mediante fisuras directamente a cuerpos de agua, permitiendo la recarga de fluidos en el reservorio. El agua dentro del reservorio tiene una diferencia de densidades, esto se debe al gradiente térmico, el cual mantiene en constante circulación mediante el efecto convectivo que implica la pérdida de calor con la superficie. Todo este sistema debe estar rodeado de una capa de roca no permeable, la cual sirve de aislante con el medio exterior.

La temperatura ideal para poder explotar los sistemas geotérmicos a escala industrial es “por encima de los 300 °C” (8). La idealización de un sistema geotérmico es mostrada en la figura 2.1.

2.1.1. Sistemas de roca seca caliente

El estudio y la explotación de sistemas geotérmicos se ha enfocado particularmente en zonas con alto contenido en fluidos (principalmente agua), los cuales sirven como transporte de energía calorífica, sin embargo, la innovación de los últimos tiempos son los sistemas geotérmicos de ‘roca seca caliente’ (en ingles

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

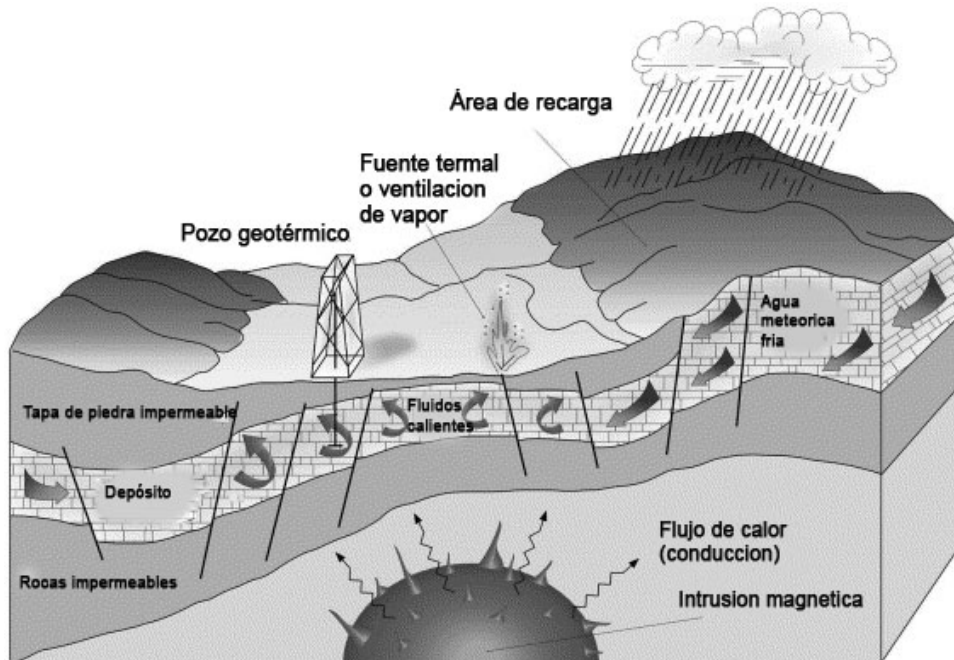


Figura 2.1: Modelo conceptual de un sistema geotérmico (8)

Hot Dry Rock ó HDR) o sistemas geotermales hechos a mano (Handmade Geothermal Systems). Se pueden localizar en casi cualquier parte sobre la tierra, en regiones con esfuerzos tectónicos favorables, lugares con permeabilidades bajas y donde exista decaimiento natural de isótopos radioactivos. Se encuentran entre los 2 km y 6 km de profundidad (135), haciéndolos atractivos por su mayor facilidad de perforación. Son característicos por tener temperaturas entre los 500°C y 650°C (113).

Algo típico de este tipo de sistemas es su falta de fracturas naturales y porosidad que permitan la infiltración de agua. Las condiciones geológicas inherentes al sitio, son importantes para el diseño de un sistema geotérmico de ésta categoría. La falta de fracturas naturales y porosidad que permita la infiltración de agua, son características típicas de este tipo de sistemas. Las formaciones cristalinas profundas son casi por completo secas e impermeables, lo mencionado anteriormente ha representado un problema técnico a resolver.

La fractura hidráulica (hydraulic fracturing), 'fracking', es realizada mediante la inyección de fluidos por un pozo de perforación con bombas de alta capacidad. Cuando el fluido alcanza presiones críticas, se origina una fractura debida a la tensión axial que después continúa propagándose por varios cientos de metros. El

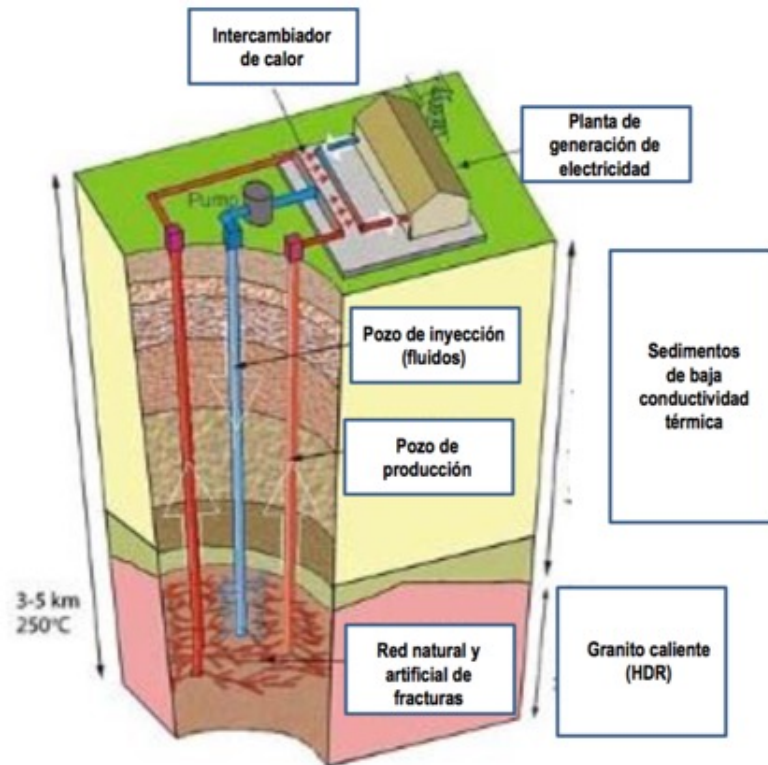


Figura 2.2: Diagrama esquemático de un sistema geotérmico de roca seca caliente (113).

rompimiento de la roca ocasiona el aumento en la permeabilidad, creando interconexiones para formar el reservorio (119).

El objetivo es claro, crear un reservorio artificial donde la inducción de fracturas creadas a través de 'fracking', actúe como un intercambiador de calor entre la fuente y el fluido de trabajo inyectado por un pozo y circulado para después, aprovecharla en usos diversos. Uno de ellos es la generación de energía eléctrica mediante la adaptación de ciclos Rankine o Kalina al sistema. (La mezcla de amónico con agua que utiliza el ciclo Kalina, hace que la transferencia de calor a media o baja temperatura nos brinde mejores resultados (135).)

Dentro de los principales problemas que involucra la explotación de este tipo de yacimientos, está el incremento exponencial del costo de perforación conforme a la profundidad, la precipitación y disolución de minerales en el fluido (los cuales podrían causar obstrucciones en las tuberías de circulación); además de la gran potencia requerida para el trabajo de circulación del fluido y las pérdidas de

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

fluido que podrían existir en el sistema.

El primer proyecto HDR fue llevado a cabo en el laboratorio Científico de los Álamos, Estados Unidos. Se generaron fracturas a partir de fracking, estas se encontraron con las fallas naturales, aumentando la permeabilidad y el área de contacto para la transferencia de calor (estimación en estudios posteriores de 8E3 metros cuadrados) con el agua inyectada. Las pruebas de circulación fueron mantenidas por 100 días. Los resultados arrojaron que la pérdida de agua y la resistencia a fluir por el sistema, eran relativamente bajas. Los aditivos no eran necesarios para mantener las fracturas abiertas. La producción durante la experimentación fue en promedio de 5 Giga Watt hora, cantidad que sería suficiente para cubrir las necesidades de numerosas viviendas por un año. (119)

Santoyo (2012) explica en su trabajo (113); Los sistemas de roca seca caliente: Una fuente de energía renovable oportuna a considerar en el programa de explotación de la geotermia que “la generación geotermoeléctrica se podría convertir en una pieza clave dentro del abanico energético mundial”, además “de reducir las emisiones de CO_2 , se propone también el uso de este gas como fluido de transmisión de calor”.

2.1.2. Sistemas hidrotermales

En la mayoría de ocasiones se pueden localizar en la superficie mediante manifestaciones como géisers o cuerpos de agua termal. Están divididos en dos categorías: líquido dominante y vapor dominante. El agua está acompañada de químicos disueltos propensos a condensar, como: “cloruro, bicarbonato, sulfato, borato, fluoruro y sílice” (8).

2.1.2.1. Sistemas de agua caliente

El yacimiento de este campo es en mayor proporción agua en fase líquida y se caracteriza por tener aguas cercanas a las 100°C. Se puede encontrar que “las temperaturas en el reservorio se mantienen por debajo del punto de ebullición del agua a cualquier presión” (8). No es necesario que existan anomalías geológicas considerables para la existencia de este tipo de campos; pueden crearse debido al gradiente térmico natural terrestre.

Para que sean viables económicamente es necesario que el yacimiento se encuentre

a la menor profundidad posible y que bajo condiciones óptimas, la concentración de sales en en agua “sea menor a los 60g/kg” (8).

2.1.2.2. Sistemas de vapor húmedo

Su contenido sigue siendo en mayor parte conformado por agua líquida a mayor presión, comparándose con los sistemas de agua caliente, su temperatura se estima por arriba de los 100°C. Por las razones anteriores, se tiende a formar una pequeña fracción de vapor que no afecta notablemente la presión dentro del yacimiento; al ser extraído para su aprovechamiento, la presión disminuye hacia la salida del pozo, haciendo circular al fluido hacia la superficie, lo cual causa un aumento en la proporción de vapor en la mezcla antes de ingresar a los sistemas para aprovechar su energía calorífica. Solo el vapor es utilizado para accionar turbinas que servirán como generadores de energía eléctrica; el agua mezclada es separada para otro tipo de usos.

2.1.2.3. Sistemas de vapor dominante

Este tipo de campos, se caracteriza por producir vapor saturado a presiones mayores a la presión atmosférica. Es necesario que exista una capa de roca no permeable para hacer que el vapor se mantenga en mayor proporción. Al extraer el vapor, este se enfría debido a la expansión ocasionada por el gradiente de presiones a la salida del pozo, sin embargo, se mantiene como vapor debido a que está sobre-calentado mucho mas allá del punto de evaporación. Durante la extracción, también se puede notar que el vapor obtenido está mezclado con gases como el CO_2 y el H_2S .

2.1.3. Sistemas magmáticos

El ascenso de magma a la superficie puede ser un problema cuando se intentan realizar proyectos exploratorios, así como de explotación. “Las estructuras tectónicas compresibles pre y existentes pueden crear caminos, ejerciendo un fuerte control sobre los niveles y geometrías del emplazamiento. Este control puede ocurrir con materiales análogos de baja viscosidad (basalto a andesita) y de alta viscosidad (granito seco) magmas” 2.3.

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

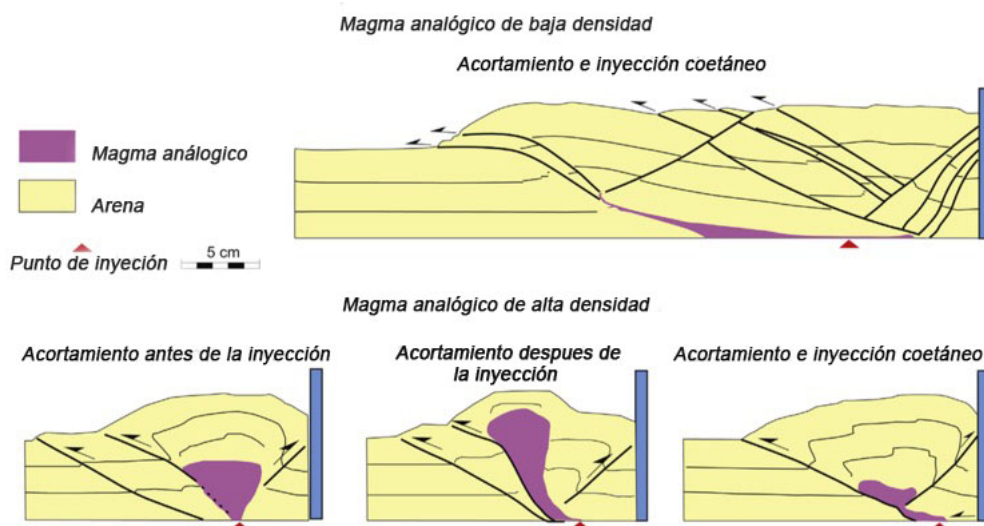


Figura 2.3: Sección transversal de modelos análogos mostrando relaciones entre la inyección de magma y la actividad entre el empuje sobre fallas (112)

Se puede hacer notar el magma al analizar las elementos de traza disueltos en el agua de sistemas hidrotermales. “Estudios petrológicos han intentado cuantificar el fluido magmático vinculado con sistemas hidrotermales jóvenes activos” (97). Mediante la medición de H_2O , CO_2 , S y Cl, que aunque su transporte depende de otros factores, son cuantificables y ayudan al entendimiento de este tipo de sistemas geotérmicos.

Un sistema hidrtermal se puede ver afectado por liberación de magma, modificando la composición de los fluidos. “Los metales de traza como el Ag, As, Eu, Cu, Ti, Sn, Pb, y Fe indican la precipitación profunda de minerales relacionados con fuentes magmáticas” (97). Usando rocas de antiguas erupciones volcánicas, se pueden corroborar las composiciones, para posteriormente compararlas con la del fluido y así determinar si este se encuentra afectado por la misma cámara magmática de la que fueron expulsadas las rocas.

Un ejemplo claro es el Monte Santa Elena, después de erupcionar en 1980, el aumento en las concentraciones de Li hacía sospechar el ascenso de magma continuo. Esto causó acumulación de gases volátiles, plomo-210 y radio-226, lo cual fue referido como un proceso de difusión y liberación de magma derivados de este sistema (11).

2.2. Manifestaciones geotérmicas

2.2.1. Manantial hidrotermal

Es el nacimiento de agua con una temperatura con respecto al suelo, notablemente mas alta (102), o por lo menos por encima de 5 °C la temperatura media anual de el lugar donde se encuentra el manantial (65). La temperatura y el pH son variables, así mismo, en las composiciones químicas del agua pueden ser abundantes los bicarbonatos, sulfatos y los cloruros (65). Los manantiales son clasificados en los siguientes tipos:

Templados: La temperatura del agua se encuentra por debajo de los 45 °C, las aguas son bicarbonatadas y la concentración de sales es baja (54). No existe vínculo aparente con fuentes magmáticas (106).

Calientes: La temperatura del agua se encuentra por encima de los 45 °C hasta la temperatura de cambio de fase (106). Los componentes químicos asociados a este tipo de manantiales dependen exclusivamente del tipo de sistema hidrotermal con el que el agua se encuentra relacionada (54).

Hirvientes: Son manantiales ligados a sistemas magmáticos (106), aunque el vulcanismo en etapa geológica reciente no se encuentra íntimamente relacionado con todos los tipos de manantiales termales, al menos en la mayoría de los conocidos con temperaturas notablemente altas, si lo está (65). Las aguas son cloruradas sódicas y algunos elementos traza como el potasio se encuentran en altas concentraciones, o el calcio en bajas concentraciones (106). El pH del fluido va de neutro a ligeramente alcalino (106).

Los manantiales hidrotermales también pueden presentarse en forma de pozas de lodo ácidas. Estas, son manantiales con agua limitada y formada a partir de emanaciones de vapor opulento con ácido sulfhídrico que a su paso disuelve la roca, generando arcillas, ópalo y cuarzo (65). Generalmente las temperaturas que presenta están por debajo del punto de ebullición y se perciben borbotos causados por la liberación esencialmente de CO_2 (65).

2.2.2. Fumarolas

Las fumarolas son alivios de vapor que se presentan en la superficie. Pueden provenir directamente del vapor generado en el reservorio o debido al cambio de fase existente en el ascenso líquido de un fluido (106) al cambiar su presión y temperatura. Por lo general, se encuentran manifestaciones de tipo fumarola sobre sistemas geotérmicos del tipo líquido dominante (44). Un ejemplo es la investigación realizada en “Vulcano Island”, Italia, donde se describe un acuífero hidrotermal hirviente que mediante la separación de vapor de la fase líquida y la expansión isoentálpica del fluido son causantes de las fumarolas en la zona (20). En (44) se afirma que las fumarolas ocurren “por encima de las columnas del flujo hidrotermal confinadas a conductos verticales controladas por fallas”.

En el caso que la fumarola presentara altas concentraciones de CO_2 y H_2S , su apelativo será mofeta y solfatara respectivamente (106). Estas mismas concentraciones, sumando la del H_2 y CH_4 pueden derivar en geotermómetros útiles para estimar la temperatura del agua de donde procede el vapor emitido por las fumarolas (4). Si existiere equilibrio entre las fases líquida y vapor dentro del campo geotérmico las concentraciones de CO_2 serían “anormalmente altas”, indicando elevadas temperaturas en el fluido emanante del reservorio (4). Otros elementos como el As, B, Br y Li en concentraciones bajas presentadas durante la manifestación de fumarolas indican un sistema de alta temperatura en equilibrio (44).

2.2.3. Géisers

La palabra géiser proviene del islandés, “gjose” que significa “hacer erupción” (109). Los géisers son emanaciones a alta presión de vapor y agua en intervalos de tiempo más o menos regulares (106). El vapor que al acumularse en las fracturas del subsuelo es causante de éstos fenómenos (106), es producto de la formación de gotas de agua sobrecalentada que al ascender bruscamente hacia la superficie se convierten en vapor flash, lo que reduce la presión hidrostática de la columna del fluido hasta que alcanza una presión y temperatura crítica lo que la vuelve termodinámicamente e hidrodinámicamente inestable, expulsando todo o parte de su contenido hacia la superficie (109). Los géisers se encuentran principalmente en zonas donde la actividad volcánica es elevada y en su gran mayoría surgen sobre riolita, aunque excepcionalmente también surgen sobre basaltos y andesitas (109).

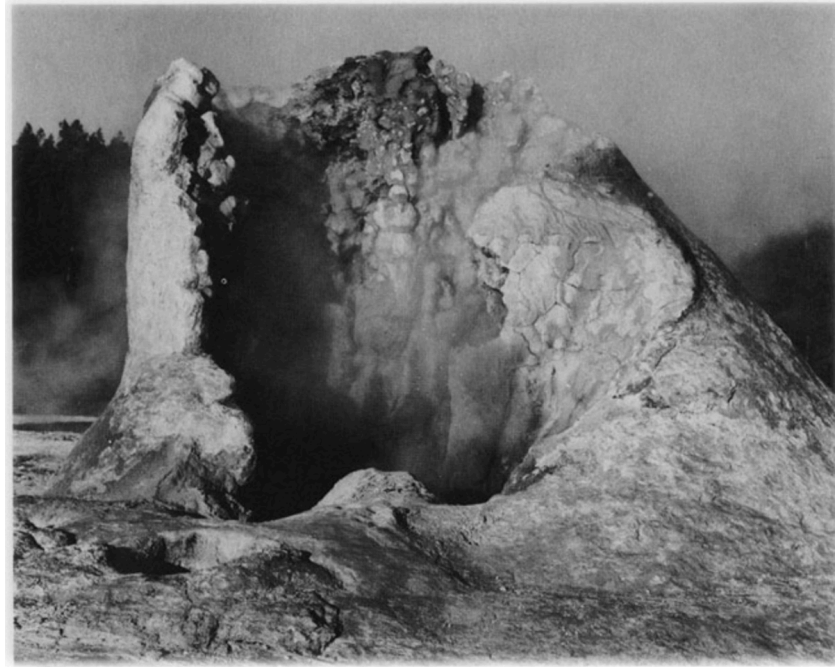


Figura 2.4: Sinter en forma de cono en el sistema geotérmico de Yellowstone, E.U. (109)

Ningún géiser se comporta como algún otro en arreglos, reservorios, respiraderos y conexiones interiores. Los elementos necesarios para que se dé lugar a este tipo de manifestaciones hidrotermales son: Una fuente de calor, una bóveda donde el agua se pueda calentar y almacenar hasta alcanzar una temperatura elevada, un respiradero por donde expulsar el agua y el vapor hacia la atmósfera e interconexiones para transportar agua de algún acuífero que servirá para rellenar el vacío que deje la erupción del géiser (109). Cuando un géiser se encuentra en actividad, como resultado del agua circulando a alta temperatura con elevadas concentraciones de silicio, éste es recubierto con una capa de silicio precipitado en diversas fases (57) tanto en las cavidades interiores como en los respiraderos llamada sinter. El recubrimiento de sinter en el respiradero del Géiser Gigante en la zona geotermica de Yellowstone, se muestra en la figura 2.4.

Su comportamiento se puede ver afectado por cambios en la hidrología, ya sean naturales o antropogénicos de (57), o debido a sismos que afecten a la zona. Tal es el caso del Gran Rift en Kenia, donde en (58) se menciona que el aumento o disminución de las lluvias en esta zona es suficiente para culminar con la actividad de los géisers cercanos. Otro ejemplo es el que se menciona en (107), donde los sismos han causado la interrupción de actividad o han originado nuevos periodos

de actividad en géisers sobre el territorio islandés. Todo lo anterior conduce a que cambie la química en los fluidos.

2.2.4. Suelos vaporizantes

Los suelos vaporizantes son extensiones vastas de terreno saturado de agua donde emana vapor con presiones insignificantes hacia el ambiente (54). El motivo por el que se produce vapor, es debido a que se lleva a cabo un proceso de intercambio de calor entre el piso húmedo y las descargas provenientes del reservorio (a mayor temperatura), produciendo vaporización (106) incluso a muy pocos centímetros del suelo, donde se pueden alcanzar temperaturas inmediatas al punto de ebullición (65). Como particularidad química, generalmente los líquidos que saturan el suelo son ácidos (65).

2.2.5. Volcanes

Los volcanes son una manifestación del calor contenido en la tierra, éstos al hacer erupción, hacen emanar hacia la superficie: lava, roca fundida, gases y vapores (65) que alcanzan temperaturas superiores a los 600 °C (51). Se clasifican con respecto al tipo de material que expelen como se muestra en la figura 2.5 (65). Durante sus periodos de actividad, liberan una gran cantidad de energía, por lo que son un gran peligro para la humanidad ya que tienden a destruir las ciudades en las proximidades (51). Una muestra de la gran energía que se libera durante una erupción es la del volcán Kilauea en 1952 que liberó 1.8×10^{24} Ergios de energía calorífica, en comparativa esto representa dos quintas partes de la energía empleada por Estados Unidos en un lapso de tiempo semejante al de la erupción (65).

<i>Tipo de roca</i>	<i>Contenido de SiO₂</i>	<i>Temperatura* de fusión (°C)</i>	<i>Densidad de (10³ Kg/m³)</i>	<i>Viscosidad* de la lava (poises).</i>	<i>Minerales Típicos</i>
Basáltica	menor de 50%	1 225	2.9 2.6	10 ²	Feldespatos, Piroxenos, Olivina, Oxidos
Andesítica	cerca de 60%	aproximadamente 1000	2.6 2.4	10 ⁵	Feldespatos, Anfíboles, Piroxenos, Micas
Riolítica	más de 65%	740	2.3 2.2	10 ⁸	Feldespatos, Cuarzo, Mica, Anfíboles

(*) Valores en la superficie de la Tierra

Figura 2.5: Clasificación química de los volcanes según su roca lava (65)

Capítulo 3

Exploración geotérmica

Los siguiente métodos forman una parte esencial en la exploración de campos geotérmicos. Son útiles para delimitar las zonas promisorias y encontrar las zonas de fractura y fallas, sitios con mayor potencial para la explotación de este recurso, es decir, la estructura geofísica principal.

3.1. Técnicas geológicas

Los elementos sustanciales en la prospectiva de campos geotérmicos son inicialmente los estudios de superficie, del sondeo de liberación de calor natural y la exploración en pozos poco profundos (de exploración).

Es preciso establecer cartografía muy detallada para realizar los estudios estructurales, estratigráficos e hidrológicos. Una parte trascendente es la topografía que consiste en representar sobre un plano entidades tridimensionales y sus propiedades como su altura o elevación sobre un plano de comparación elegido arbitrariamente. Los puntos que se encuentran a la misma altura sobre el mapa, pueden ser unidos mediante líneas suavizadas llamadas curvas de nivel. Estas líneas no pueden coincidir, salvo en el caso de acantilados rocosos o cornisas, son crecientes o decrecientes de manera uniforme y el terreno entre dos curvas se considera con pendiente uniforme.

Una de las consideraciones que se deben tomar en cuenta para la exploración y explotación geotérmica, es definir los yacimientos con sustento en aspectos geológicos, topográficos y cartográficos, debido a que las anomalías encontradas

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

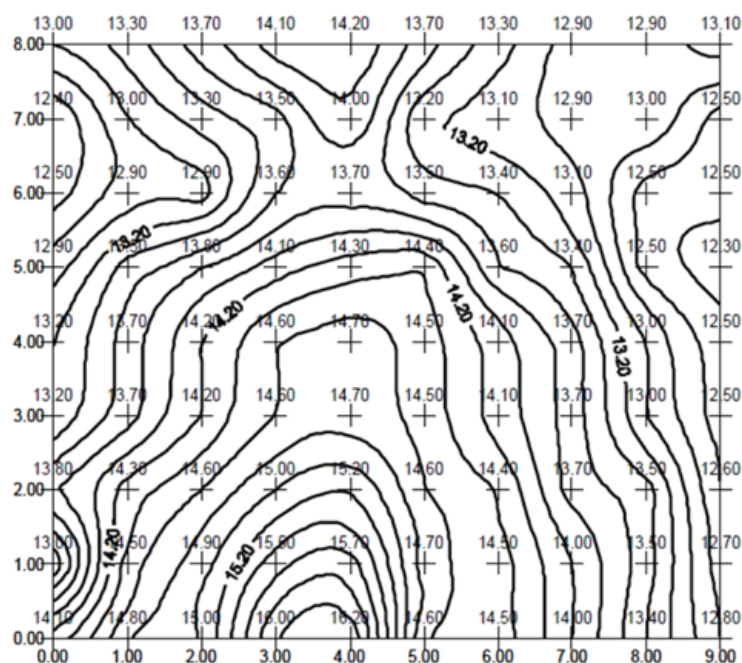


Figura 3.1: Ejemplos de curvas de nivel (108).

en los estudios anteriores permiten identificar remanentes de eventos vulcanológicos ocurridos en el pasado cercano que sirven como base para iniciar los estudios posteriores donde determinadas características de la roca nos darán información adicional sobre su formación y sobre las temperaturas en el subsuelo.

La topografía puede ayudar a identificar deformaciones en la superficie, características de las fallas geológicas, incluso las características generadas por erosión en el campo de estudio. Se debe llevar a acabo un análisis de imágenes satelitales (debido a que se tiene una mayor resolución y mayor área de análisis que con respecto a técnicas más rudimentarias de aplicación in-situ) donde se interpretan datos que nos conducirán a posibles sitios a estudiar para prospección geotermal.

En la figura 3.2, se pueden ver deformaciones de superficie como: graben, formas sigmoideas de superficie, elongaciones cónicas, fallas inversas, y fallas normales. Son un indicativo de un sistema volcánico donde existen prospectivas de altas temperaturas en el subsuelo. En este ejemplo, en el lugar marcado como 'summit' se encuentra una concavidad formada por actividad volcánica donde existe un lago que alimenta a un sistema hidrotermal (62).

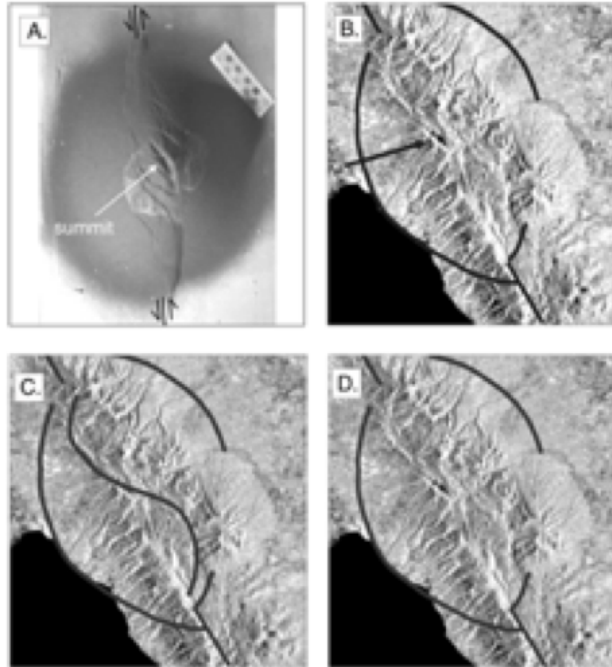


Figura 3.2: Ejemplos de anomalías geográficas (62).

La energía geotermal está aunada a “un contexto geodinámico concreto delimitado por los bordes de la placa (convergentes, divergentes sus diversas modalidades, continental, oceánica, y sus combinaciones)” (63). La Tierra se encuentra distribuida en capas concéntricas no perfectamente definidas a partir de su núcleo. La litosfera terrestre va desde 100 a 150 kilómetros en las placas continentales y de 70 a 100 kilómetros en las oceánicas; estas diferencias son debidas a fuerzas compresivas o de extensión.

El origen del vulcanismo, causante de estas fracturas o anomalías sobre la corteza terrestre es debido al efecto de transferencia de calor convectivo y masa que desplaza el calor almacenado en el centro de la Tierra hacia placas litosféricas superiores y que además coartará su desplazamiento. En términos energéticos, cada uno de estos estratos está vinculado con “las condiciones de composición, temperatura, profundidad y propiedades físicas” (63).

En zonas volcánicas como en Islandia donde la composición del subsuelo son principalmente “basaltos terciarios, el gradiente térmico es de 86°C a 47°C ” (63) por kilómetro de desplazamiento vertical hacia el núcleo terrestre. Lo anterior nos muestra un valor mucho más alto en comparativa con el promedio terrestre

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

de 30°C.

Debido a que las zonas geotermales de alta temperatura están asociadas a zonas volcánicas, el estudio de estos factores se vuelve imprescindible. “Las ignimbritas aportan información como el tamaño y composición en las cámaras magmáticas. Permiten realizar detalladas perspectivas estratigráficas para localizar los centros calientes del sitio prospecto.

3.1.1. Mineralogía de alteración hidrotermal

Los productos hidrovulcánicos son fragmentos sólidos, generalmente hidroclastos que incluyen breccias (rocas sedimentarias de origen volcánico depositadas en forma caótica durante la actividad volcánica), toba (roca ígnea volcánica formada a partir de cenizas volcánicas), palagonítica (producto de la interacción del agua con gases volcánicos que poseen una composición química similar al basalto), zeolítica (minerales microporosos de aluminosilicato), lahares (flujo de sedimentos volcánicos disueltos en agua desde el volcán en forma de río), escoria de sílice y travertino (roca sedimentaria parcialmente de origen biogénico).

Los procesos anteriores tienen una evolución posterior derivada de las interacciones de agua con la roca volcánica. El uso de petrografía para evaluar ese tipo de rocas muestra que el tamaño de grano y las huellas químicas dan indicios de la rapidez con la que la alteración fue dada en las rocas y además es un indicador del tipo de agua de interacción. “Las texturas del grano en las rocas son indicativos del tipo de interacción: pasivo, explosivo, extensivo o trascendente” (141).

“El fenómeno hidrovulcánico tiene patrones regulares [...] definiendo ciclos que nos ayudan a predecir futuras actividades y a estimar las condiciones hidrológicas en la superficie” (141). Los ciclos ‘húmedos’ son cuando se incrementa el agua durante las erupciones y los ‘secos’ cuando la abundancia de agua se ve disminuida después de una erupción; los primeros “son los perfectos candidatos para la exploración geotérmica debido a la propiedad de poder saciar las necesidades del sistema para la vaporización de agua” (141) mediante campos freáticos cercanos o grandes cuerpos de agua superficiales.

La exploración de sistemas geotermales se basa en las características de las rocas piroclásticas. Éstos pueden mostrar la existencia, tamaño y lugar donde se encuentra un sistema hidrotermal. Existen dos tipos de piroclastos, los hidroclásti-

cos: causadas por la interacción de agua de fuentes externas con remanentes de lava; y piroclásticos: expansión de gases magmáticos.

Existen relaciones entre las rocas piroclásticas, los cuerpos de magma y los sistemas hidrotermales. En la mayoría de las erupciones los productos hidroclásticos y piroclásticos son resultado de la vaporización del agua del subsuelo y son un indicativo de la permeabilidad de la roca que muestra la existencia de agua en el sistema por encima de la cámara magmática, circulada por conductos (estructuras formadas en función del estado termodinámico del sistema volcánico; indicativo de la presencia de agua meteórica (141).

3.2. Técnicas geoquímicas

La geoquímica ha mostrado ser una técnica con resultados positivos, es una pieza fundamental en la exploración para hallar campos geotérmicos, base del desarrollo de una industria emergente para el aprovechamiento de recursos termales en diferentes rubros.

Las condiciones necesarias, previas a la explotación de un campo geotérmico son determinadas por las diferencias geoquímicas relevantes dentro del sistema; por ejemplo, se puede establecer la temperatura en el reservorio mediante la premisa de existencia de “una correlación entre ciertas concentraciones de elementos de traza y la temperatura del agua. Esta correlación puede verse influenciada por la profundidad del yacimiento, así como otros factores” (13); sedimentos en rocas cercanas a las fuentes termales y liberación de gases. La posibilidad de encontrar anomalías en las composiciones químicas puede ayudar a abaratar el proceso de exploración, “comparado con procesos de exploración geofísicos, la geoquímica es mas económica, tanto en trabajo hombre como en inversión de capital en un área de las mismas dimensiones” (13).

Lo principal es establecer la naturaleza del fluido contenido en el yacimiento para determinar el patrón de circulación de flujo que conduce a las fuentes de recarga y a los posibles lugares de mezcla con mantos freáticos; las características geológicas correspondientes al lugar de estudio tales como la permeabilidad y tipo de roca en los alrededores son útiles para determinar el comportamiento de los flujos de calor dentro de la estructura así como “la fuente caliente para explicar el sobrecalentamiento en afloramientos estacionarios” (122).

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

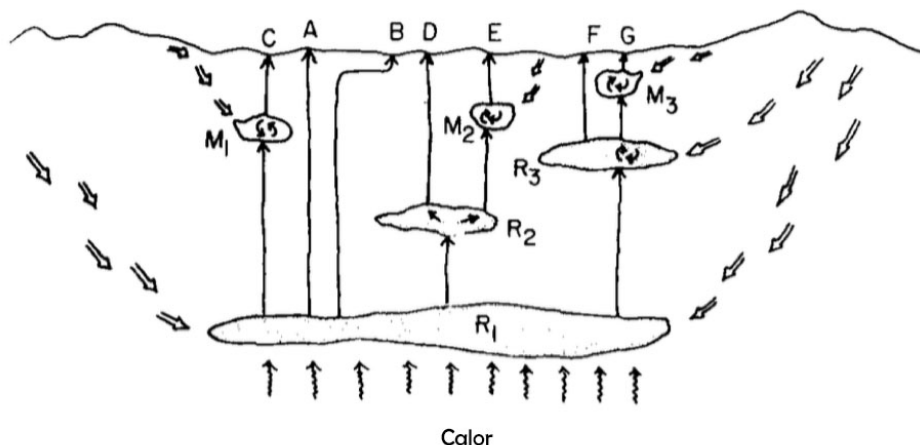


Figura 3.3: Sección esquemática de un sistema de aguas termales hipotético (38).

3.2.1. Composición química e isotópica de fluidos

Las muestras de fluidos se pueden agrupar por su composición y deben ser tantas como sea posible para tener un modelo significativo y tan amplio como el área analizada demande. Los afloramientos de aguas superficiales termales o no, dentro de una zona con posibilidad geotérmica contienen especies de aguas subterráneas representativas. Estas no describen promedios sino características zonales. Al tener muestras similares se puede intuir que su procedencia está en un origen mutuo, regido por un proceso geoquímico igualitario de las cuales se puede estimar la composición del agua en el reservorio. Análisis isotópicos pueden brindar información sobre las fuentes de alimentación del reservorio.

Las altas temperaturas en los fluido en el reservorio aumentan la solubilidad de los gases. Esto incrementa el potencial para detectar anomalías apreciables en el análisis hidrogeoquímico en aguas superficiales. Los compuestos traza pueden ser: ácido bórico (H_3BO_3), amonio (NH_4), dióxido de carbono (CO_2), etc. La acumulación de gases es una señal relevante para hallar condiciones favorables en los yacimientos geotérmicos y “puede ser detectado por medidores de pH y bicarbonato así como por determinación directa de dióxido de carbono” (122)

En la figura 3.3 se puede visualizar que R_1 , R_2 y R_3 representan acuíferos a diferentes profundidades y con diferentes temperaturas, t_1 , t_2 y t_3 . Suponemos $t_1 > t_2 > t_3 > 100^\circ$. Suponemos a R_1 en equilibrio. El agua que asciende desde R_1 puede enfriarse por conducción con las rocas circundantes o mezclarse con agua

meteórica mas fría.

El ascenso de agua desde el reservorio puede darse por diferentes rutas y se puede enfriar por conducción, evaporación o mezclado. Sin embargo el equilibrio puede recuperarse a medida que se enfría el fluido en la superficie. Así es como se estiman y determinan las condiciones hidrológicas y de alimentación de acuíferos y fuentes de agua termal.

3.2.2. Clasificación de fluidos

3.2.2.1. Aguas de cloruro de sodio

Son aguas meteóricas procedentes de reservorios de alta entalpía (81), resultado de la circulación profunda en zonas con evidencia de actividad volcánica (18) donde son absorbidos volátiles contenidos en el magma tales como: HCl, SO₂, CO₂ y H₂S (81). Se trata de un fluido habitual en sistemas geotérmicos de agua dominante (48). Esta comprendido principalmente por dióxido de carbono mezclado con una concentración de 1000 a 10,000 $\frac{mg}{kg}$ de cloro (48); en algunos sistemas la concentración de cloro puede incluso alcanzar concentraciones de hasta 155,000 $\frac{mg}{kg}$ (81). Su pH es neutro (± 1 ó 2 unidades) (81) que tiende a alcalinizarse al ascender por efecto de la pérdida del dióxido de carbono (48). Poseen trazas de calcio, así como concentraciones mayores de silicio, potasio, litio, boro y flúor en comparación con las aguas frías superficiales y poco salinas con las que se pueden diluir (81).

3.2.2.2. Aguas ácidas sulfatadas / cloruradas

Es una mezcla ácida de ambos tipos de aguas (sulfatadas y cloruradas) (48), originalmente aguas meteóricas que tiene un estrecho vínculo con magma (18). Las zonas superficiales más comunes para su formación son cráteres volcánicos (81), sobre zonas de subducción donde la interacción entre placas mezcla el agua con el magma que se origina desde la litosfera (18). Puede existir el caso en el que las aguas se neutralicen debido a la interacción profunda con la roca por un tiempo más prolongado y a una temperatura más elevada, mediante la formación de aguas de cloruro de sodio (NaCl). Su acidez es provocada debido a la oxidación

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

del sulfito en bisulfato, producto del enfriamiento (48) bajo la siguiente reacción:



3.2.2.3. Aguas ácidas sulfatadas

Es común hallarlas en lugares con fumarolas como manifestaciones hidrotermales. Son generalmente aguas procedentes del reservorio que no tienen interacción con aguas someras. Sus altas temperaturas dan lugar a la transferencia de especies gaseosas como el CO_2 y el H_2S . Su pH es ácido y se encuentra entre el rango de 0 a 3 (48). En la zona circundante donde se localiza esta agua, existe formación de caolinita y alunita producto de alteración argílica existente debido al silicio y a los cationes disueltos de las rocas por donde circula el agua (81).

3.2.2.4. Aguas bicarbonatadas

Son aguas abundantes en sodio y bicarbonato producto de la disolución de gases portadores de dióxido de carbono. Son comunes en sistemas de vapor dominante y en las zonas marginales de los sistemas líquido dominante. Son aguas ácidas resultado de la condensación del vapor geotérmico en ausencia de oxígeno lo que no permite que el H_2S procedente del reservorio se oxide (48). La acidez también es debida a la disociación de H_2CO_3 (81). Son típicas de sistemas geotérmicos de alta temperatura que poseen rocas metamórficas o sedimentarias como alojamiento del yacimiento geotérmico (48). Debida a la interacción del agua con los minerales de las rocas en la corteza, los fluidos salinos atrapados en minerales metamórficos son mezclados de igual manera con los fluidos geotérmicos (18).

3.2.3. Geotermometría

El uso de estas técnicas, es utilizado para la evaluación del potencial geotérmico a través del análisis de aguas termales superficiales y emanaciones de gases, además del monitoreo y análisis de la hidrología local, sin embargo, la aplicación

de geotermómetros tiene limitaciones para estimar las temperaturas en el subsuelo a partir de muestras tomadas en la superficie.

Son ecuaciones que se obtienen de manera empírica, con el propósito de realizar estimaciones de la temperatura que podría lograrse en los fluidos, en el fondo de un yacimiento geotérmico. Estas funcionan a partir de relaciones con diversos compuestos que se encuentran disueltos en los fluidos o vapores termales emanantes del subsuelo (64).

Para que los geotermómetros sean efectivos requieren principalmente que los elementos relacionados con el mismo estén libres en la roca o en el agua del medio, que el sistema esté en equilibrio de modo que el fluido se encuentre a las profundidades de interés y que las tasas de reacción entre los minerales y el fluido que asciende a la superficie sean lentas (88). Incluso con estas restricciones es complicado tener resultados sin mucha desviación, ya que las temperaturas pueden ser sobrestimadas o subestimadas entre 50°C y 200°C con relación a las temperaturas medidas en la base de los pozos geotérmicos perforados en la práctica (98).

3.2.3.1. Gases

El agua a alta temperatura que tiene contacto con la superficie, pierde gran parte de su masa en la fase de vapor, sin embargo, la interacción con el manto y los materiales de la corteza causan cambios menores en la composición química e isotópica de la sedimentación original (43).

El equilibrio químico de los gases se encuentra en función de la temperatura y de las fases (líquida y gaseosa) en la que se encuentre el yacimiento, por lo que es de suma importancia conocer la saturación de vapor existente en el yacimiento geotérmico. Como se discute en (84), los gases emitidos por un sistema hidrotermal tienen diferentes concentraciones según su temperatura.

Las presiones parciales de los gases varían con las proporciones del gas en el fluido lo cual puede ayudar a estimar las condiciones en el génesis del agua hidrotermal. Siendo que este tipo de prospecciones son cualitativas, la reacción entre la roca que se encuentra en el trayecto del flujo de gases proveniente del reservorio hacia la superficie y el agua misma, tiene consecuencias como el aumento de elementos tales como: Li, Cs, B, NH_3 y As en el fluido que logra escapar del manto (37).

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Un ejemplo de este tipo de geotermómetros y además uno de los más sencillos en la práctica, debido a que no es necesario conocer la saturación de vapor en el yacimiento, es el de D'Amore y Panichi (los ajustes son realizados empíricamente con fundamento en antecedentes del campo geotérmico de Larderello, Italia (64):

$$t(^{\circ}C) = \frac{24775}{\alpha + \beta + 36.05} - 273 \quad (3.1)$$

donde:

$$\alpha = 2\log\frac{CH_4}{CO_2} - 6\log\frac{H_2}{CO_2} - 3\log\frac{H_2S}{CO_2} \quad (3.2)$$

y

$$\beta = 7\log P_{CO_2} \quad (3.3)$$

donde:

$$\log P_{CO_2} = -1 \text{ si } CO_2 < 75\%;$$

$$\log P_{CO_2} = 0 \text{ si } CO_2 > 75\%;$$

$$\log P_{CO_2} = 1 \text{ si } CO_2 > 75\% \text{ y } CH_4 > 2H_2 \text{ y } H_2S > 2H_2$$

3.2.3.2. Isótopos

El fraccionamiento isotópico está en función de la temperatura que alcancen los fluidos, por lo tanto es esencial que exista un equilibrio isotópico entre las fases del fluido para conocer la temperatura del último equilibrio (64) (a menores temperaturas el reequilibrio es más lento).

El agua proveniente del yacimiento puede entrar en contacto con agua superficial, provocando dilución y modificación en los isótopos característicos, necesarios

para utilizar determinados geotermómetros, por ejemplo, la oxidación del H_2S incrementa la acidez del agua y acelera los procesos de reacción agua-roca, de esta manera se altera la composición original del agua profunda proveniente del yacimiento.

Un ejemplo de este tipo de geotermómetros es el fraccionamiento de oxígeno 18 en los sulfatos disueltos y en el agua misma. Se aplica a manantiales hirvientes de tipo clorurado sódico que provienen generalmente directo del reservorio sin dilución aparente. A través de la siguiente ecuación “se establece el valor del fraccionamiento isotópico de las muestras del manantial, que es igual a la diferencia de los valores delta de los sulfatos y de agua” (64) (una vez obtenido $10^3 \ln \alpha$ se conoce la temperatura del reservorio a través de valores tabulados):

$$10^3 \ln \alpha = \delta^{18}O_{sulfatos} \% - \delta^{18}O_{agua} \% \quad (3.4)$$

3.2.3.3. Solutos

Este tipo de geotermómetros tienen fundamento en la teoría del equilibrio químico, donde los solutos se encuentran en equilibrio a la temperatura del reservorio; conforme los fluidos ascienden estos se enfrían ya sea debido a dilución con aguas superficiales, conducción o por evaporación, sin embargo, la “señal química” de la temperatura de equilibrio se mantiene casi intacta debido a que el reequilibrio químico demora más a menor temperatura. Para que este tipo de geotermómetros funcione debe ser un orden de magnitud menor el tiempo de ascenso del agua en comparación con el tiempo de reequilibrio. Se aplica a aguas del tipo clorurado sódico y con restricciones geohidrológicas en el tipo clorurado sulfatado (64).

3.2.3.3.1. Sílice: El agua proveniente de fuentes geotérmicas de alta temperatura, tiene la particularidad de estar saturada con silicio en diferentes fases sólidas. El equilibrio se lleva a cabo si las temperaturas rondan por encima de los 200°C , sin embargo si supera los 300°C , cualquier isotopo de silicio se precipita, por lo que se puede crear incertidumbre sobre si es la temperatura de las aguas termales la que podría regular las concentraciones de silicio en el agua (27).

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

A continuación, se presentan formulas en función de la fase sólida de sílice que controla la solubilidad en el fluido (este tipo de geotermómetros son muy perceptivos a los efectos de dilución debido a que solo se utiliza una especie para realizar la estimación de temperatura) (64):

Calcedonia (Fournier):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1032}{4.69 - \log c} - 273 \quad (3.5)$$

Cuarzo (Fournier):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1309}{5.19 - \log c} - 273 \quad (3.6)$$

Calcedonia - Cuarzo (Fournier):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1000}{4.55 - \log c} - 273 \quad (3.7)$$

La siguiente ecuación sólo es válida para usarse con manantiales hirvientes:

Cuarzo con pérdida máxima de vapor (Fournier):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1522}{5.75 - \log c} - 273 \quad (3.8)$$

3.2.3.3.2. Cationes: Este tipo de geotermómetros tienen fundamento en la concentración de dos especies de cationes, principalmente: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . En este caso, a diferencia de los basados en sílice, este tipo de geotermómetros son menos sensibles en caso de que existiera dilución del agua proveniente del reservorio con aguas superficiales (64). Un ejemplo de dilución se reporta en sistemas volcánicos como el de Matsubaya, Japón, donde las aguas superficiales

son mezcladas con aguas magmáticas que aportan sales minerales asociadas a la interacción con rocas basálticas y andesíticas. La adición en mezcla de sodio también puede deberse a agua marina si el sistema hidrotermal se encuentra cerca de alguna costa (43).

A continuación se presentan ecuaciones de algunos geotermómetros (64):

Potasio-Magnesio (Giggenbach):

$$t(^{\circ}C) = \frac{4410}{13.95 - \log \frac{K^2}{Mg}} - 273 \quad (3.9)$$

Potasio-Sodio (Giggenbach):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1390}{1.75 - \log \frac{K}{Na}} - 273 \quad (3.10)$$

Sodio-Potasio (Fournier):

$$t(^{\circ}C) = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K} + 1.483} - 273 \quad (3.11)$$

3.2.4. Cámaras de acumulación: CO_2 , CH_4 , 3He

Las cámaras de acumulación son usualmente utilizadas para contabilizar las emisiones de gases como el CO_2 , el metano (CH_4) y el helio 3 (3He), éstos dos últimos usualmente acompañan en menor cantidad a los flujos de escape de CO_2 que van desde el subsuelo hacia la atmósfera. Estos gases están relacionados con un origen magmático (17), siendo el CO_2 , el primer componente procedente de los magmas basálticos, debido a su baja solubilidad en silicato en bajas a medianas presiones (116). De igual manera, los flujos de CO_2 se pueden utilizar como un indicador de permeabilidad del subsuelo (19).

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Las zonas donde existen fallas y fracturas sobre la corteza terrestre sirven como un medio de escape para los flujos de CO_2 procedentes de fuentes magmáticas o geotermales (19), por lo tanto, si existen este tipo de anomalías geológicas en la zona de estudio, al medir cerca de este perímetro se generarán mediciones más altas que en los alrededores. La porosidad del subsuelo también juega un papel importante ya que la permeabilidad depende de la granulometría de la zona que a su vez es un factor que define los flujos de CO_2 liberados (19). Existe una correlación entre los altos flujos de CO_2 y las áreas volcánicas activas e incluso inactivas (19), por lo que esta técnica es utilizada para monitorear zonas con alteraciones hidrotermales y localizar sus respectivos reservorios.

Existen dos tipos de flujos de CO_2 , flujo difusivo: donde los gases escapan por si mismos a través del subsuelo (bajo flujo de CO_2 liberados a la atmósfera) y que además se debe diferenciar entre el CO_2 biogénico y el liberado por el subsuelo, y flujo advectivo: ayudado por el escape de materia del subsuelo, por ejemplo: mediante el vapor de agua (altos flujos de CO_2 liberados a la atmósfera) (19). Conocer el tipo de flujo generado en el subsuelo será importante para conocer el error existente en las mediciones. Las emisiones pueden ser altamente variables y además mucho mayores que los flujos biogénicos siendo potenciados por los flujos advectivos procedentes del subsuelo (136). Aunque, generalmente si se encuentran fluyendo hacia la superficie en altas concentraciones de CO_2 la actividad volcánica o hidrotermal es alta.

La utilización de cámaras de acumulación consta de colocar un depósito como el que se muestra en la figura 3.4 de un volumen conocido, sobre la superficie del subsuelo. La concentración se puede medir mediante métodos activos: por medio de un analizador de gas infrarojo, y pasivos: mediante una solución de trampa álcali (17). La variación de concentraciones entre lo que existe dentro de la cámara de acumulación es directamente proporcional al flujo ascendente desde el subsuelo (123). Al realizarse estudios mediante esta técnica se debe tener en cuenta que al irrumpir en el campo de trabajo para la colocación de las cámaras de acumulación, se puede perturbar el medio natural de la zona mediante la compactación del terreno o por efectos más imperceptibles como el cambio de la velocidad o la presión del viento sobre el suelo debido a la cámara de acumulación que se convertirá en un obstáculo; esto puede afectar considerablemente los flujos naturales de gases emanantes hacia la superficie y por lo tanto obtener mediciones sobreestimadas o subestimadas.

Existen perturbaciones en el ambiente que pueden ser factores de error en la medición y con las cuales se debe tener cuidado para reducir los errores en las mediciones: La presión atmosférica, la lluvia, la nieve, la temperatura ambiente

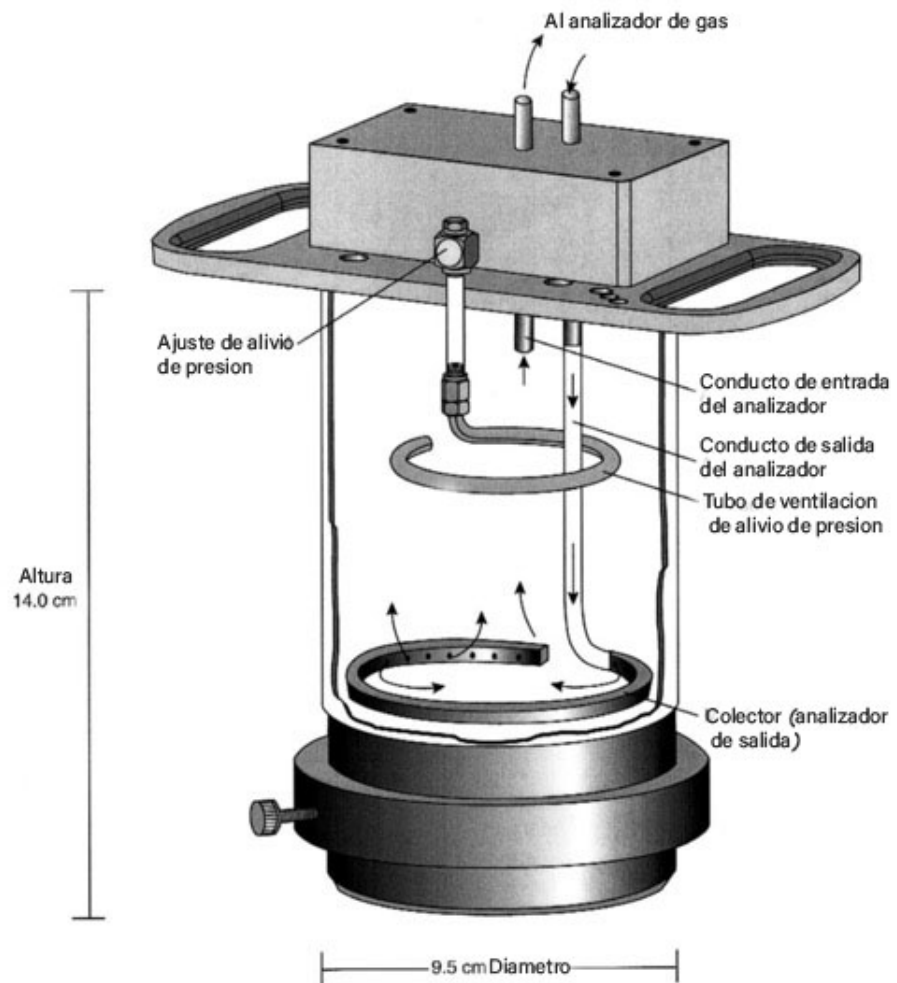


Figura 3.4: Diagrama esquemático de la cámara de acumulación de piso LI-COR LI-6200 system (136).

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

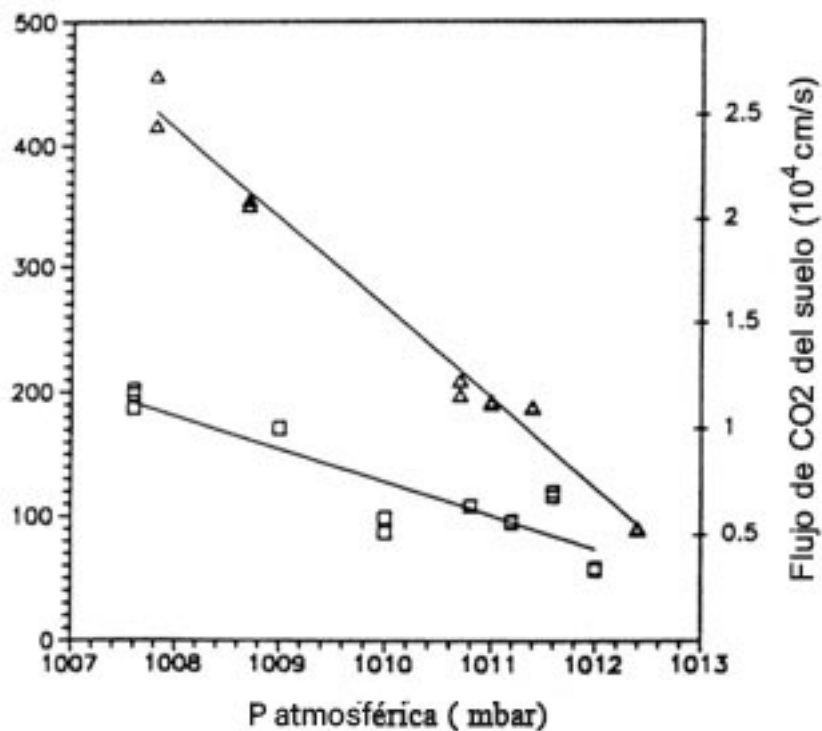


Figura 3.5: Correlación entre la presión barométrica y el flujo de CO_2 medido en la estación 14, Grotta dei Palizzi, Vulcano Island (19).

y la humedad también son factores que alteran la concentración y el flujo de las emanaciones de CO_2 naturales en el ambiente (19). Se muestra como ejemplo en la figura 3.5 cómo el flujo de CO_2 es decreciente conforme la presión atmosférica aumenta, sustentando lo que se afirma anteriormente, por lo que además de realizar una medición de la concentración de gases en el área de estudio es necesario realizar una adquisición de datos meteorológicos.

Existen técnicas Micrometeorológicas que también miden los flujos de CO_2 , un ejemplo es el Eddy Covariance que afecta de manera mínima la zona de investigación ya que casi no se altera el entorno, sin embargo, utiliza instrumentos más especializados (7), aunque es más eficaz y representa menor requerimiento de trabajo humano (49).

3.2.5. Eddy Covariance

El método “Eddy Covariance” es utilizado como un procedimiento de micro-meteorología, donde se sondean los flujos turbulentos de viento para deducir, a partir de las mediciones obtenidas: el intercambio de masa, energía y momento entre la superficie del suelo y la atmósfera (33).

Entre los primeros intentos por medir los intercambios de calor, masa y momento, entre un terreno llano de superficie homogénea y la atmósfera (93), se encuentra Montgomery, quien en el año de 1948, en su trabajo “Vertical eddy flux of heat in the atmosphere”, intentaba calcular la densidad de flujo vertical a través de la covarianza entre las fluctuaciones turbulentas de la componente vertical del viento y las masas de interés; mismo trabajo se vio restringido por la tecnología desarrollada hasta el momento (93). Fue hasta el desarrollo de los anemómetros sónicos que las ecuaciones del método Eddy Covariance fueron expuestas por Schotland en su publicación “The measurement of wind velocity by sonic waves” publicado en 1955 (115).

Las mediciones de los flujos de CO_2 y otros gases provenientes de campos geotérmicos que se intercambian con el ecosistema, realizadas con el método Eddy Covariance ofrecen la oportunidad de no alterar la superficie del suelo, además de cubrir bastas extensiones de terreno (km^2 en comparativa, por ejemplo, con las cámaras de acumulación). El resultado final son mapas de distribución espacial de los escapes de gases en la superficie como el que se muestra en la figura 3.6, donde el cuadro negro representa a la estación de Eddy Covariance. Se muestran las isolíneas medias de flujo de la estación 50, 75, 90 y 95 % del tiempo de liberación de CO_2 . Las emisiones de gases como el CO_2 en altas concentraciones están íntimamente relacionadas con cámaras magmáticas de alta temperatura. Los gases y la descripción más detallada del método Eddy Covariance se describen en el Capítulo 5.

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

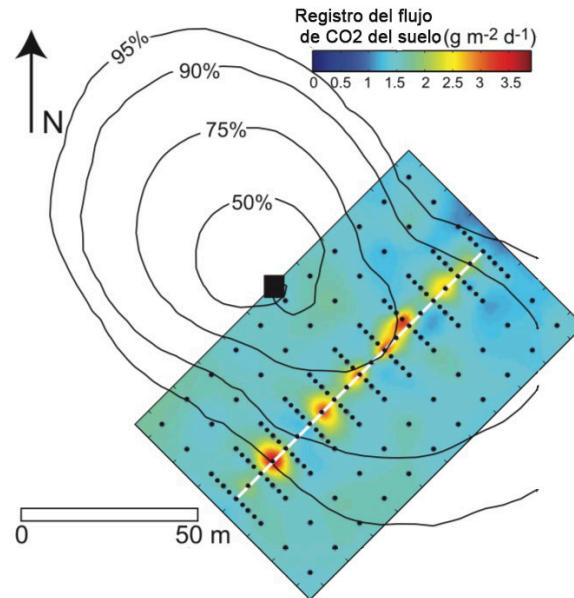


Figura 3.6: Mapa logarítmico del flujo de CO_2 del suelo, basado en mediciones realizadas con cámara de acumulación (puntos negros) (67).

3.3. Técnicas geofísicas

3.3.1. Gravimetría

Las anomalías gravitacionales (mayores a 10 mGal) están relacionadas con áreas de “anormalidades de flujos de calor debido al metamorfismo de las elevaciones de roca sedimentaria y a la circulación de fluidos mineralizados” (89). Este método es usado para la determinación de estructuras que están cubiertas por una capa volcánica “debido a los cambios de densidad a profundidades mayores a 5 kilómetros” (53). El incremento de densidades es más pronunciado en las zonas de alteraciones hidrotermales.

Idealizando una aproximación del terreno como un modelo geométrico simple y considerando a las variaciones en la base profunda del terreno despreciables. “Las anomalías residuales de primer orden, mostradas en la figura 3.8 son las que muestran principalmente cambios en las rocas sedimentarias y se obtienen

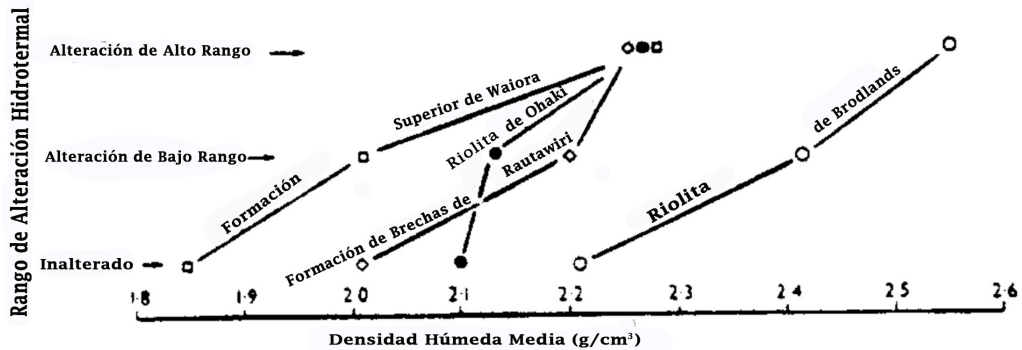


Figura 3.7: Ejemplo de variación de densidades versus el rango de alteraciones hidrotermales (53).

mediante un proceso de interpolación de anomalías gravitacionales residuales en forma transversal al terreno estudiado. Las de segundo orden, señaladas en la figura 3.9 son las que señalan variaciones en la densidad lateral debido a alteraciones hidrotermales y son determinadas por sustracción.” (53)

Se logra crear una imagen de las formaciones geológicas debajo del terreno. Las fallas dentro del área de estudio son un asunto diferente, no se puede obtener gran detalle debido a que no pueden delinear estructuras geológicas con una extensión lateral pequeña al utilizar esta técnica.

3.3.2. Sismología

Los sismos son mecanismos de liberación repentina de energía almacenada en el subsuelo (106) como resultado del estrés mecánico debido a los esfuerzos y movimientos que experimentan las placas tectónicas, éstas ya se han descrito con anterioridad en el capítulo uno. Se registran mediante sismógrafos o acelerómetros y sus magnitudes se miden en escalas, como por ejemplo la Richter (125).

3.3.2.1. Ondas sísmicas

Los sismos se difunden a través de ondas, por lo que estas ondas son entonces, energía que viaja a través de la Tierra (125). Existen dos tipos de ondas, de

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

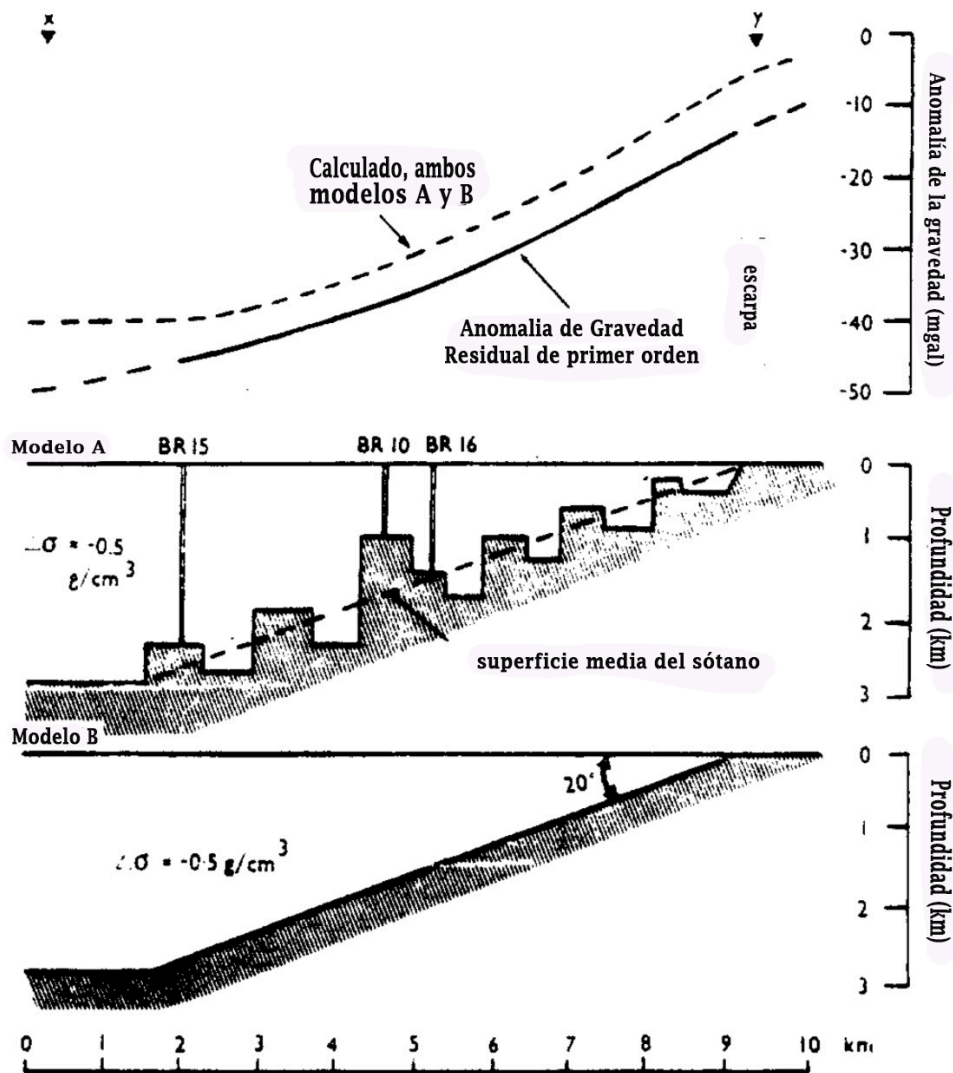


Figura 3.8: Ejemplo de interpretación de anomalías de primer orden (53).

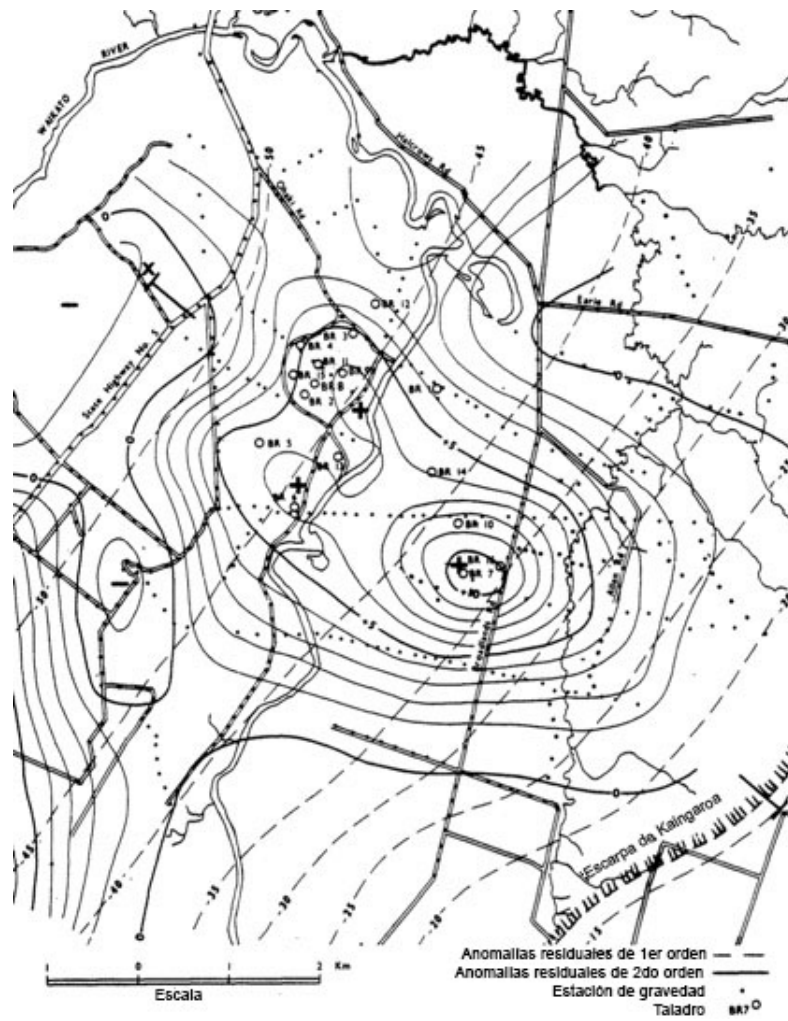


Figura 3.9: Ejemplo de interpretación de anomalías de segundo orden (53).

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

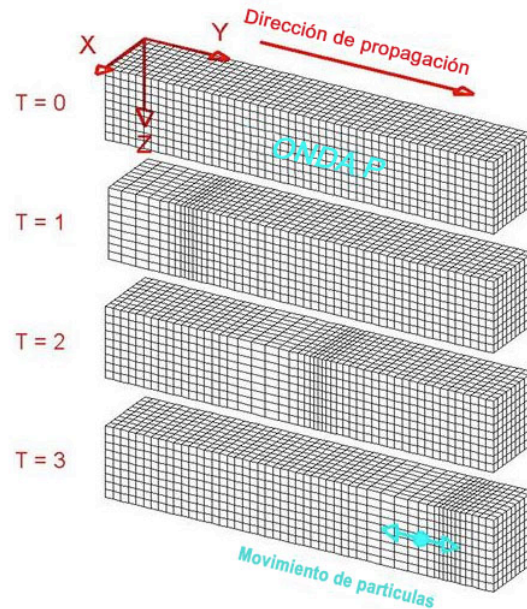


Figura 3.10: Modelo de una onda P viajando por un medio mediante compresión y dilatación. Las partículas se representan en cubos (14).

cuerpo (ondas P y S) y de superficie (Love y Rayleigh) (47). Acotaremos la información a las ondas de cuerpo que son las utilizadas en la prospección geotérmica. Estas son ondas de mayor frecuencia y que por consecuencia viajan más rápido que las ondas de superficie. Únicamente pueden viajar en el interior de la tierra (47). En las figuras 3.10 y 3.11 se muestra la propagación en un sólido elástico de las ondas P y S respectivamente, en función del tiempo.

Las ondas P (principales) son ondas compresivas en las que existe un movimiento oscilatorio en la misma dirección de propagación. En las ondas S (secundarias) la oscilación es en dirección perpendicular a la dirección de propagación (30). Una característica especial de las ondas S es que no se transmiten en medios líquidos o semifluidos (47). Al llegar a un medio con estas características se crean atenuaciones que son de utilidad para determinar alteraciones hidrotermales que no se manifiestan en las superficie.

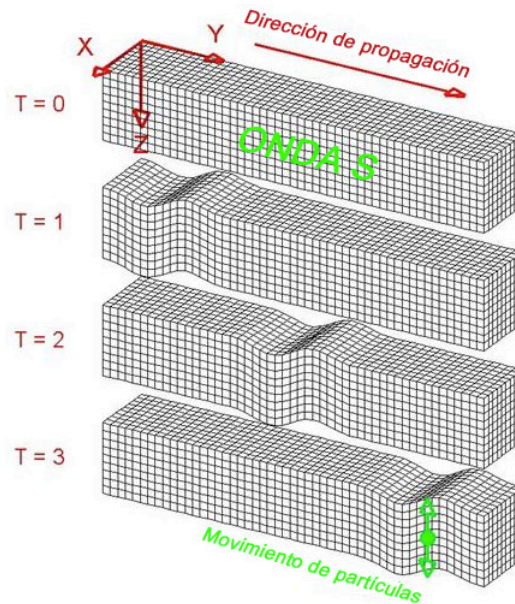


Figura 3.11: Modelo de una onda S viajando por un medio. Las partículas se representan en cubos (14)

3.3.2.2. Sísmica de reflexión

Se obtienen Perfiles Sísmicos Verticales mediante la utilización de vibradores generadores de ondas SH (Shear Horizontal) o de cizallamiento horizontal (9). La reflexión de estas ondas es recibida por transductores acústicos electromagnéticos (EMATs) (103). Las ondas SH, son ondas ultrasónicas no destructivas que tienen la propiedad de perder muy poca energía al dispersarse sobre superficies curvas (103). El uso de este tipo de tecnología permite reconocer estructuras con alta resolución geométrica sobre el basamento del lugar de exploración con una profundidad promedio de entre 4 y 5 kilómetros (9).

Las áreas con la singularidad de poseer tectónica de compresión, así como un flujo de calor bajo sobre la superficie, regularmente muestran reflexiones de baja amplitud, mientras que las áreas que se distinguen por poseer tectónica extensional y un alto flujo de calor presentan reflexiones de alta amplitud (90). Las diferencias reflexivas son imputadas a la litología asociada y a la existencia de presiones de fluido en zonas con alta porosidad (36).

En estudios realizados con esta técnica dentro del campo geotérmico de Lar-

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

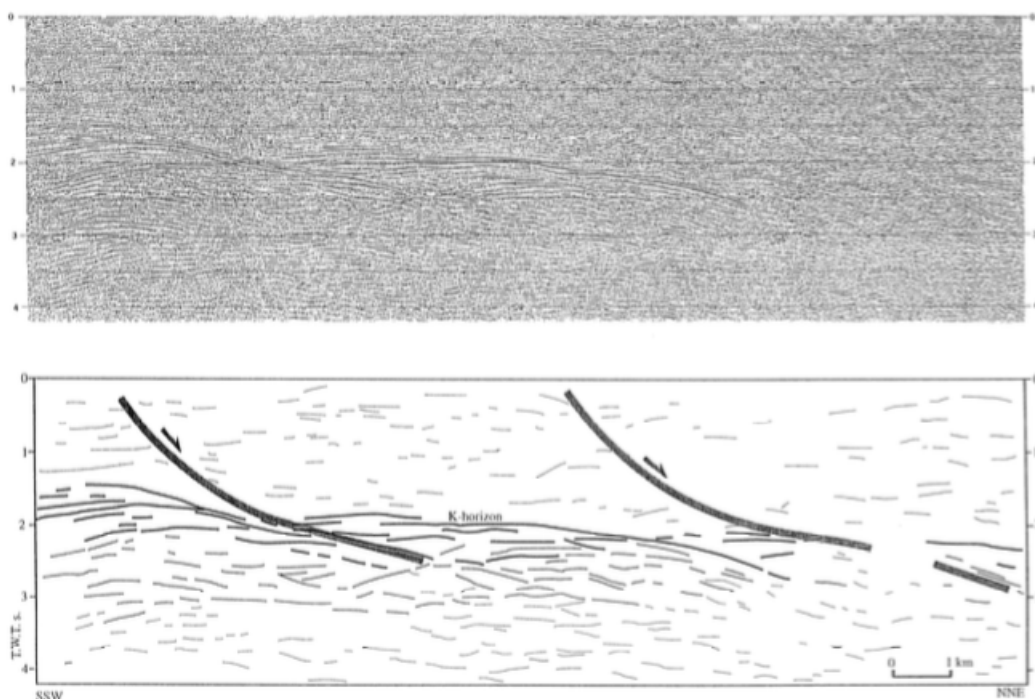


Figura 3.12: Corte transversal SSW-NNE del campo Geotérmico de Larderello. El eje “Y” esta en unidades TWTs (Two ways travel seconds) (133)

derello, se ha detectado una línea existente denominada “Horizonte K” que define una división entre reflexiones de baja amplitud (sobre el horizonte K) conectada posiblemente a la carencia de fluidos (15); y alta amplitud (debajo del horizonte K). El horizonte K tiende a ser menos profundo en las zonas con alto flujo de calor (60) alcanzando picos de $1000 \text{ mW}/\text{m}^2$ (92) y además define una zona de transición con propiedades altamente dúctiles. “El horizonte K es una característica regional que coincide con una isoterma de $450 \text{ }^\circ\text{C}$ y no es necesariamente una característica de los campos geotérmicos (72).

En la figura 3.12 superior se muestra el perfil de reflexión en datos duros (sin procesar) y en la inferior, una interpretación de líneas a lo largo del campo geotérmico de Larderello. Las líneas mas gruesas son fallas con geometría comprobada mediante datos de pozos y datos de campo. El horizonte K también es mostrado.

En (9) se afirma que la reflexión es atenuada en presencia de agua o vapor de agua. La atenuación en la reflexión ($\frac{Q_p}{Q_s}$) es en promedio menor que 1 en rocas se-

cas y por el contrario, mayor a 1 en rocas medianamente saturadas de agua dentro del campo geotérmico de Larderello. El contenido de agua dentro del reservorio influye en las velocidades de las ondas P y S. Estos datos son útiles de igual forma para comprobar modelos teóricos previos sobre el movimiento de fluidos dentro del campo geotérmico (9).

3.3.2.3. Microsismicidad natural

El uso de microsismos ha sido ampliamente utilizado en la prospección de campos geotérmicos alrededor del mundo. Se inicia con la hipótesis que indica que “los reservorios geotérmicos son un sistema dinámico de radiación de energía sísmica generada en los procesos hidrotermales y termoelásticos” (87). Sin embargo, aunque se han realizado hallazgos interesantes, no existe información suficientemente detallada en periodos prolongados de tiempo para afirmar por completo las correlaciones encontradas.

Los microsismos se pueden acotar en dos zonas, una regional que involucra y otra local que... . Acontecen continuamente y en grandes números, por lo que para obtener datos significativos se requieren varios días de medición (134).

La utilización de datos sísmicos dependerá de la naturaleza física del sistema hidrotermal (76). La circulación de agua a alta temperatura modifica la estructura de la corteza físicamente, ya sea por acción de la presión del fluido o debida a alteraciones químicas (133), debilitando algunas zonas. Las áreas debilitadas son entonces propensas en mayor medida a deformarse, siguiendo los patrones de liberación de estrés tectónico regional (133).

Las fallas en la corteza a nivel local relacionadas con los microsismos pueden ser vinculadas con la permeabilidad de la roca, incrementando la circulación de agua, permitiendo a los fluidos calientes alcanzar la superficie (121). El decremento de fluidos en el campo geotérmico afecta y produce cambios en la presión, gradientes de temperatura, volumen y estrés en la roca, fenómenos que en (77) fueron relacionados con la sismicidad.

Un indicativo de alteración de la zona de producción y la expansión en sus límites pueden ser cambios en la perturbación sísmica local (77). Estas perturbaciones están en su mayor parte confinadas en las zonas de producción (sobre el reservorio o cercanas) y delimitadas por las zonas de producción de vapor (76) que generalmente conforman redes de pequeñas fallas con mayor dinamismo sísmico

3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

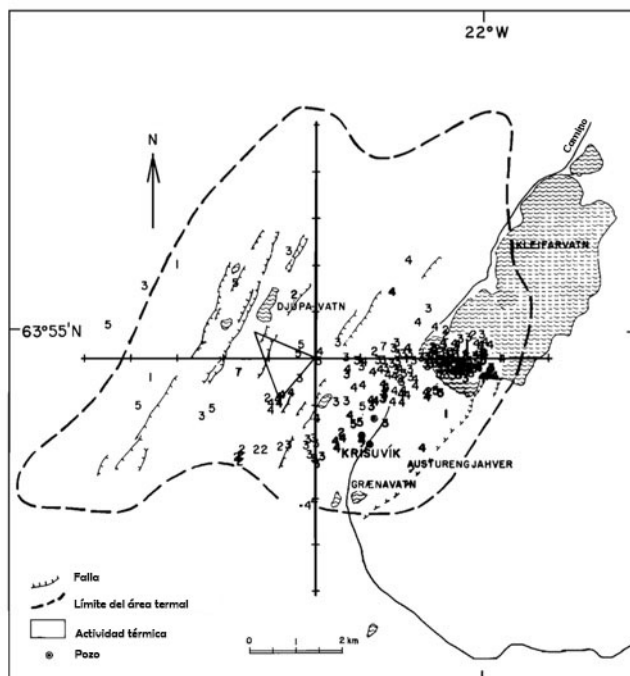


Figura 3.13: Microsismos localizados cerca de Krisuvik. Los números denotan las profundidades del epicentro, (133).

que en los límites con fallas mayores, tal como se menciona en (121).

En Islandia, por ejemplo, las alteraciones sísmicas están ligadas a un gran número de fallas y fisuras sobre la corteza (35). A su vez, en estudios como el que se desarrolló en (134) los epicentros de los microsismos están de igual forma relacionadas con las áreas de alteración hidrotermal más significativas. Los microsismos que mayor energía liberaron en los estudios relacionados en (133), se encuentran sobre las mayores alteraciones hidrotermales observables en la superficie .

En la figura 3.13 se presentan los resultados sobre un estudio sísmico realizado en las cercanías de Krisuvik, Islandia. Aquí se muestra que los epicentros ocurren de manera constante (133) dentro de los límites de la zona de alteración hidrotermal. Así mismo, se describen las profundidades aproximadas en las que han tenido lugar los epicentros. Islandia se encuentra ubicada sobre la dorsal mesoatlántica y tiene una alta actividad volcánica por lo que es un buen referente de evaluación.

Otro ejemplo notable es El Valle del Rift, en Kenia. Se han monitoreado micro-

sismos que son notablemente mas numerosos cerca de alteraciones hidrotermales como escapes de vapor que incluso por su alta temperatura podrían aprovecharse para uso comercial (121). La mayor concentración tanto de alteraciones hidrotermales, así como la mayor actividad sísmica en El Valle del Rift se encuentra al oeste cercano al volcán Susawa, mismo que hizo erupción hace más de un siglo y que además se afirma en (86) seguir activo.

En áreas donde exista alta sismicidad previa a la explotación geotérmica es primordial comenzar a monitorear tempranamente, como es mencionado en (35). Esto permitirá reconocer los patrones sísmicos regionales y locales y cómo estos se ven afectados en el tiempo por variaciones en las condiciones de presión y temperatura de la corteza. Generar un mayor conocimiento sobre los patrones sísmicos en zonas con alteraciones hidrotermales será de utilidad para futuras prospecciones geotérmicas.

3.3.2.3.1. Atenuación: Recordando que las ondas S no pueden transmitirse a través de fluidos o semilíquidos. Mientras que las ondas P sufren deformaciones al encontrarse con este tipo de medios. La atenuación es la irregularidad en el tiempo y velocidad de propagación de las ondas sísmicas (76).

La atenuación se define como Q y es el logaritmo de la relación espectral de la onda P. A continuación se describe matemáticamente (76).

$$Q^{-1} = \frac{2\pi\Delta E}{E} = \text{Atenuación Intrínseca} \quad (3.12)$$

donde:

$\frac{\Delta E}{E}$ = Fracción de la energía de tensión disipada por ciclo.

En el campo geotérmico de Los Geysers en Estados Unidos, se realizaron mediciones donde se muestran valores de atenuación discrepantes con respecto a los regionales, siendo estos más elevados a profundidades menores a un kilómetro en la zona de producción, reduciéndose paulatinamente conforme aumenta la profundidad. Además se observaron cambios en la amplitud y la forma de onda de la onda P. Lo anterior se puede interpretar como una reverberación de las propiedades semilíquidas del yacimiento de vapor (76).

3.3.3. Resistividad

Sobre el yacimiento están localizadas zonas con resistividades bajas en comparación con los alrededores. La razón de esta anomalía eléctrica es debida a la existencia de arcillas conductivas formadas por acción hidrotermal somera. La porosidad disminuye con la profundidad y la resistividad aumenta debido a que a mayor profundidad existe menor cantidad de fluidos que incrementan la mineralización. La resistividad en zonas porosas sin contenido de arcillas es atribuida únicamente a los fluidos debido a su alto contenido de aniones y cationes además de compuestos traza como en cloruro de sodio. La resistividad disminuye a medida que aumenta la temperatura y la roca o el fluido se hace mas conductivo. (126).

Debido a que la litología no es uniforme y el espesor varía en todas direcciones se realizan barridos paralelos y perpendiculares para crear una malla de resistividades aparentes. Posteriormente, mediante procesos de simulación se crea un modelo con una configuración litológica mas realista del subsuelo (106).

3.3.3.1. Método magnéticos

Estos métodos son utilizados para delimitar áreas con anomalías térmicas a poca profundidad. En la capa superior del manto, estos métodos tienen una buena efectividad de funcionamiento debido a la existencia de “roca saturada con agua termal que contiene presencia de cloruro en altas cantidades; unos miles de partes por billón” (74) o en su defecto, metales conductores transportados por el flujo de agua. La presencia de depósitos de minerales en el sistema geotérmico incrementa la inducción; esto proporciona al medio bajas resistividades, aptas para la aplicación de estas técnicas.

Este tipo de dispositivos se esquematiza en la figura 3.14. Su funcionamiento está basado en principios electromagnéticos. Un campo eléctrico producido por una fuente de corriente alterna es el causante de una inducción magnética en cualquier material conductor sobre el área a explorar. Lo anterior “producirá un campo magnético con variaciones en el tiempo que diferirá del original en fase, amplitud y dirección”(74). Las variaciones medidas en la zona serán proporcionales a las características eléctricas y magnéticas del lugar.

Mediante una bobina se genera un campo magnético primario donde la amplitud del campo resultante es detectado en una segunda bobina. Un cable de referencia

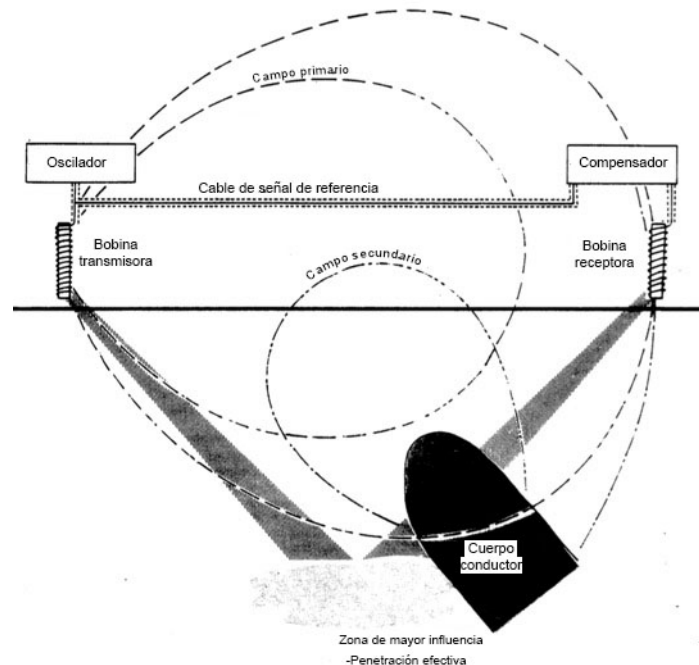


Figura 3.14: Diagrama esquemático del equipamiento (74)

es usado para comparar la señal generada por la bobina primaria y la recibida en la secundaria. Esta es comparada después para determinar las proporciones de amplitud en el campo resultante en comparación con el campo primario sin perturbaciones. En espacio abierto (sin rocas con altas propiedades magnéticas) no existe un campo secundario. Las ondas electromagnéticas tienen mayor alcance cuando se generan a 45° sobre el eje vertical y dependen del medio de propagación entre las dos bobinas.

Su rango de penetración antes de ser mitigado por el medio, está definido por una ecuación que sólo puede ser definida con precisión en condiciones ideales:

$$d \simeq 500 \left(\frac{\rho}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

(74)

donde ρ es la resistividad promedio del medio, f es la frecuencia de la señal y d es la distancia de penetración en metros.

3.3.3.2. Eléctricos

La conductividad eléctrica de los conductores iónicos incrementa con la temperatura, así como la circulación de fluidos salinos a través de roca permeable. Después de una larga interacción entre la roca porosa y el agua salina se crea una deposición que incrementa la formación de minerales. La porosidad de la roca disminuye la resistividad. Esta última está definida por:

$$\rho_t = n \cdot \rho_w \cdot B^{-m} \quad (3.14)$$

(120)

donde B es el factor de porosidad, ρ_w la resistividad del electrolito in situ, $n \simeq 1$ y m el factor de cimentación (2 - 3). Esta ecuación sólo es válida para temperaturas superiores a los 300°C. ρ_w está dado por:

$$\rho_w = \frac{\rho_x}{1 + a \cdot (t - x)} \quad (3.15)$$

(120)

donde a es el coeficiente de resistividad del fluido termal, t es la temperatura ambiente. Por ejemplo, ρ_{18} es la resistividad del fluido @ 18°C.

Este tipo de métodos están fraccionados en activos: son necesarias fuentes de origen antropogénico para la producción de corriente (alterna o directa); y pasivos: aplicaciones de la energización natural de la tierra.

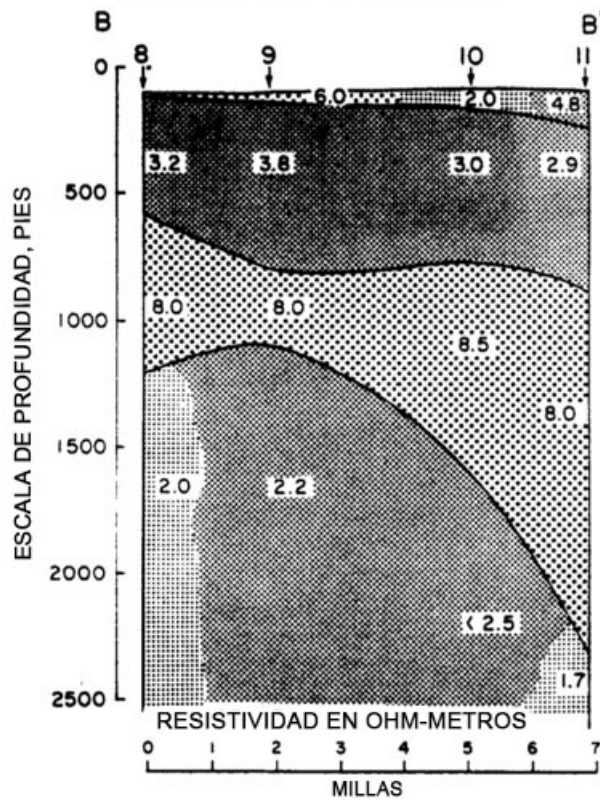


Figura 3.15: Ejemplo de corte transversal de la resistividad eléctrica (89).

Fundamentos básicos de estadística descriptiva

4.1. Medidas de posición:

Ejercen como una medida de síntesis acerca de la información comprendida en los datos numéricos, además muestran las circundancias numéricas en las que se encuentran los valores observados de las variables.

4.1.1. Media aritmética:

En un experimento o prueba, es la suma de cada uno de los datos numéricos obtenidos, la cual se divide entre el número total de datos (78), se representa para una muestra de n elementos de la siguiente forma (79):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i n_i}{n} \quad (4.1)$$

donde:

x_i son valores discretos de la variable cuantitativa

n_i las frecuencias absolutas.

También se puede definir mediante la ecuación formulada en (28):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (4.2)$$

Es conveniente resaltar que esta medida de posición, como se describe en (78), es sensible a los cambios de origen y de escala en su distribución de frecuencias.

4.1.2. Media Winsorizada:

La media Winsorizada es una medida de tendencia central que tiene como base la media aritmética, con la variante de que en esta se reemplazan los valores extremos superiores e inferiores de la distribución de probabilidad según un porcentaje determinado, por sus valores inmediatos anteriores (2).

Esta medida es considerada ‘robusta’, ya que en teoría su resultado se ve afectado en menor medida por valores atípicos (99). A diferencia de la media de Gastwirth o la media recortada (trimmed mean) que son muy útiles cuando los datos desviados tienen una distribución simétrica, la media Winsorizada resulta muy beneficiosa aun cuando la ‘contaminación’ de datos no es simétrica, proporcionando valores más adecuados relativos a la tendencia de los datos analizados (N2).

Por ejemplo, de la serie de datos ‘A’:

2, 5, 5, 6, 6, 7, 7, 8, 8, 10

Realizando una winsorización del 20%, se sustituirían el valor ‘2’ por su inmediato anterior ‘5’ y ‘10’ por su inmediato anterior ‘8’, generando una nueva serie de datos ‘B’, expresada de la siguiente forma:

5, 5, 5, 6, 6, 7, 7, 8, 8, 8

Una vez realizado este paso intermedio se procede a calcular la media aritmética con el proceso descrito en el punto anterior, con la nueva serie de datos ‘B’ que ha sido modificada.

4.1.3. Media geométrica:

Es la raíz N-ésima del producto de cada una de los datos numéricos de una variable generados a partir de una prueba o experimento. Se representa mediante la fórmula (79):

$$G = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_r} \quad (4.3)$$

4.1.4. Media armónica :

Es la inversa de la media aritmética de los valores de la inversa de una variable (78), se representa como (79):

$$H = \frac{\sum_{i=1}^r n_i}{\sum_{i=1}^r \frac{1}{x_i} n_i} \quad (4.4)$$

4.1.5. Mediana

En un conjunto de datos ordenados, la mediana representa el valor de la variable que corta justo por la mitad a la distribución de frecuencias (78), en caso de que el número de datos de la población sea un número par, la mediana será, la media aritmética de los dos valores que se encuentren a la mitad de la distribución de frecuencias; como se muestra a continuación (79):

$$Me = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \quad (4.5)$$

4.2. Medidas de dispersión:

Miden la variabilidad en la distribución de frecuencias, es decir, qué tan alejado se encuentra el promedio, respecto a las mediciones obtenidas en la prueba o experimento (78).

4.2.1. Varianza:

Es la sustracción entre: la adición de los cuadrados de cada componente, menos, la adición simple de cada componente, dividida entre el número elementos en la distribución de frecuencias (78), matemáticamente se describe de la siguiente manera (79)

$$* \sigma^2 = Var(x) = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i}{n} \quad (4.6)$$

El grado de dispersión es proporcional a la varianza, mientras más grande sea esta, la variabilidad en los datos medidos será mayor, por lo tanto, la característica típica del promedio será menor (79).

*Su unidad de medida, son las utilizadas, al cuadrado, es decir, si se mide en metros (m), la unidad de la varianza serán m^2 .

4.2.2. Desviación estándar

Es la raíz cuadrada positiva de la varianza (78), matemáticamente se representa a continuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i}{n}} \quad (4.7)$$

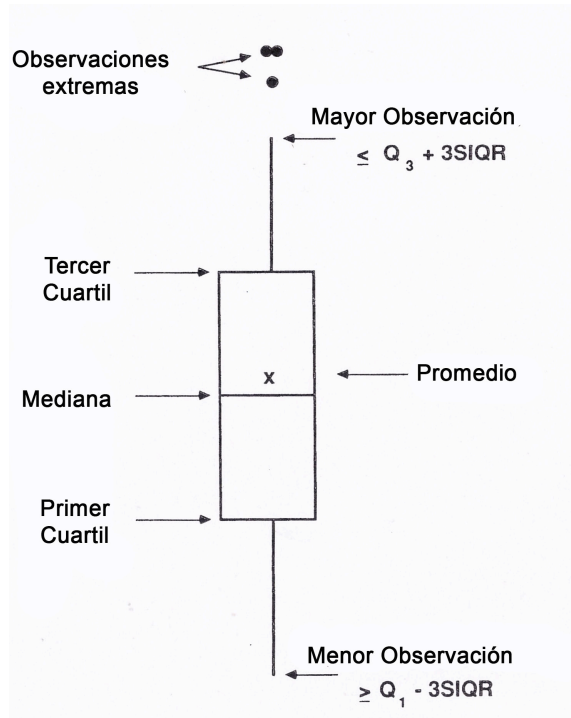


Figura 4.1: Ejemplo de diagrama de caja (56).

4.3. Diagrama de caja:

Es un gráfico que consiste de un segmento de línea, donde a los extremos se encuentran los valores mínimo y máximo. Sobrepuesto consta de un rectángulo que representa el primer y tercer cuartil, y se divide en dos partes por una línea ortogonal al segmento inicial, el cual simboliza a la mediana. También consta de una cruz dentro del rectángulo, el cual representa la media, aunque no siempre se utiliza (79).

Este tipo de diagramas también, nos da una idea de la simetría o asimetría que tiene la distribución. Si la mediana se encuentra justo al centro de la caja, entonces la distribución es simétrica; si está cercana al primer cuartil, la asimetría es positiva y si está cercana al tercer cuartil la asimetría es negativa.

4.4. Errores:

Los errores son discrepancias en las mediciones o cálculos con respecto al valor real. Es necesario considerar errores en el procesamiento de datos o directamente en los instrumentos de medición, para realizar compensaciones, ya que la contribución de diversos desaciertos, pueden generar errores con mayor trascendencia (71).

4.4.1. Tolerancia:

Aunque puede ser diferente, según la situación que se presente, generalmente se supone que los errores están distribuidos, por lo que se utiliza la medida de ± 3 veces la desviación estándar (σ), ya que las mediciones no existen al sobrepasar los límites. (71).

Si la tolerancia es igual a:

$$T = 3\sigma \quad (4.8)$$

y en caso de existir diversas variables, la tolerancia estará en función del cuadrado de cada una de las desviaciones estándar, como se muestra a continuación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4.9)$$

sustituyendo los valores de la ecuación 4.8 para σ_1 y σ_2 en 4.9, obtenemos entonces:

$$\sigma = \sqrt{T_1^2 + T_2^2} = \sqrt{9^2 + 9^2} = 3\sigma \quad (4.10)$$

4.4.2. Clasificación de errores:

4.4.2.1. Error humano (blunders):

Este tipo de errores son los más difíciles de mantener bajo control, suceden de manera aleatoria y van, por ejemplo, desde la introducción errada de datos en una computadora, hasta una medición desacertada realizada con instrumentos.

Podrían ocasionar resultados con inexactitudes altamente notables (26).

Como se menciona en (26), los resultados que se obtengan del procesamiento de datos, serán tan buenos como los datos de entrada, ya que las computadoras pueden descartar errores en los cálculos, pero no en los datos de entrada.

4.4.2.2. Error sistemático (Bias):

Son errores que tienen como singularidad, ir siempre en el mismo sentido, ya sea positivo o negativo. Son debidos mayormente, a una calibración incorrecta en los instrumentos utilizados durante los experimentos. Sin embargo, son fácilmente controlables, para la cual se utilizan referencias estándar o se comparan mediante otro tipo de métodos con nivel de precisión conocida, para al final, realizar las correcciones pertinentes en los valores obtenidos durante la medición. (26).

4.4.2.3. Error aleatorio:

Los errores aleatorios son fluctuaciones en las mediciones, que producen en todo caso, resultados diferentes, para lo cual es necesario realizar experimentos repetitivos, esperando obtener resultados con mayor precisión. De igual forma, se pueden corregir mediante el uso de instrumentos con mayor confianza en la precisión de medición, ya que cuando las mediciones son realizadas hasta la última cifra significativa disponible en el equipo, se provoca que la repetibilidad del experimento con resultados precisos sea complicada (26).

Tienen dos propiedades (26):

1. La probabilidad que sean tanto como positivos o negativos es la misma.
2. Mientras más grande sea el error con menos frecuencia acontecerá.

4.4.3. Exactitud y precisión:

- Precisión: La precisión no tiene un valor numérico en particular, al contrario, se utiliza la imprecisión para denotar una medida de dispersión, por ejemplo, la desviación estándar, que mide de cierta manera la variabilidad en el

conjunto de datos (105). Para que un muestreo sea preciso, los valores de la repetición de un experimento deben ser altamente correlacionables (83). La precisión también mide la reproducibilidad y repetibilidad en un experimento:

- Repetibilidad: experimentos realizados por un mismo individuo, con los mismos instrumentos en un breve intervalo de tiempo.
 - Reproducibilidad: experimentos realizados por diversos individuos, con múltiples instrumentos.
- Exactitud: Mide qué tan cerca está el valor real, con respecto al obtenido en el experimento. Se encuentra influenciada por los mismos orígenes que afectan a la imprecisión, sin embargo, se agregan dos principios (105):
- Los estándares de calibración y
 - la forma en que se realiza la misma.

4.4.4. Incertidumbre:

Es la magnitud del error que se estima ha sido generada en la determinación de resultados de una medición. Representa la dispersión de los valores, que podrían tener fundamento en errores ocasionados durante la medición (29).

La entidad mexicana de acreditación, adopta el concepto de incertidumbre como el establecido en los: “Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y de Calibración”, también conocida como la norma “NMX-EC-17025-IMNC-2000”, que establece a la incertidumbre como: “Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mesurado” (91).

En la sección 5 de la norma “NMX-EC-17025-IMNC-2000” se establecen (91):

1. Requisitos Técnicos

a) Generalidades

- 1) Muchos de los factores determinan el desarrollo correcto y confiable de los ensayos y/o calibraciones efectuadas por un laboratorio. Estos factores incluyen contribuciones de:
 - Factores humanos

- Instalaciones y condiciones ambientales
 - Métodos de ensayo, calibración y validación de métodos.
 - Equipo
 - Trazabilidad de la medición
 - El muestreo
 - El manejo de los elementos de ensayo y calibración
- 2) La extensión en la que los factores contribuyen a la incertidumbre total de la medición difiere considerablemente según los ensayos (y tipos de ensayos) y calibraciones (y tipos de calibraciones). El laboratorio debe tener en cuenta estos factores al desarrollar los de métodos y procedimientos de ensayo y calibración, en la formación y calificación del personal, así como en la selección y la calibración de los equipos utilizados.

4.4.4.1. Propagación de errores:

El análisis de la incertidumbre, se nombra de igual forma como propagación de errores; su objetivo es hacer notar los criterios de error, a los que las variables del experimento en cuestión, se ven forzados a adoptar. Una calidad superior en el proceso de medición, dependerá de la reducción del intervalo de error (22).

Verma afirma en (129) que: “El análisis de incertidumbre o de propagación de errores se efectúa con el objeto de conocer la cantidad de error transportada mediante las variables medidas”.

Analizar la propagación de errores conduce a (61):

- Identificar fuentes de error en la fase de ensayo.
- Jerarquizar decisiones en la fases de ensayo.
- Evaluar el desarrollo de los experimentos.
- Exponer la facultad de comparar los resultados del mismo experimento, realizado en diferentes laboratorios.
- Rectificar si los métodos matemáticos propuestos a resolver por una interfaz computacional, concuerdan con el límite fijado por la incertidumbre.
- Notificar la carencia de calibración para mejorarla.
- Secundar la evaluación del costo de procesos o instrumentos, dónde el costo es definido mediante la exactitud requerida.

4.5. Análisis estadístico

4.5.1. Intervalos de confianza

Es un dúo de números (o múltiples dúos), que sirve para estimar con un grado definido de acierto, la probabilidad de que una cifra numérica en particular (un parámetro poblacional), se encuentre entre el intervalo que conforma el dúo de números, este se obtiene a partir de datos muestrales (24).

Se obtienen de la siguiente manera (79):

- Intervalo de confianza para las variables en una población normal con varianza (σ^2) conocida:

$$IC_{\alpha} = \left[\bar{x} - Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (4.11)$$

donde \bar{x} es la media, σ es la desviación estándar, n representa el número de eventos y Z se obtiene a partir de los parámetros: nivel significativo y grado de libertad que se obtienen de C.1 y C.2.

- Intervalo de confianza para una proporción \hat{p} :

$$IC_{\alpha} = \left[\hat{p} - Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p} \hat{q}}{n}}, \hat{p} + Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p} \hat{q}}{n}} \right] \quad (4.12)$$

donde \hat{p} y \hat{q} son proporciones basados en el 100 y expresadas en decimales, por ejemplo $30\% = 0.3$, y n , es el número total de eventos.

Al tener los intervalos de confianza, se utilizan criterios de normalidad para validar los resultados:

$$np \geq 5\% \text{ y } nq \geq 5\% \quad (4.13)$$

4.5.1.1. Nivel de confianza

El nivel de confianza se define como; la probabilidad de éxito en la estimación (24) y se representa como:

$$\text{Nivel de confianza} = 1 - \alpha \quad (4.14)$$

Donde α representa un error aleatorio.

Dicho de otra forma, el intervalo de confianza para las variables, con un nivel de confianza, $1 - \alpha$, es el cúmulo de números mayormente compaginables con la variable medida (79).

4.5.1.2. Nivel significativo

El error aleatorio α es, por ende, la magnitud probabilística de fallo, existente en la estimación del intervalo de confianza (24).

La extensión del intervalo de confianza, se acrecenta cuando el nivel significativo α se reduce, sin embargo, cuando se utiliza un valor estable de α , el intervalo de confianza disminuye conforme se engrosa el tamaño de la muestra (79).

4.5.1.3. Grados de libertad:

Los grados de libertad están basados en la varianza muestral (σ^2) 4.15, expresión que se encuentra asentada bajo $n - 1$ grados de libertad. σ^2 tiene fundamento en n cantidades $(x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x})$, que tienen que sumar 0, razón por la que, si se determinan los valores de cualquier $n - 1$, el último valor adoptará un número para que la suma sea 0 (124).

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (4.15)$$

4.6. Pruebas de significancia:

4.6.1. Hipótesis:

La hipótesis es una conjetura sobre la distribución de una variable aleatoria; con ayuda de esta se realizan pruebas estadísticas, que se emplean para precisar cuándo rechazar o aceptar la hipótesis (28).

Existen dos tipos de hipótesis:

1. *Hipótesis nula (H_o): Enuncia la relación entre dos variables distintas.
2. *Hipótesis alternativa (H_1): Expresa la inexistencia de vínculos entre dos variables diferentes.

*Para cada H_o existe una H_1 .

4.6.2. Prueba F

Esta prueba es útil para comparar varianzas bajo los siguientes argumentos (46):

- *Hipótesis nula (H_o): Las muestras tienen varianzas iguales.
- *Hipótesis alternativa (H_1): Las muestras tienen varianzas distintas.

A continuación se muestra la ecuación que definen a la prueba F:

$$F = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2} \quad (4.16)$$

Donde el valor de σ se obtiene a partir de la ecuación 4.15.

Para que la hipótesis H_0 sea aceptada, se emplea la condición: $F < \text{Valor Crítico}$, de otra forma, si $F > \text{Valor Crítico}$, H_0 es rechazada y se acepta H_1 .

Los grados de libertad se definen a partir de:

$$V_1 = (n_x - 1) \quad (4.17)$$

$$V_2 = (n_y - 1) \quad (4.18)$$

Los valores críticos a un nivel de confianza 0.9, 0.95, 0.975 y 0.99, se obtienen a partir de [D.1](#) y [D.2](#), [D.3](#) y [D.4](#), [D.5](#) y [D.6](#) [D.7](#) y [D.8](#).

- $(\bar{x} \pm \sigma)$, contiene ≈ 68.0 % de los datos.
- $(\bar{x} \pm 2\sigma)$, contiene ≈ 95.0 % de los datos.
- $(\bar{x} \pm 3\sigma)$, contiene ≈ 99.7 % de los datos.

4.6.3. Prueba t de Student

La distribución t de Student, aparece a partir del ejercicio de intentar estimar la media, de una población con una distribución normal, cuando las muestras son escasas ([124](#)).

A continuación se muestran las ecuaciones que definen a la prueba t ([46](#)):

- En caso de que en la prueba F sea válida, la hipótesis H_0 , bajo la condición $F < \text{Valor Crítico}$ (Las varianzas son coincidentes).

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{S \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}} \quad (4.19)$$

$$S = \sqrt{\frac{(n_x - 1)\sigma_x^2 + (n_y - 1)\sigma_y^2}{(n_x + n_y - 2)}} \quad (4.20)$$

$$\text{Grados de libertad} = (n_x + n_y - 2) \quad (4.21)$$

- En caso de que en la prueba F sea válida, la hipótesis H_1 , bajo la condición $F > \text{Valor Crítico}$ (Las varianzas son dispares):

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n_x} + \frac{\sigma^2}{n_y}}} \quad (4.22)$$

$$\text{*Grados de libertad} = \frac{\left[\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_x} \right]^2}{\left[\frac{s_x^4}{n_x^2(n_x-1)} + \frac{s_y^4}{n_y^2(n_y-1)} \right]} \quad (4.23)$$

*Los grados de libertad no se redondean, se truncan.

Para que la hipótesis H_0 sea aceptada, se emplea la condición: $t < \text{Valor Crítico}$, de otra forma, si $t > \text{Valor Crítico}$, H_0 es rechazada y se acepta H_1 .

4.7. Regresiones lineales

1. Regresión Lineal Ordinaria (RLO)

Debe cumplir las siguientes condiciones:

- Los errores se encuentran en la variable y (dependiente), la variable x tiene errores insignificantes o no existen.

- Los errores contenidos en la variable dependiente \mathbf{y} , poseen una forma Gaussiana.
- Los errores de la variable dependiente \mathbf{y} , son homoscedásticos e independientes a los errores que pudieran existir en la variable independiente \mathbf{x} .

$$y_i = a + bx_i \quad (4.24)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2]} \quad (4.25)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (4.26)$$

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.27)$$

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (4.28)$$

Coeficiente de relación lineal:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right)} \quad (4.29)$$

- 0.00 a 0.29: Muy baja correlación
- 0.30 a 0.49: Baja correlación
- 0.50 a 0.69: Moderada correlación
- 0.70 a 0.89: Alta correlación
- 0.90 a 1.00: Muy alta correlación

Se pueden aplicar límites de confianza con respecto a los valores de la tabla [C.1](#) y [C.2](#):

$$b \pm (t_{(n-2)}\sigma_b) \quad (4.30)$$

$$a \pm (t_{(n-2)}\sigma_a) \quad (4.31)$$

Que sirven para calcular los intervalos de confianza a partir de las siguientes desigualdades:

$$b - (t_{(n-2)}\sigma_b) < \mu_b < b + (t_{(n-2)}\sigma_b) \quad (4.32)$$

$$a - (t_{(n-2)}\sigma_a) < \mu_a < a + (t_{(n-2)}\sigma_a) \quad (4.33)$$

2. Regresión Lineal Ponderada

- Los errores de la variable dependiente y , son heteroscedásticos.

$$y = a_w + b_w x \quad (4.34)$$

$$w_i = \frac{s_i^{-2}}{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i^{-2})}{n}} \quad (4.35)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = n \quad (4.36)$$

$$b_w = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i y_i \right) - n x_w y_w}{\sum_{i=1}^n w_i x_i^2 - n x_w^2} \quad (4.37)$$

$$a_w = y_w - b_w x_w \quad (4.38)$$

La desviación estándar para una muestra desconocida:

$$S_{x_0 w} = \frac{S_{(\frac{y}{x})_w}}{b_w} \left(\sqrt{\frac{1}{w_0} + \frac{1}{n} + \frac{(y_0 - y_w)^2}{b_w^2 \sum_{i=1}^n (w_i y_i^2 - n x_w^2)}} \right) \quad (4.39)$$

Parámetro ponderado:

$$S_{(\frac{y}{x})_w} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i^2 - n y_w^2 - b_w^2 \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i^2 - n x_w^2 \right)}{(n-2)}} \quad (4.40)$$

4. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Factor de ponderación (promedio de la respuestas y_0 con la varianza $S_{y_0}^{-2}$ y la concentración x_{0_w} desconocida):

$$w_0 = \frac{S_{y_0}^{-2}}{\frac{\sum_{i=1}^n S_i^{-2}}{n}} \quad (4.41)$$

5.1. Zona de estudio

El método Eddy Covariance, es una técnica utilizada para monitorear emanaciones de CO_2 y la transferencia de calor que ocurre entre la atmósfera y el lugar de estudio (6). Además de ser un instrumento autónomo, la ventaja por sobre cualquier otro método de medición, es que no modifica las condiciones naturales del sitio, generando información sin perturbaciones antropogénicas en áreas de incluso kilómetros cuadrados (34).

La estación micrometeorológica Eddy Covariance (EMEC), se encontraba localizada en las coordenadas 19.922933, -98.143467, en la comunidad de Acoculco, Municipio de Chignahuapan, Puebla. En la figura 5.2 se ilustran estas coordenadas en el punto N, el círculo rojo muestra el área de medición representativa, aproximada de EMEC y el círculo azul exhibe las zonas con manifestaciones significativas de gases emanantes del suelo (burbujeo).

La razón por la que la estación es instalada en esta ubicación, es debido a que en esta zona hay una laguna donde existe emanación de gases que se presenta en forma de burbujeo. Además de que a no mas de 500 metros se encuentran los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2; siendo el primero, el mas cercano a la EMEC. El pozo EAC-1 fue perforado en 1994 y tiene una profundidad de 2000 metros. Su composición desde los 800 metros y hasta la superficie esta detallado a continuación: Las Minas riodacita, Alcholoja ignimbrita, Cruz Colorada dacita y Acoculco ignimbrita (101). Así mismo, aunque la temperatura hallada en este pozo era atractiva para explotar el sistema HDR (260°C a 1500 metros de

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

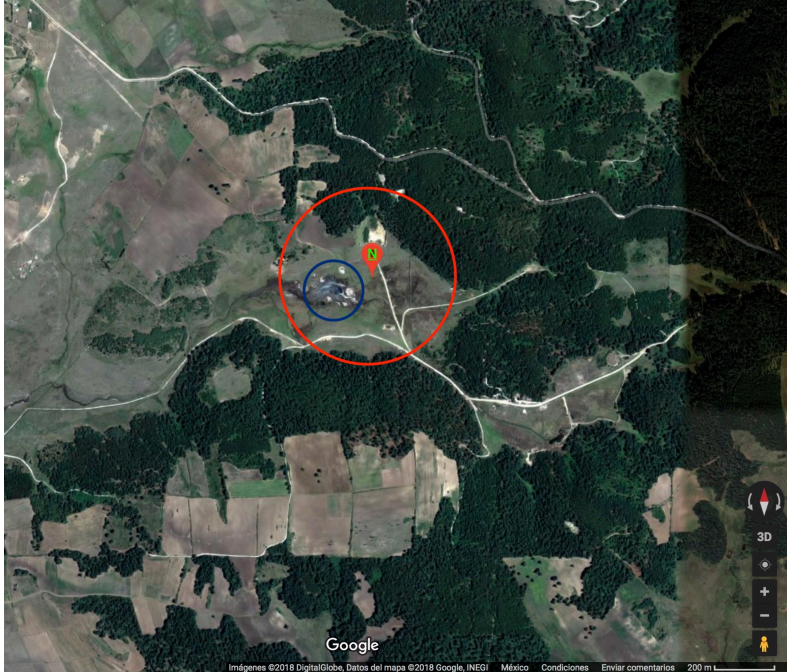


Figura 5.1: Ubicación de la EMEC (45).

profundidad), la permeabilidad hallada basada en la columna litológica, es prácticamente nula (131).

En otros estudios basados en resistividad eléctrica, se describe a la capa de cobertura superior del pozo EAC-1 con características impermeables. Por otra parte, en la “cubierta” de los laterales del pozo se observa una media a alta resistividad, que es un indicativo de materiales del tipo volcánico ácido con alto contenido de sílice (lo que favorece incrementos en la resistividad) y que además, podría fomentar la infiltración pluvial (23).

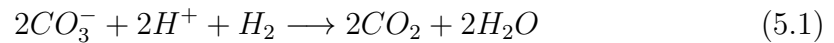
La caldera del sistema HDR en la zona de Acoculco, producto del estudio de esta investigación, “se encuentra en la fase terminal de su ciclo volcánico [...] que a su vez origina depositación de minerales secundarios que disminuyen la permeabilidad y dan lugar al autosellamiento del sistema” (73).

Basado en las aseveraciones anteriores, se entiende entonces que, la capa superior de la tierra en las circundancias de la zona de estudio es porosa en algunas partes, según los estudios de resistividad. Por otro lado, también se concluye que aunque hay porosidad y muy probablemente existen infiltraciones de agua me-

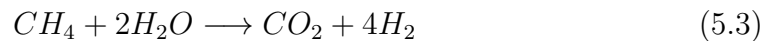
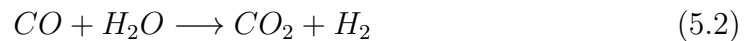
teórica sobre la capa mas somera del suelo, el sistema HDR de Acoculco, es un sistema sellado.

En general, la composición y concentración de los gases geotérmicos esta en función de su origen e interacción con las diversas rocas en su andar hacia la superficie. Los gases en zonas donde existen sistemas geotérmicos, en su mayoría derivan de origen magmático, dejando en segundo plano a los gases que tienen su génesis a partir de procesos hidrotermales, meteóricos y biogénicos (21).

En la prospección de sistemas geotérmicos, los gases mas comunes son: CO_2 , H_2S , NH_3 , N_2 , H_2 y CH_4 (96). Siendo el CO_2 , un gas preponderante donde existen sistemas geotérmicos (132). Este último, en parte es producto de un proceso de oxidación de la fase fundida de magna, aún como CO_3 , y la cual se muestra a continuación (32):



El CO_2 también puede tener su génesis, en cuanto gases como el CO (42) y el CH_4 (118) interactúan con el agua, tal como se muestra a continuación:



El CO_2 se encuentra principalmente en forma gaseosa a temperatura ambiente, sin embargo, se puede encontrar disuelto en el agua, debido al dióxido de carbono presente en la atmósfera o producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. El CO_2 al disolverse en agua, genera inicialmente ácido carbónico (H_2CO_3) y posteriormente bicarbonatos (140). Este comportamiento de disolución se rige en función de la temperatura y se puede observar en la figura 5.3.

Respecto de los gases de procedencia biogénica, son resultado de procesos bioquímicos entre el ambiente y estos mismos. En el caso concreto de esta tesis,

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

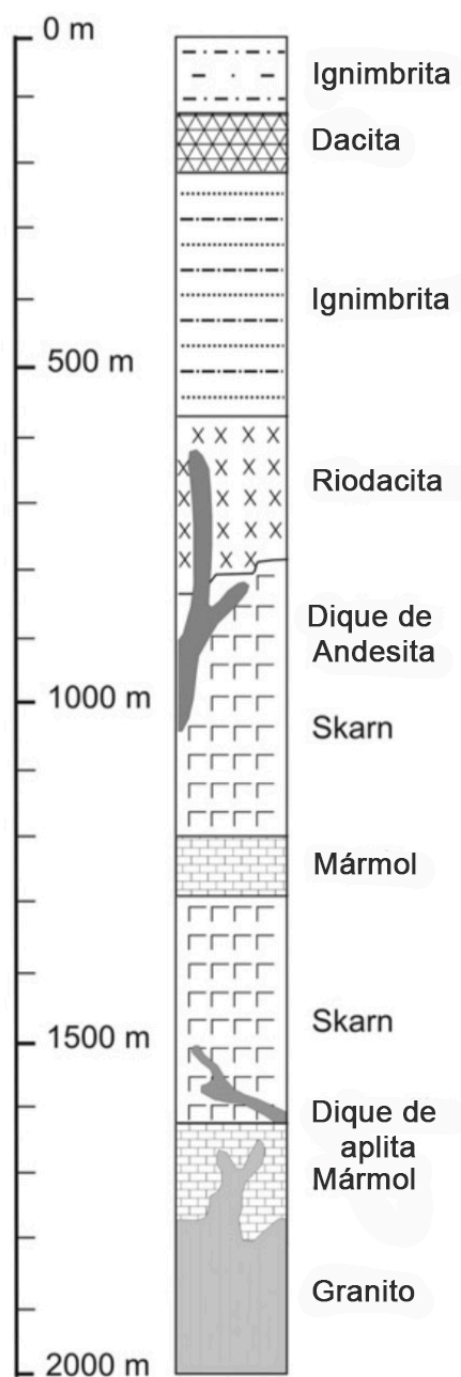


Figura 5.2: Columna litológica del pozo EAC-1 (101).

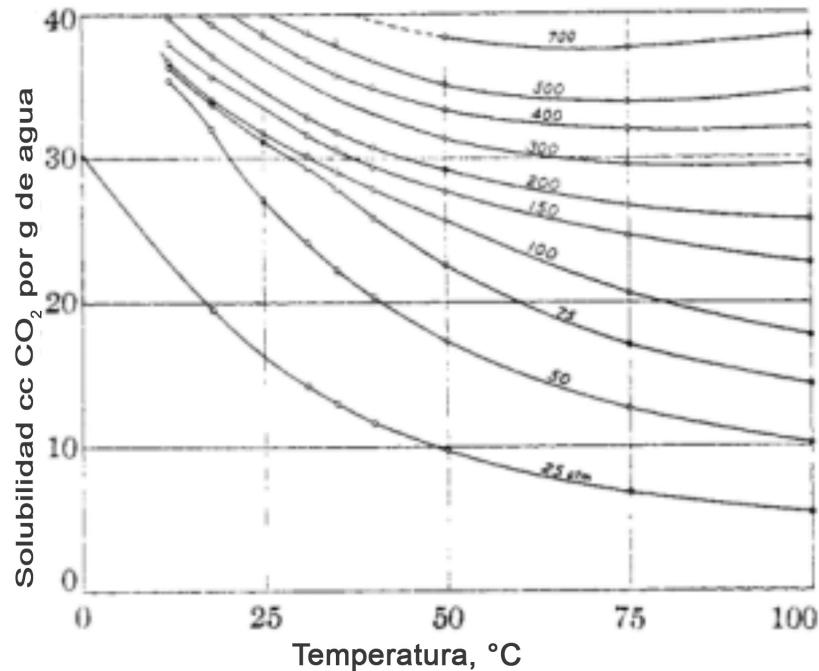


Figura 5.3: Solubilidad del CO_2 en H_2O (140).

se menciona que el CO_2 puede ser emitido también por la mineralización de la materia orgánica contenida en el suelo, así como por las plantas y sus raíces (82) al realizar su proceso de fotosíntesis. Para poder identificar a detalle la procedencia del CO_2 se debe realizar un inventario de gases y sus fuentes emisoras, mediante estudios más detallados, mismos que no son tema de este trabajo.

5.2. Principios de operación de la EMEC

El viento está compuesto por un flujo de vórtices rotatorios que poseen componentes tridimensionales. Cercano al suelo, los vórtices son más pequeños y se moverán a grandes frecuencias, mientras que a más altura serán hallados vórtices más grandes que se moverán a menores frecuencias (16).

Los vórtices mueven partículas, que mediante el transporte vertical turbulento del gas que cruza por una superficie, pueden ser medidas. En la figura 5.4, se ejemplifican “paquetes” de partículas que suben y bajan; cada uno posee su propia concentración, temperatura, humedad; si se conoce su velocidad, entonces,

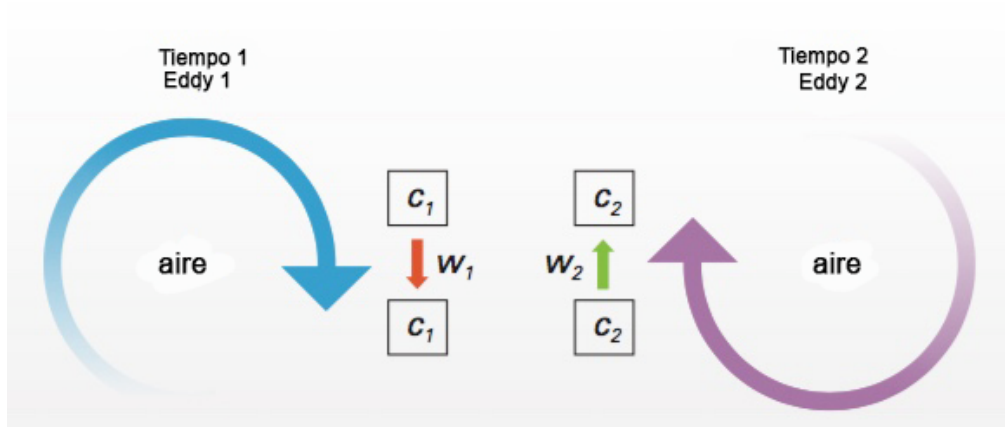


Figura 5.4: Transporte de partículas ideal del método Eddy Covariance (16).

se conoce el flujo (117).

Un flujo describe el movimiento de cosas de un lugar a otro sobre un área en un determinado tiempo.

- Número de partículas que atraviesan por un área
- Tamaño del área
- Tiempo que toma en cruzar el área

El flujo transporta moléculas, si no se agregan o pierden durante el movimiento, entonces no existe un flujo, en cambio, si existen variaciones en las concentraciones de subida en contraste con las de bajada, entonces, se tiene un flujo.

Si podemos medir las moléculas que suben y que bajan en el vórtice en el tiempo 1 y el tiempo 2 en el mismo punto entonces, se puede calcular el flujo vertical en ese punto. El flujo vertical se puede representar como una covariancia de velocidad y concentración. Las fluctuaciones pueden ocurrir rápidamente, haciendo necesario que los instrumentos sean capaces de medir cambios abruptos (16).

Matemáticamente, un flujo vertical se puede representar mediante la ecuación 5.4 (16)

$$F = \overline{\rho_d w s} \quad (5.4)$$

Descomposición de Reynolds de la ecuación 5.4:

$$F = \overline{(\rho_d + \rho'_d)(\bar{w} + w')(\bar{s} + s')} \quad (5.5)$$

Expandiendo la ecuación 5.5, se obtiene:

$$F = \overline{(\rho_d \cdot \bar{w} \cdot \bar{s} + \cancel{\rho_d \cdot \bar{w} \cdot s'} + \cancel{\rho_d \cdot w' \cdot \bar{s}}) + (\rho_d \cdot w' \cdot s' + \cancel{\rho'_d \cdot \bar{w} \cdot \bar{s}} + \dots \dots \rho'_d \cdot \bar{w} \cdot s' + \rho'_d \cdot w' \cdot \bar{s} + \rho'_d \cdot w' \cdot s')} \quad (5.6)$$

Simplificando la ecuación 5.6, se obtiene:

$$F = (\overline{\rho_d \cdot \bar{w} \cdot \bar{s}} + \overline{\rho_d \cdot w' \cdot s'} + \overline{\bar{w} \cdot \rho'_d \cdot s'} + \overline{\bar{s} \cdot \rho'_d \cdot w'} + \overline{\rho'_d \cdot w' \cdot s'}) \quad (5.7)$$

Donde ρ es la densidad promedio del aire, w la velocidad del viento, s la fracción molar seca del gas de interés. La descomposición de Reynolds divide la ecuación en promedios y desviaciones estándar. Donde la desviación promedio del promedio es cero, debido a esto se hace la eliminación en la ecuación 5.6.

$$F = (\overline{\rho_d \cdot \bar{w} \cdot \bar{s}} + \overline{\rho_d \cdot w' \cdot s'} + \dots \dots \overline{\bar{w} \cdot \rho'_d \cdot s'} + \overline{\bar{s} \cdot \rho'_d \cdot w'} + \overline{\rho'_d \cdot w' \cdot s'}) \quad (5.8)$$

En la ecuación 5.8 se eliminan los términos que contienen ρ' , debido a que para el uso convencional del método, las oscilaciones de la densidad del aire son insignificantes (16), resultando la ecuación 5.9.

$$F = (\overline{\rho_d \cdot \bar{w} \cdot \bar{s}} + \overline{\rho_d \cdot w' \cdot s'}) \quad (5.9)$$

Así mismo, se asume que el flujo vertical promedio para terrenos homogéneos horizontales, es insignificante, por lo que se elimina un término de la ecuación 5.9, obteniendo la ecuación para el flujo de vórtices, que se presenta en la ecuación 5.10.

$$F = \overline{\rho_d} \cdot \overline{w' \cdot s'} \quad (5.10)$$

5.3. Instrumentos de medición

La EMEC, está posibilitada para realizar 850E3 mediciones por día correspondiente a datos físicos (AIU) provenientes del: anemómetro sónico y el sensor de CO_2 y H_2O (LI-7500A); y 1420 mediciones de datos biométricos (Biomet) por día, procedentes del: piranómetro, pluviómetro, sensores de flujo térmico, y el sensor de humedad y temperatura del aire, que básicamente, son sensores que se encuentran enlazados con el Datalogger de la EMEC(16).

5.3.1. LI-7500A - Analizador de CO_2/H_2O de Canal Abierto (16)

El sensor LI-7500A, está basado en el principio de "infrarrojo no dispersivo" (NDIR por sus siglas en inglés). La absorción del haz de luz infrarrojo, permite cuantificar el CO_2 a un ancho de banda medio de 4.26 μm , mientras que el H_2O se cuantifica a 2.59 μm .

El sensor permite realizar mediciones a 10 Hz, es decir, 10 mediciones por segundo. Es un sensor de "recorrido libre" ya que no requiere bombas de presurización o algún otro tipo de artefacto secundario para funcionar; al instalarse, este debe tener una ligera inclinación para reducir acumulación de agua durante la lluvia.

La colocación del sensor en la EMEC, debe ser justo por debajo del anemómetro sónico, teniendo como máximo 20 y mínimo 15 centímetros de espaciado, de tal forma que este altere mínusculamente el fluir natural del aire desde cualquier dirección hacia el anemómetro sónico.

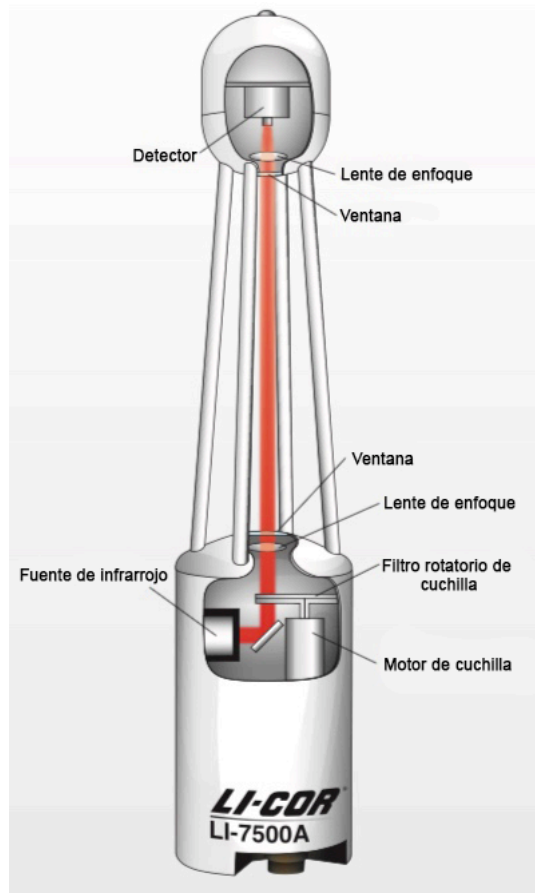


Figura 5.5: Sensor LI-7500A, estructura interna (16).

5.3.2. Anemómetro sónico

Los flujos de viento son clave esencial del funcionamiento del método Eddy Covariance, por lo que el anemómetro sónico es pieza fundamental en cada medición que se realiza.

El anemómetro sónico, emplea 3 pares de transductores bidireccionales que alternan entre emisor y receptor, para medir las tres componentes [u, v, w] de la velocidad del viento, que se calcula mediante las siguientes ecuaciones (16):

Tiempo que le demora a una señal acústica en llegar desde el transductor A al B:

$$T_{A-B} = \frac{D}{V_s + V_v} \quad (5.11)$$

Tiempo que le demora a una señal acústica en llegar desde el transductor B al A:

$$T_{B-A} = \frac{D}{V_s + V_v} \quad (5.12)$$

Velocidad del viento:

$$V_v = \frac{D}{2} \left(\frac{1}{T_{A-B}} - \frac{1}{T_{B-A}} \right) \quad (5.13)$$

Donde, D es la distancia entre los transductores, y V_s es la velocidad del sonido, que se obtiene a partir de el tiempo que le toma a una señal ultrasónica recorrer la distancia entre dos transductores. En la figura 5.6, se ejemplifican un par de transductores A y B y la distancia (D) entre ellos.

5.3.3. Placas de flujo térmico del suelo - HukseFlux HFP01

El flujo de calor del suelo se define como: la cantidad de energía que se desplaza sobre un área del suelo en un tiempo dado. Se mide con "Placas de flujo térmico

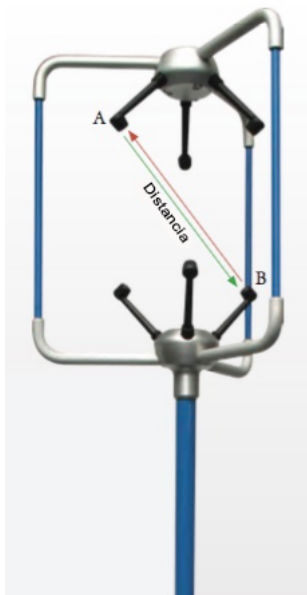


Figura 5.6: Anemómetro sónico, ejemplo de transductores A y B, y distancia (D) (16).

del suelo HukseFlux HFP01” (figura 5.7), que son sensores pequeños, rígidos y con forma de oblea que se colocan horizontalmente dentro el suelo. Utilizan una termopila encapsulada que respondiendo a un gradiente de temperatura vertical, produce una fuerza electromotriz (114).

La placa debe colocarse justo en el punto donde comienza a consumirse la energía por el calor latente de vaporización; entre 0.025 y 0.05 metros de profundidad en terrenos áridos y entre 0.05 y 0.1 metros en terrenos húmedos. A profundidades menores a 0.025 m, se corre el riesgo de que la tierra sobre la placa se agriete y quede expuesto a radiación solar incidente (114).

La placa puede coartar el movimiento del agua en el suelo, haciendo que esta se acumule encima en caso de lluvia (85) o que debido a la evaporación del agua se seque el suelo encima de esta y que no se pueda recuperar la humedad proveniente desde una profundidad mayor, ocasionando que las circundancias superiores de la placa estén más secas que el suelo del terreno en general (114), lo que ocasionaría errores en la medición.

Para determinar los flujos de calor a una profundidad definida en el suelo se debe considerar el almacenamiento de calor existente sobre la placa y la pérdida de calor latente por debajo de la misma (85).

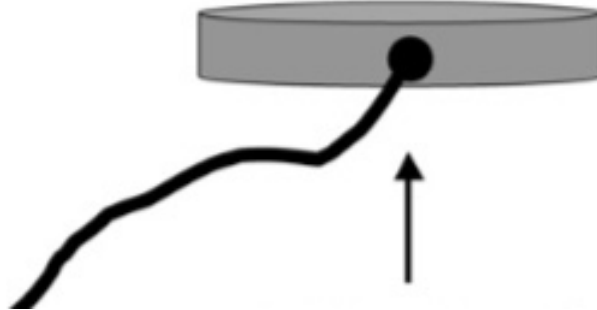


Figura 5.7: Placas de flujo térmico del suelo HukseFlux HFP01 (114).

El balance de energía (85) considerado en el análisis micrometeorológico se expresa en la ecuación 5.14:

$$R_n - G_s = LE + H \quad (5.14)$$

donde:

- R_n : Radiación neta (obtenido de un piranómetro).
- G_s : Flujo de calor en la superficie del suelo.
- LE : Flujo de calor latente.
- H : Flujo de calor sensible.

Es importante considerar que todas las variables tienen unidades [Wm^{-2}], además que, " $R_n - G_s$ " es la energía disponible, que en su mayoría, es devuelta desde el suelo hacia la atmósfera durante la noche. De igual forma la magnitud de " G_s " se modificará con la humedad del suelo, la irradiancia solar, y con la vegetación que cubra el terreno (si la hubiera)(114).

Realizar la medición de los flujos de calor en el suelo, conlleva a conocer las propiedades mismas de la tierra que lo compone, como: su contenido de agua, textura, densidad e incluso su color; de misma forma, es menester considerar las variables que contribuyen en la meteorología del sitio de estudio como: elevación y latitud (114).

La rapidez con que la temperatura cambia durante el día o incluso durante las diversas estaciones del año, está determinada por la capacidad del suelo para transferir el calor mediante conducción. La temperatura afecta de forma singular el ritmo con que los procesos químicos y biológicos en el suelo se llevan a cabo



Figura 5.8: Piranómetro LI-200R (68).

(114). Un ejemplo de ello es la emisión de CO_2 biogénico, así como la captura de este gas por el medio y que mas adelante será utilizado como indicador en esta tesis.

5.3.4. LI-200R Piranómetro

Son instrumentos con los que se puede cuantificar la radiación solar incidente total (directa y difusa) en un plano. Los sensores que registran la radiación son, en general, de diversos tipos (25); los empleados por el proveedor de sensores LI-COR, funcionan a base de fotodiodos (silicio de alta estabilidad realzado en azul), estas en general tienen una rápida respuesta al cambio en la radiación ambiente $< 1 \mu$ segundo y funcionan en la frecuencia de 400 a 1000 nanómetros sobre el espectro solar y en cualquier ángulo de incidencia sobre el plano del sensor del piranómetro. La cubierta del sensor fotovoltaico consta de un cuerpo de aluminio anodizado y de un difusor de acrílico (68).

Formalmente, la radiación solar aporta energía al ambiente, misma que es responsable de generar el movimiento del viento, en el cual se basa la hipótesis de esta tesis. Se presenta el piranómetro LI-200R en la figura 5.8.



Figura 5.9: Pluviómetro de cubeta basculante TR-525M de Texas Electronics (70).

5.3.5. Pluviómetro de cubeta basculante TR-525M de Texas Electronics

Mesura la precipitación mediante la captura del agua de lluvia en un receptor abierto que se encuentra en la parte alta del instrumento. El agua recolectada, de forma postrera se concentra en un dispositivo mecánico, donde después de llenarse el receptáculo de este, se vuelca, vaciando el contenido al ambiente y provocando que además se active un interruptor que registra una cuenta en el adquisidor de datos. Luego, una vez vacío el receptáculo el proceso se repite de forma indefinida mientras la lluvia persista(70). En la figura 5.9 se muestra el Pluviómetro de cubeta basculante TR-525M de Texas Electronics.

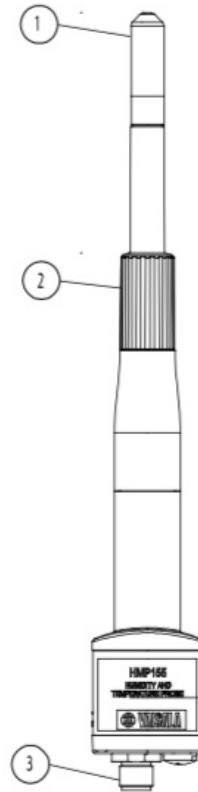


Figura 5.10: Sensor humedad y temperatura HMP155 - Vaisala (127).

5.3.6. Sensor humedad y temperatura HMP155 - Vaisala

El sensor de humedad está fundamentado en la tecnología HUMICAP® , que consiste en un sensor de polímero de película delgada capacitiva. Mientras que el sensor de temperatura desempeña su función a través de platino resistivo. La temperatura de operación está entre -80 a 60 °C y las mediciones de humedad se expresan en porcentajes y van de 0 % a 100 %. En la figura 5.10 se observa el Sensor humedad y temperatura HMP155 - Vaisala, donde: 1 es el filtro, 2 es la cubierta protectora y 3 es un conector M12 para interconectar con el adquisidor de datos (127) .



Figura 5.11: Sistema Smartflux ® (69).

5.3.7. SmartFlux ®

Los datos se procesan en este hardware/software, de tal manera que se obtienen datos crudos en lapsos de media hora, teniendo como estimado para un mes de 30 días 1440 datos por variable procesada. La obtención de estos datos resulta conveniente ya que el sistema los almacena en una unidad USB extraíble (69).

5.4. Configuración y posicionamiento de la EMEC

La ubicación de la torre debe ser estar optimizada para los vientos característicos del sitio de análisis, así como la altura promedio de la vegetación y la topografía. Además, el anemómetro omnidireccional debe ser instalado en la cima de la torre para cumplir con este propósito, reduciendo distorsiones ocasionadas por la torre de la EMEC. Junto al anemómetro debe instalarse el analizador de gases en posición ortogonal a los vientos predominantes, con una separación de entre 10 y 20 centímetros, evitando de esta forma, alteraciones en el flujo de viento y retraso en el registro de datos (16).

La altura recomendada para la torre es de entre 1.5 a 2 veces la altura promedio de la vegetación. Sin embargo los cálculos de altura se realizan tomando en cuenta la talla promedio de la vegetación nativa en el sitio de estudio. A mayor altura, la aportación debida al transporte de partículas a frecuencias altas se verá mermada, resultando en una mejora en la calidad de los datos obtenidos. Sin embargo, deben tomarse precauciones debido a que si se excede la elevación de la torre, la calidad de los datos puede decrecer de igual forma debido a que se ampliaría el área de medición más allá del sitio interés (16).

El sistema de alimentación eléctrica que consta en un banco de baterías y un panel solar, deberán permanecer separados entre 3 y 5 veces la medida de la torre de forma ortogonal a los vientos dominantes, evitando así, distorsiones en los flujos de viento (16).

Para obtener un desempeño óptimo de la EMEC, de igual forma, es necesario realizar un mantenimiento preventivo, que consta en la limpieza periódica y revisión de estado y conexión de todos los elementos que conforman la EMEC.

5.5. Datos de entrada

El objetivo principal de la estación micrometeorológica es realizar mediciones espacio-temporales de flujos de CO_2 emanantes del suelo y observar su comportamiento (cambios de cualquier magnitud) por extensos periodos de tiempo (45).

Inicialmente, durante los primeros días, se debe revisar cuidadosamente la instalación correcta de los instrumentos y que los datos recopilados sean coherentes con lo esperado en la zona de interés (basado en la época del año y en el tipo de ecosistema). Por ejemplo, a una latitud media, la medición típica de radiación solar irá de los 500 a los 900 $W m^{-2}$ (16), dato que se puede corroborar en un atlas de radiación solar. En el caso de los gases que la EMEC registrará, pueden ser muy variables con respecto a las épocas del año, lugar o condiciones meteorológicas, sin embargo, siempre es factible comparar los resultados medidos con otras áreas similares como medida comparativa.

5.6. Análisis de datos

Realizar un seguimiento detallado de las emisiones de CO_2 durante la investigación de un sistema geotermal es fundamental, ya que las emisiones resultantes son producto de procesos hidrotermales, biogénicos y antropogénicos (137). Sin embargo, se requiere conocer la correspondencia de las variables meteorológicas con flujos de CO_2 y como estas afectan los registros de concentración de este gas a través del tiempo, en el área de interés como se realiza en (66).

La población de datos generados por la EMEC consta, entonces, de entradas de datos promediados cada media hora por el sistema SmartFlux® (48 entradas por día por variable) correspondientes a los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre de 2016. Los primeros dos meses corresponden a la temporada seca y los dos últimos a la temporada de lluvia en la zona de estudio.

Con el uso de los datos generados por le EMEC se ha intentado establecer una afinidad entre los parámetros meteorológicos y las variaciones temporales de los flujos de CO_2 para lo que se han tomado muestras de la población en escalas mensuales, semanales, diarias, diurnas y nocturnas. Para estas muestras, se ha calculado su estadística básica y de igual forma se han armado matrices de correlación entre las variables empleadas, a partir de la mediana, media aritmética, media de Winsor (Winsorized mean) y la media recortada (Trimmed mean) para posteriormente ser analizadas.

6.1. Eddy Covariance: Flujos de CO_2

Medir las emisiones de CO_2 , es fundamental para establecer las zonas que presentan permeabilidad y por lo tanto, fuga de gases hacia la atmósfera (desgasificación) (138). Estas variaciones en los flujos ascendentes de CO_2 emitidos desde el suelo, son una parte fundamental en la prospección geotérmica, ya que sirven como un indicativo para determinar la ubicación de las zonas calientes del sistema HDR de Acoculco, Puebla. En relación a los flujos de CO_2 y demás gases que emanan del sistema HDR en cuestión, también es posible determinar los procesos fisicoquímicos que podrían suceder si se comienza a explotar el sistema HDR. Sin embargo, no se aborda mas del tema por que no es motivo de esta tesis.

En estudios como el realizado en Mammoth Mountain (110), se valida la correlación entre los flujos de CO_2 y otros parámetros meteorológicos, tales como la presión atmosférica y la velocidad del viento; resaltando que los diversos parámetros meteorológicos del sitio son causal de la variación en las concentraciones de los flujos de CO_2 . Asimismo en (52) se manifiesta que los gases emanantes del suelo, entre los mencionados, el CO_2 , tienen un potencial en la exploración geoquímica, sin embargo, al ser dependientes de las condiciones meteorológicas, la interpretación del comportamiento de las concentraciones puede ser un tanto complicada.

La EMEC ha medido flujos de CO_2 en el periodo del 01/06/2016 al 30/09/2016, así como los parámetros meteorológicos que se enuncian a continuación:

6. RESULTADOS

H: Calor sensible	RH: Humedad Relativa
LE: Calor latente	W speed: Velocidad de viento
CO_2 flux: Flujo de CO_2	W direction: Dirección de viento
Air_T : Temperatura ambiente	ET: Evapotranspiración
Air_P : Presión atmosférica	Rain: Precipitación

Los datos crudos medidos por la EMEC son promedios de media hora que se han realizado durante 122 días, tiempo total del periodo sobre el que se realizará el análisis.

En la realización de esta tesis no se desarrollaron pruebas de discordancia de los valores atípicos. Mas sin embargo, los datos relativos a la actividad biológica, en la mayoría de las veces son distribuciones asimétricas llenas de datos con valores desviados (99). En consecuencia, ha sido importante utilizar un método que incorpore a los valores desviados de forma no discordante y que ayude a su vez, a mitigar su impacto en la estimación, en consecuencia a las posibles insuficiencias del método de medición Eddy-Covariance.

Las propiedades de diversos estimadores de tendencia central, darán diversos resultados dependiendo de la forma que posea la distribución de los datos analizados, sin embargo la media Winsorizada es un estimador suficientemente robusto que puede hacer frente a diversas formas en la distribución.

Bajo el concepto de la ‘perspectiva extrema’, los valores desviados se rechazan antes de realizar la estimación, bajo el tenor de conocer y tener una razón clara de su existencia, siguiendo pruebas de discordancia basada en un nivel de confianza cierto (99). Por otra parte, el uso de estimadores robustos como la media Winsorizada, no eliminan los datos, sino que los acoplan y reducen su influencia. De esta manera se retiene la información que contiene la contaminación en los datos, logrando comprometer en menor medida el resultado de la estimación.

Lo último por elegir es el porcentaje de Winsorización que se aplicará según el caso de estudio. A mi parecer no se debe tomar una actitud estricta ante los valores atípicos y es por eso que los cálculos se han realizado con un 95 % de confianza, que si nos remitimos a la literatura, implica que solo el 5 % de los datos están desviados. A pesar de la definición, no necesariamente debemos eliminar estos datos, ya que todos tienen un diferente nivel de dominio sobre el resultado de la estimación, y por lo tanto, estaríamos omitiendo información importante. ‘El hombre que cierra su puerta a los errores también se la cierra a la verdad’ (130).

Por último, el nivel de Winsorización utilizado para realizar la estimación, es entonces el 5%. Siendo $\alpha = 95\%$, $\alpha_{w_{up}} = 2.5\%$ hacia los valores superiores y $\alpha_{w_{down}} = 2.5\%$ hacia los valores inferiores, según la fórmula siguiente:

$$\alpha_w = \frac{100\% - \alpha}{2} \quad (6.1)$$

6.2. Flujos de CO_2 - “Junio - Septiembre 2016”

Se ha calculado la estadística descriptiva para el periodo completo, con base en los datos crudos (sin hacer distinción entre días u horas, es decir, una sola serie de datos). Los flujos de CO_2 se registran en un intervalo de entre -228.188 y $285.346 [\mu mol s^{-1} m^{-2}]$, asimismo, presentan una media de $-0.725 [\mu mol s^{-1} m^{-2}]$ y una desviación estándar de $18.615 [\mu mol s^{-1} m^{-2}]$, según se muestra en la tabla 6.2, misma que servirá como referencia comparativa.

Utilizando la media aritmética, la mediana y en su caso métodos mas robustos como la media de Winsor y la media recortada, se han construido matrices de correlación para el periodo completo (B.1, B.2, B.3 y B.4).

Debido a que el objeto principal de esta tesis es contrastar los flujos de CO_2 contra los diversos parámetros meteorológicos, se construyó una nueva matriz (tabla 6.1) a partir de las matrices contenidas en el apéndice B, dejando solo los valores de correlación de la media aritmética, mediana, media recortada y media de Winsor de los flujos de CO_2 vs. todos los parámetros meteorológicos. Debido a que la media aritmética es muy sensible a cambios, para el análisis se escogió la media de Winsor, ya que es un estimador robusto y por lo tanto es menos sensible a los valores atípicos a diferencia por ejemplo, de la media aritmética.

La matriz muestra una alta correlación entre el flujo de CO_2 , y el calor específico (-0.944), el calor latente (-0.947), la evapotranspiración (-0.946), la temperatura del aire (-0.899) y la humedad relativa (0.871); una mediana correlación con la velocidad de viento (-0.700) y la dirección de viento (-0.504); y una baja correlación con la presión de aire (-0.184) y la lluvia (0.038). Cabe mencionar que

6. RESULTADOS

la correlación existente entre el flujo de CO_2 y la gran mayoría de variables es inversa, es decir, de signo contrario.

Al realizar una comparativa de 24 horas, se observa un marcado comportamiento diurno y nocturno, el cual se encuentra en función del inicio y del fin del día solar. Se comienza con una caída brusca a partir de las 7:30 horas, recuperando su estabilidad más o menos constante del horario nocturno, aproximadamente a las 19:30 horas.

A continuación se realiza un análisis detallado del comportamiento de las diversas variables meteorológicas y sus efectos presentados con respecto a las concentraciones en los flujos de CO_2 .

- Temperatura del Aire

En la figura 6.1 se puede observar que el aumento en la temperatura a partir del inicio del día solar tiene un efecto reductor considerable, sobre los flujos de CO_2 . El efecto se explica debido a que la temperatura acelera las reacciones químicas de la fotosíntesis, sin embargo, si la temperatura se sitúa por encima del punto óptimo, las estomas en la vegetación proceden a cerrarse, con el fin de evitar la deshidratación de las plantas, provocando que el intercambio de gases entre el medio ambiente y las plantas disminuyan, lo que se refleja en un aumento en la concentración de CO_2 en el ambiente a partir de ese punto (111).

El efecto de lo descrito con anterioridad se observa a las 11:00 horas, donde se registra un mínimo de $-8.035 [\mu mol s^{-1} m^{-2}]$ respecto al flujo de CO_2 , mientras que la temperatura observada a esa misma hora es $289.906 [^{\circ}K]$. Sin embargo, a partir de las 11:00 horas, se comienza a notar una tendencia de aumento en la concentración del flujo de CO_2 durante el día, mientras la temperatura del aire continua aumentando hasta alcanzar un máximo de $290.461 [^{\circ}K]$, a las 12:30 horas. Comprobándose de esta forma que la vegetación en Acoculco, está directamente relacionada con la concentración de los flujos de CO_2 en el área circundante.

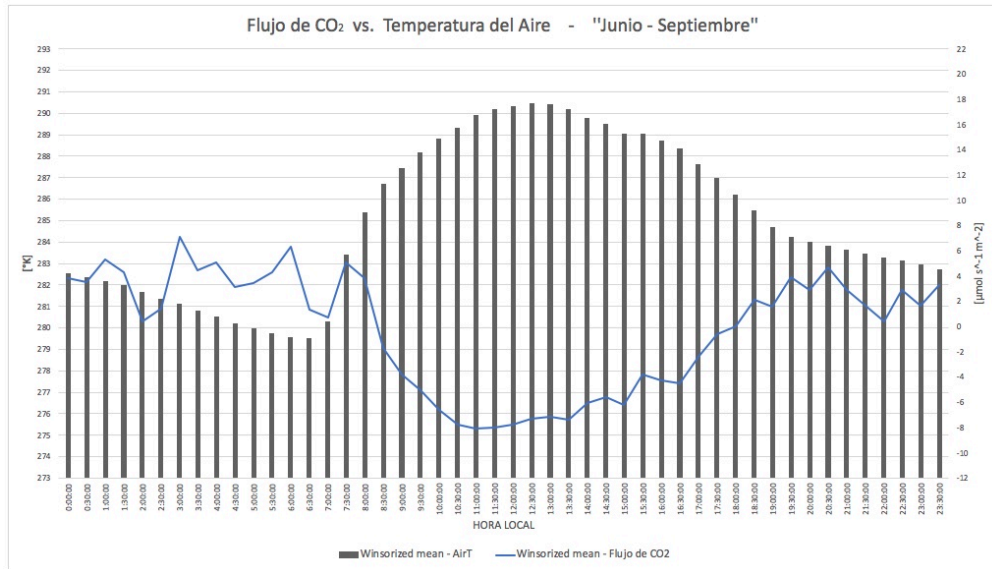


Figura 6.1: Comparación entre el flujo de CO_2 y la temperatura del aire, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

- Humedad Relativa

En la figura 6.2, se observa una correlación alta y positiva entre los flujos de CO_2 y la humedad relativa. Es decir, están íntimamente relacionados ya que, si la humedad relativa se incrementa, el flujo de CO_2 también aumenta, ocurriendo lo inverso si la humedad relativa se reduce. Lo que denota que la humedad relativa presenta un efecto inverso al encontrado por (52), en el que los autores describen que la humedad relativa, al aumentar su porcentaje de saturación en el aire, tiene el efecto de crear una barrera impermeable sobre el suelo, reduciendo el flujo de CO_2 en el ambiente. En este caso, se supondría que la textura del suelo, en la zona de estudio en Acoculco, es tan porosa que la humedad relativa incluso con altos porcentajes de saturación, no es suficiente para llenar los poros del suelo y crear la capa impermeable mencionada en (52), por lo que se puede inferir que la humedad relativa, aunque posee una alta correlación con el flujo de CO_2 , el efecto sobre el comportamiento de este último es insignificante.

6. RESULTADOS

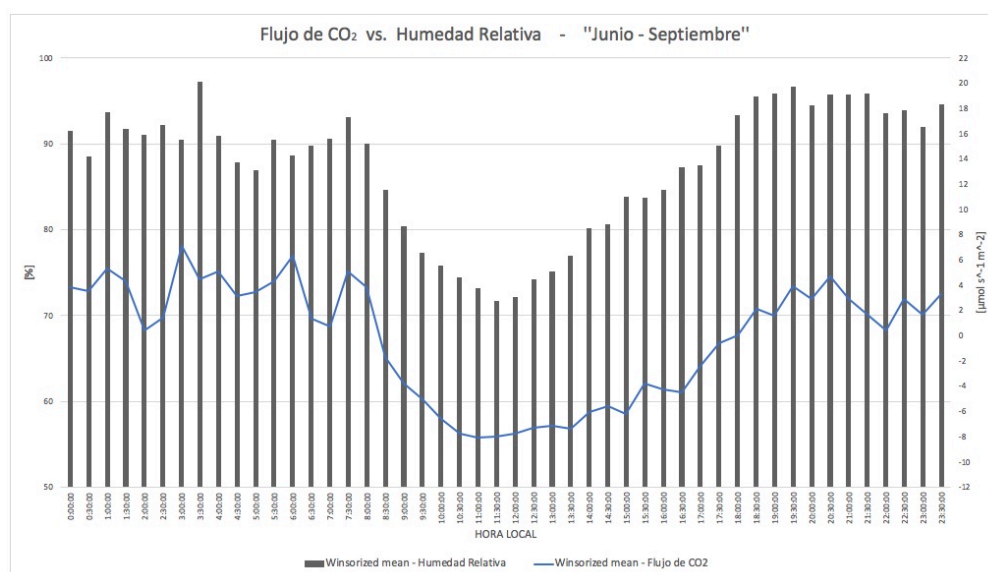


Figura 6.2: Comparación entre el flujo de CO_2 y la humedad relativa, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

■ Presión atmosférica

Esta variable es una de las más pobremente correlacionadas, ya que se mantiene relativamente estable durante el día. La medición mínima es de 72,851.356 pascales y se presenta a las 17:00 horas, enseguida tenemos la medición máxima de 73,031.878 pascales y se presenta a las 23:00 horas, según el análisis temporal de 24 horas. El delta de cambio entre la medición mínima y máxima es de 0.247%.

La presión atmosférica está profundamente relacionada con el flujo de CO_2 , en suelos porosos. En (52), se documenta que al disminuir la presión atmosférica, el CO_2 escapa con mayor facilidad del suelo. En este caso, la presión atmosférica no tiene una influencia notable sobre el flujo de CO_2 , en parte por la superficie ligeramente porosa que posee la zona de estudio en Acoculco, Puebla. Así mismo, se estima que el delta de cambio de la presión atmosférica durante el día no supera en ningún instante el 0.247%, haciendo entonces a esta variable despreciable con respecto al comportamiento del flujo de CO_2 . Estas últimas razones, son el motivo para que el flujo de CO_2 y la presión atmosférica se encuentren mínimamente correlacionadas. El comportamiento de esa variable se puede observar en la figura 6.3.

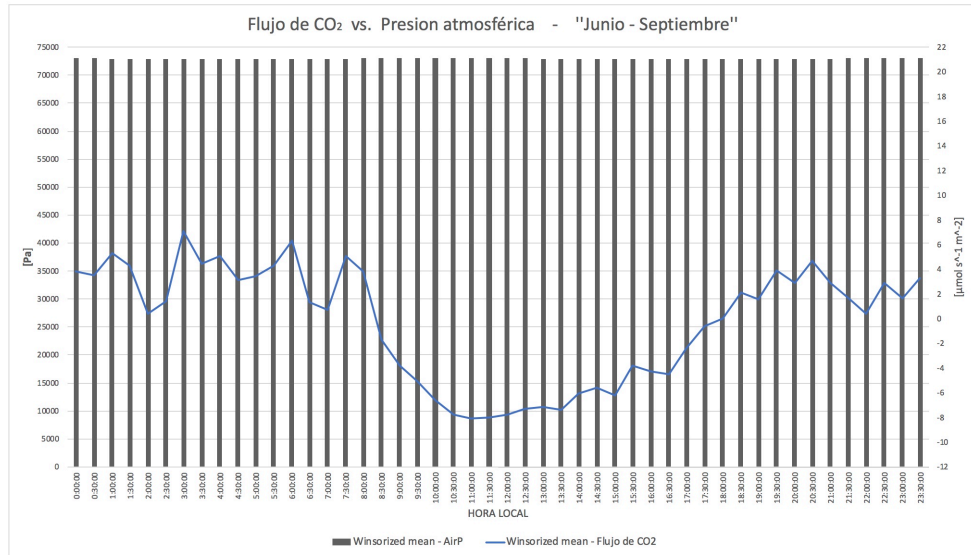


Figura 6.3: Comparación entre el flujo de CO_2 y la presión atmosférica, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

- Velocidad del viento

El origen de los vientos es causado por la diferencia de presiones, producto del calentamiento desigual de la superficie terrestre por la incidencia de la radiación solar (80). En la figura 6.4 y 6.1 se puede observar que el incremento en la velocidad del viento, es acorde y calza además con el incremento en la temperatura del aire. Estas variables tienen una alta y positiva correlación de 0.861 que se puede consultar en la tabla B.4. En lo que respecta al flujo de CO_2 y la velocidad de viento, se tiene una mediana correlación de -0.7, al igual que la temperatura del aire se incrementa con el inicio del día solar, sucede lo mismo con la velocidad de viento que alcanza su máximo a las 15:30 horas, con 2.72 ms^{-1} . Además, se sugiere que el comportamiento que se muestra en la figura 6.4 sigue lo descrito en (80), donde se discute que el decrecimiento de gases en el ambiente puede deberse a tres razones relacionadas con el incremento de la velocidad del viento: la primera, debido a que a mayor velocidad del viento los gases pueden diluirse, debido al empuje de aire sobre la superficie del suelo; la segunda, es la eliminación de la humedad en el suelo, misma que podría retener gases como el CO_2 ; y la tercera, que el viento extrae gases del suelo ya seco, consecuencia del efecto Bernoulli.

6. RESULTADOS

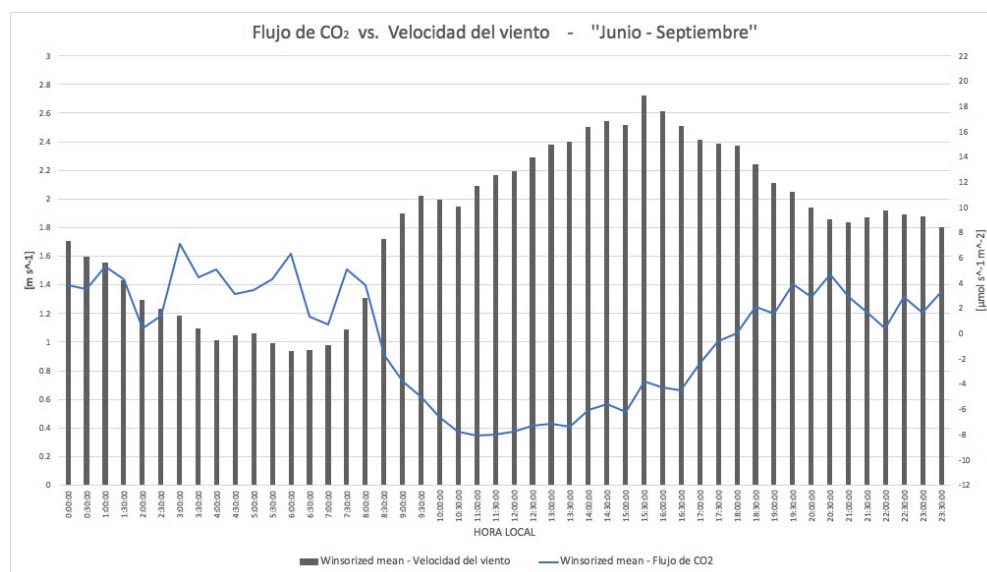


Figura 6.4: Comparación entre el flujo de CO_2 y la velocidad del viento, en el sistema geotérmico de Aocolco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

■ Precipitación

Es la variable meteorológica con menor correlación, siendo esta 0.038. Lo anterior tiene relevancia en el hecho de que el periodo de tiempo en el que se realiza este análisis, corresponde al periodo de secas en la zona de estudio de Aocolco, por lo que lluvia es relativamente escasa y las mediciones no fueron suficientes para ser correlacionadas con el flujo de CO_2 . El comportamiento de esta variable con respecto al flujo de CO_2 se encuentra gráficamente en la figura 6.5.

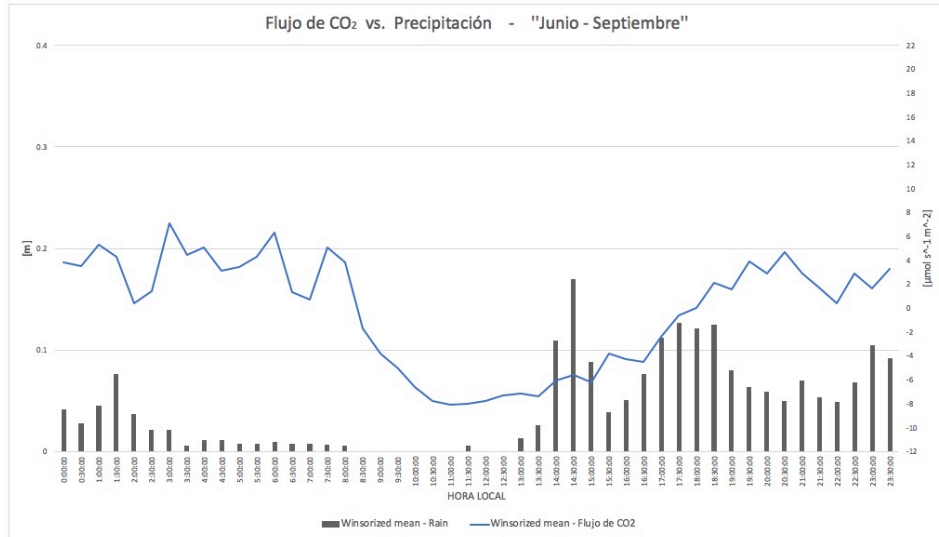


Figura 6.5: Comparación entre el flujo de CO_2 y la precipitación, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

- Dirección del viento

La dirección predominante de los vientos se encuentra orientada entre los 90 y 160 grados medidos desde el norte en dirección horaria, es decir, hacia el sureste. Esta variable tiene una correlación con el flujo de CO_2 de -0.504 y se puede observar el comportamiento de éstas variables en la figura 6.6. Durante las primeras horas de la mañana (desde las 8:00 a.m. hasta las 13:00 horas), se observa un cambio sustancial sobre el flujo de CO_2 , mismo que coincide con una alteración en la dirección del viento predominante. En este horario, es donde se tiene la mayor diferencia en la dirección del viento (cargada más hacia el sur).

Se puede decir que el viento en la zona es relativamente homogéneo, por lo que no se transporta aire cargado con concentraciones de CO_2 relativamente diferentes a las de la zona de estudio. Sin embargo, tiene sentido que las rachas de viento matutinas provengan del Este, ya que es el punto cardinal por donde da inicio del día solar, siendo toda la zona que se encuentre al Este, la primera en recibir radiación solar, calentándose de manera no uniforme. Explicado por Manwell en (80), los vientos son el producto del calentamiento no uniforme de la tierra, por la incidencia de la radiación solar.

6. RESULTADOS

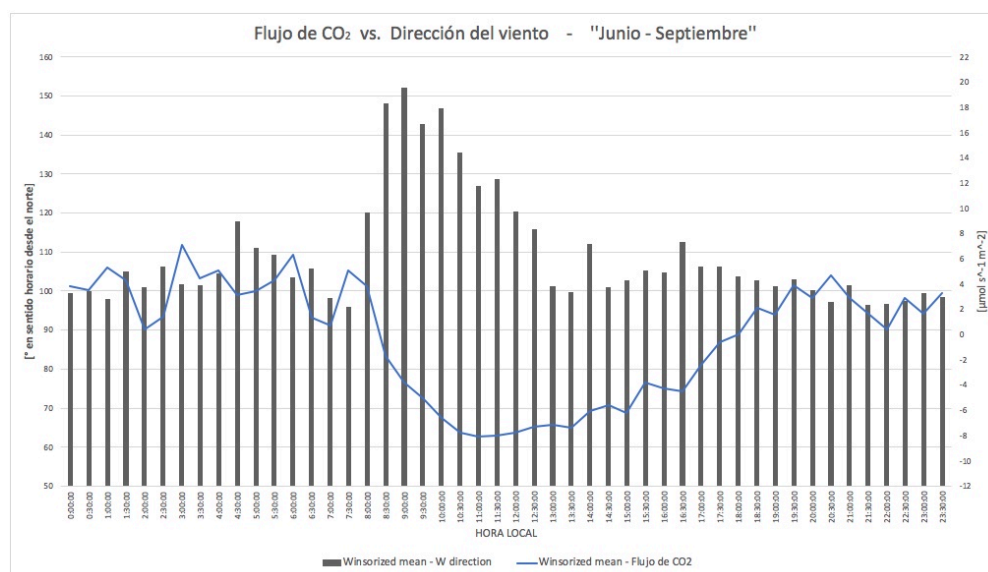


Figura 6.6: Comparación entre el flujo de CO_2 y la dirección del viento, en el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

■ Evapotranspiración

La evapotranspiración de las plantas está en función de las propiedades hidráulicas del suelo y como tal de las funciones climáticas (39). En estudios como el realizado por Melendres en (3), se denota que en las zonas con mayor disponibilidad de agua en el suelo, la asimilación de CO_2 es más alta, mostrando valores negativos. De la misma forma se pronuncia en (94), que de existir un incremento en el contenido de agua en el suelo, la razón de evapotranspiración será de mayor magnitud. Por consecuencia, al aumentar la tasa de evapotranspiración, el flujo de CO_2 tendrá que presentar también valores negativos.

Tomando nota de lo anterior, se tiene una correlación de -0.946 entre esta variable vs. el flujo de CO_2 , misma que describe a la figura 6.7, donde se percibe que la aseveración hecha en (3), es correcta, ya que al incrementarse la evapotranspiración, se observa que comienza un proceso de secuestro de CO_2 , producto del proceso de fotosíntesis de la fase diurna debido al incremento en la radiación, consecuencia del inicio del día solar(94). Las tasas de captura de CO_2 están vinculadas con la transpiración de las plantas existentes en la zona de estudio, por medio del proceso de difusión molecular en los estomas, por lo que este efecto será mas pronunciado en zonas con

mayor cantidad de vegetación, como es el caso de la zona de estudio en Acoaculco.

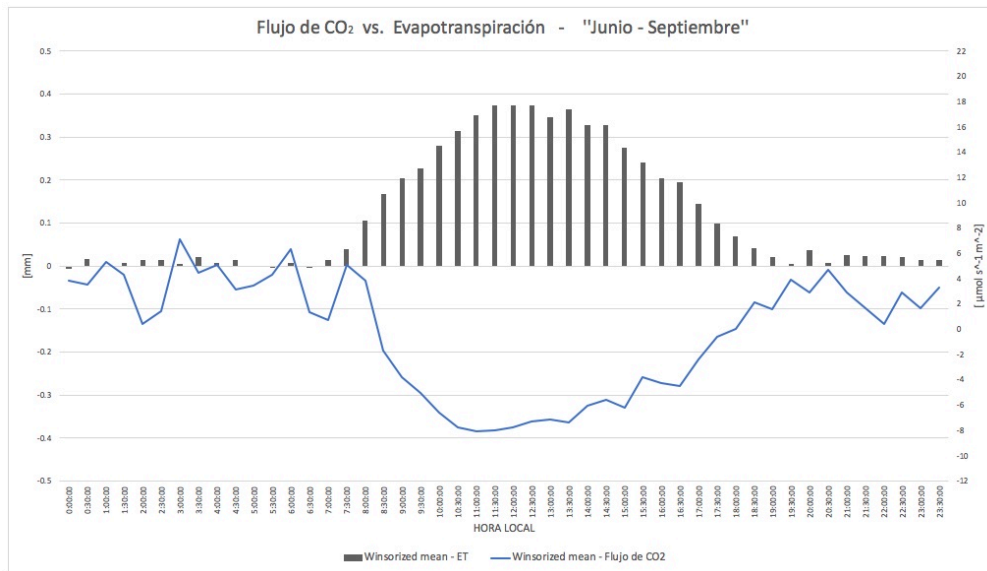


Figura 6.7: Comparación entre el flujo de CO_2 y la evapotranspiración, en el sistema geotérmico de Acoaculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

■ Calor Latente

El flujo de calor latente es la energía transferida desde el ecosistema hacia la atmósfera, cuando el agua es transpirada por las plantas o evaporada por el suelo. Para el caso en el que se presentan magnitudes de signo negativo (horario nocturno), se define que el agua es transferida desde la atmósfera hacia el ecosistema mediante la condensación del vapor de agua. (41). En la figura 6.8 se observa que existen valores negativos (mínimos) en horario nocturno y positivos (máximos) durante el diurno. Los máximos se presentan entre las 11:30 y las 13:30 horas. En este particular, se observa que el calor latente es mucho más pronunciado en el horario diurno, alcanzando máxima de hasta 102.606 Wm^{-2} a las 13:30 horas. Además, se observa que el calor latente es más grande en magnitud con respecto al calor sensible, debido a la alta disponibilidad de humedad que existe en el suelo para evaporarse en el ambiente, así como de existir una cobertura de vegetación amplia. En caso de que el agua disponible fuera muy limitada, entonces el calor sensible sería más grande en magnitud a diferencia del calor latente.

6. RESULTADOS

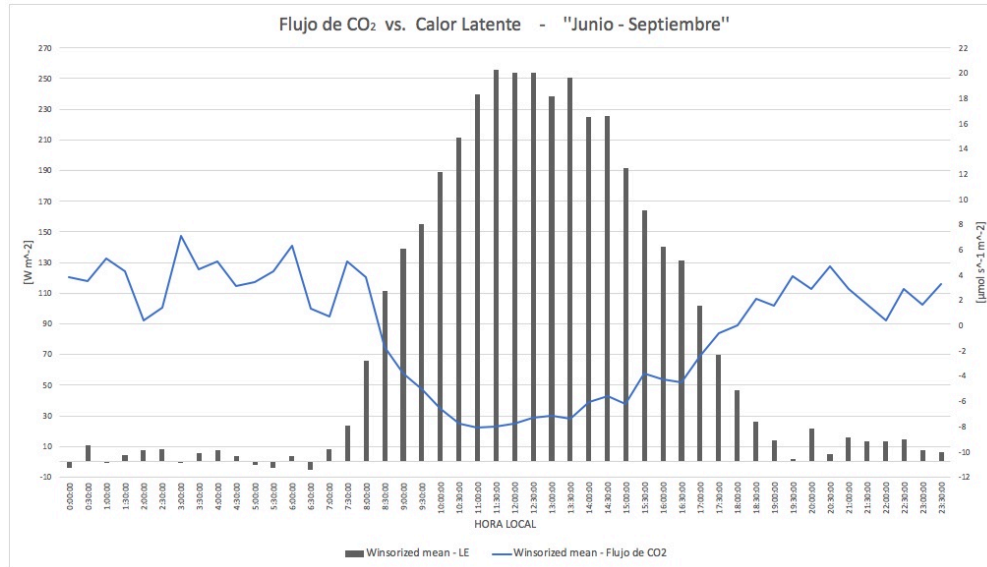


Figura 6.8: Comparación entre el flujo de CO_2 y el calor latente, en el sistema geotérmico de Aocolco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

■ Calor Sensible

Esta variable es dependiente del delta de temperatura entre la superficie y el aire atmosférico. Si el signo es positivo representa una pérdida de calor desde el suelo hacia la atmósfera y contrariamente a esto, si es negativo, es señal de que existe una ganancia de calor sobre el suelo. Su comportamiento se puede observar en la figura 6.9. Al igual que el Calor Latente, se observa que existen valores negativos (mínimos) en horario nocturno y positivos(máximos) durante el diurno. Los máximos se presentan entre las 11:30 y las 13:30 horas. En este caso el calor sensible es menor en magnitud, en referencia con el calor latente, debido a que la zona de estudio se encuentra ubicada dentro de un bosque y la mayor cantidad de hojas favorece la transpiración de la vegetación, favoreciendo en mayor medida la transferencia de calor mediante el calor latente (41). En ambos casos, tanto el calor latente como el calor sensible, controlan la magnitud de la evapotranspiración, misma que tiene injerencia sobre el flujo de CO_2 , cuyo proceso se describe anteriormente.

6.2 Flujos de CO_2 - "Junio - Septiembre 2016"

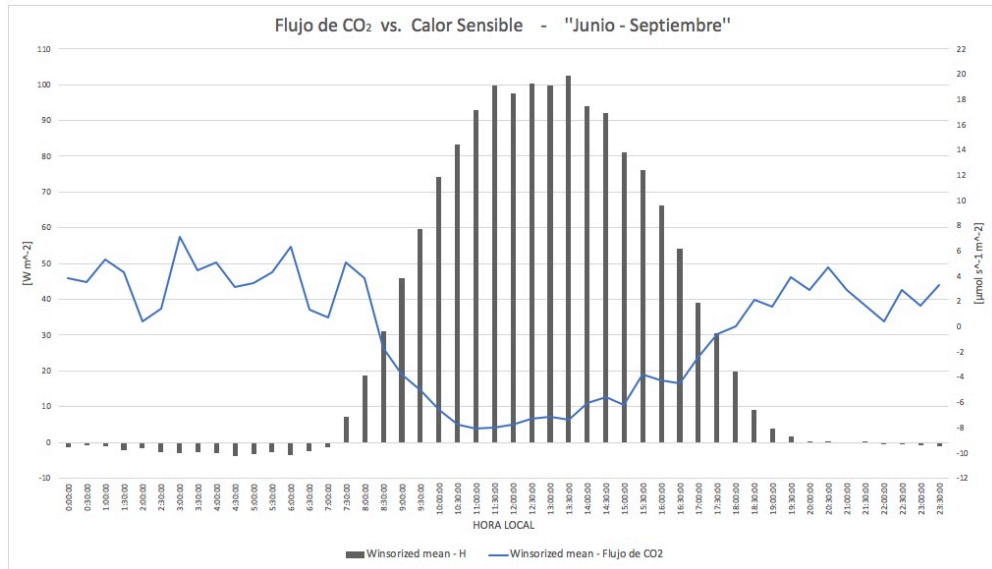


Figura 6.9: Comparación entre el flujo de CO_2 y el calor sensible, en el sistema geotérmico de Acapulco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

6. RESULTADOS

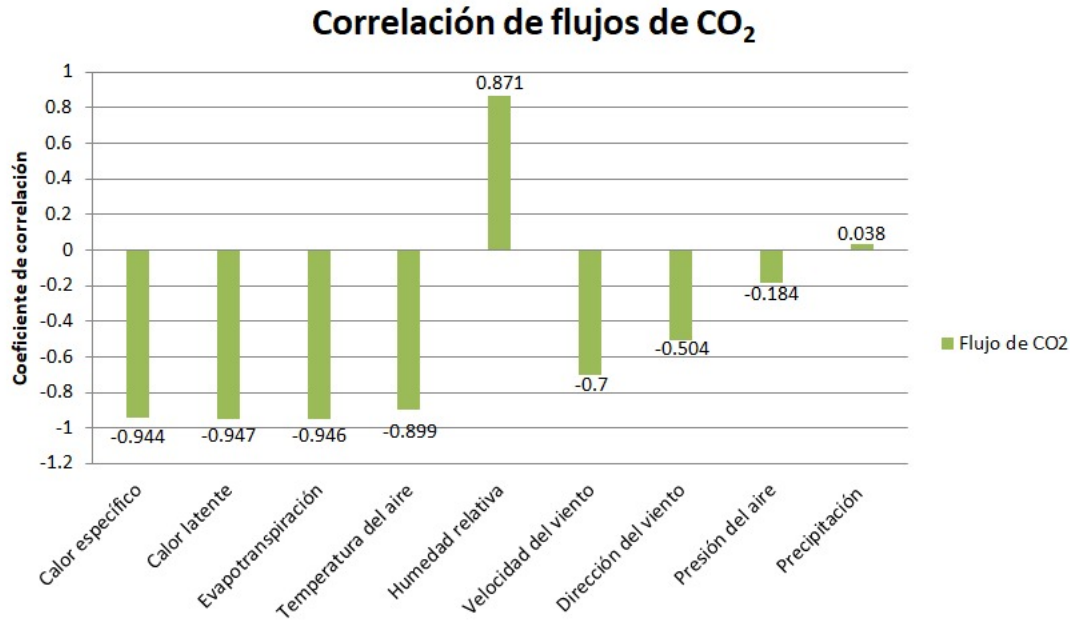


Figura 6.10: Correlación de flujo de CO₂ - Base de 24 horas - “Junio - Septiembre 2016”

Matriz de correlación - Flujo de CO₂ - "Junio - Septiembre 2016"

	CO ₂ flux (Media aritmética)	CO ₂ flux (Recortada)	CO ₂ flux (Winsor)	CO ₂ flux (Mediana)
H	-0.899	-0.970	-0.944	-0.969
LE	-0.919	-0.972	-0.947	-0.977
CO ₂ flux	1.000	1.000	1.000	1.000
Air T	-0.863	-0.920	-0.899	-0.924
Air P	-0.209	-0.166	-0.184	-0.128
RH	0.838	0.920	0.871	0.963
W direction	-0.501	-0.524	-0.504	-0.599
W speed	-0.668	-0.690	-0.700	-0.653
Rain	-0.017	0.075	0.038	0.000
ET	-0.922	-0.972	-0.946	-0.976

Tabla 6.1: Matriz de correlación de flujo de CO₂ - Base de 24 horas - “Junio - Septiembre 2016”

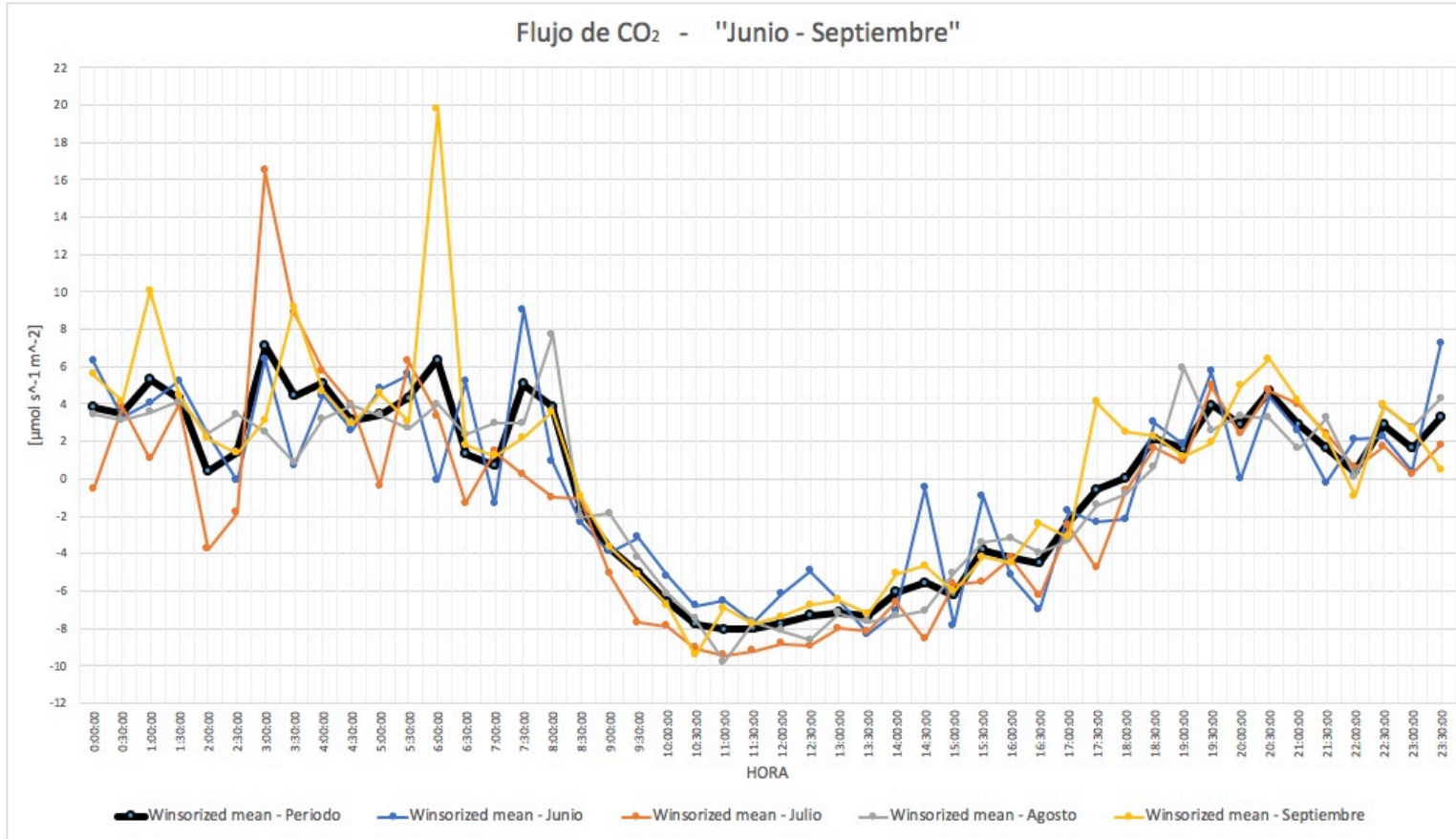


Figura 6.11: Flujo de CO₂ del periodo “Junio - Septiembre” 2016, vs. flujo de CO₂ de Junio, Julio, Agosto y Septiembre; del sistema geotérmico de Aocolco, Puebla.

Unidades	n	Min	Max	Parámetros estadísticos de tendencia central				Parámetros estadísticos de dispersión			
				Mean \bar{X}	Median \tilde{x}	Estimadores Robustos		Variance σ^2	Std.Dev. σ	Standard (Error)	
						Trimmed mean (5%)	Winsorized mean (5%)				
H	[Wm^{-2}]	5844	-1359.535	3377.480	30.797	5.479	26.008	29.578	7519.162	86.713	1.134
LE	[Wm^{-2}]	4229	-698.402	2694.951	101.608	55.569	95.155	101.138	18757.193	136.957	2.106
CO ₂ flux	[$\mu mol \cdot s^{-1} m^{-2}$]	4866	-228.188	285.346	-0.725	-0.738	-1.263	-0.995	346.517	18.615	0.267
Air T	[$^{\circ}K$]	5844	272.874	295.784	285.008	284.472	285.043	285.029	17.402	4.172	0.055
Air P	[Pa]	5844	72498.163	73325.677	72945.602	72948.693	72947.527	72946.345	18516.299	136.075	1.780
ET	[mm]	4229	-1.015	3.913	0.148	0.081	0.139	0.148	0.040	0.200	0.003
RH	[$\%$]	3980	4.462	100.000	85.218	90.872	87.001	85.942	308.653	17.569	0.278
W speed	[ms^{-1}]	5844	0.018	5.399	1.837	1.757	1.804	1.822	1.172	1.082	0.014
W direction	[$^{\circ}$]	5844	0.324	359.670	115.571	96.211	109.117	115.164	4130.445	64.269	0.841
Rain	[mm]	5844	0.000	15.700	0.095	0.000	0.013	0.032	0.000	0.532	0.007

Tabla 6.2: Parámetros estadísticos de tendencia central y dispersión, del sistema geotérmico de Acoculco, Puebla (Periodo Junio - Septiembre 2016.)

Capítulo 7

Conclusiones

1. Se observa un patrón de reducción del flujo de CO_2 desde las primeras horas de la mañana (el inicio del día solar) y hasta el ocaso (desde las 8:00 y hasta las 19:30 horas). Durante la noche la concentración de CO_2 se eleva nuevamente con algunas variaciones. Esto se debe a que la vegetación es un "sumidero" natural y que durante el día absorbe el CO_2 presente en la atmósfera mediante su proceso de fotosíntesis, siendo el caso inverso durante la noche, liberando CO_2 al ambiente (128). Es decir, el ecosistema actúa como un secuestrador natural de CO_2 durante el horario diurno.
2. La temperatura del aire juega un papel sustancial en el control del flujo de CO_2 , debido a que puede funcionar como un acelerador del proceso de fotosíntesis. Sin embargo, al sobrepasar la temperatura ideal de $289.906^\circ K$, las estomas de las plantas se cierran como una medida que evita la deshidratación debido a la transpiración por medio de las hojas. En este punto el intercambio de gases entre el ecosistema y el aire atmosférico disminuye, lo que da pie a que se aumenten las concentraciones de CO_2 .
3. La humedad no afecta en gran medida al flujo de CO_2 , debido a que podría existir una porosidad alta en la zona de estudio ubicada en Acoculco y para la cual se tendrá que realizar una ampliación de estudios. La razón es simple, aunque se tienen porcentajes de humedad relativa superiores al 70 % todo el día, y por las noches se supera el 90 %, no se crea una capa impermeable sobre el suelo que retarde la salida del flujo de CO_2 , como se menciona en (111).
4. De igual forma que la humedad relativa, la presión atmosférica no genera

7. CONCLUSIONES

grandes afectaciones en el comportamiento del flujo de CO_2 , ya que los cambios que la presión atmosférica presenta son en magnitud menores al 1 %.

5. Se sugiere que la injerencia que tiene la velocidad del viento sobre el flujo de CO_2 , ocasiona el decrecimiento de gases en el ambiente puede deberse a tres razones relacionadas con el incremento de la velocidad del viento: la primera, debido a que a mayor velocidad del viento los gases pueden diluirse debido al empuje de aire sobre la superficie del suelo; la segunda, es la eliminación de la humedad en el suelo, misma que podría retener gases como el CO_2 ; y la tercera, que el viento extrae gases del suelo ya seco, consecuencia del efecto Bernoulli.
6. No ha sido posible evaluar a la lluvia en el estudio, ya que a pesar de que en la zona de Acoculco llueve todo el año, la temporalidad en que se realizan las mediciones corresponde a la temporada de secas y no se han generado suficientes datos que correlacionen a la lluvia como una condicionante del comportamiento del flujo de CO_2 .
7. En la zona de estudio se observan vientos provenientes del Sureste, mismos que están medianamente correlacionados con el flujo de CO_2 . Desde las 8:00 y hasta las 12:00 horas, los vientos están más cargados hacia el sur, sin embargo no parecen alterar el comportamiento del flujo de CO_2 . Ya que la máxima racha de viento esta registrada a las 9:00 horas y la mínima respecto del flujo de CO_2 a las 11:00 horas, además de no seguir una tendencia que permita identificar una dependencia entre estas variables.
8. La evapotranspiración se encuentra restringida por la disponibilidad de agua en el suelo. Las tasas de captura de CO_2 están vinculadas con la transpiración de las plantas, por medio del proceso de difusión molecular en los estomas, por lo que este efecto sera mas pronunciado en zonas con mayor cantidad de vegetación.
9. El flujo de calor latente es la energía transferida desde el ecosistema hacia la atmósfera, cuando el agua es transpirada por las plantas o evaporada por el suelo. En el caso de tener signo positivo, el flujo de energía va desde el ecosistema hacia la atmósfera, en caso de ser de signo negativo, el efecto es contrario. Al incrementarse la evapotranspiración, se observa que comienza un proceso de secuestro de CO_2 , producto del proceso de fotosíntesis de la fase diurna debido al incremento en la radiación, producto del inicio del día solar.

-
10. El calor sensible es menor en magnitud, en referencia con el calor latente, debido a que la zona de estudio se encuentra ubicada dentro de un bosque y la mayor cantidad de hojas favorece la transpiración de la vegetación, favoreciendo en mayor medida la transferencia de calor mediante el calor latente.
 11. Werner deja en claro que la alta correlación del flujo de CO_2 hallado entre el calor latente y el calor específico, es una muestra de la existencia de una gran componente volcánica en los flujos (139). Por lo que se puede inferir entonces que, en la zona de estudio, los flujos de CO_2 están influenciados por emanaciones de CO_2 provenientes directamente del sistema magmático que emanan a la superficie a través de microfracturas en la tierra.
 12. El flujo de calor latente se define como la transferencia de vapor de agua entre la atmósfera y la superficie terrestre, se encuentra fuertemente relacionada con el contenido de humedad y temperatura del suelo y del aire, así como de la velocidad del viento y del gradiente de temperatura de la atmósfera. Es importante resaltar que la vegetación tiene un papel importante, ya que tiene la capacidad de transferir humedad por medio de las raíces, desde las capas menos someras del suelo, a la atmósfera. El flujo de calor sensible es definido como la estimación de transferencia de calor entre la atmósfera y la superficie, se encuentra relacionada con la diferencia de temperatura entre ellas, asimismo depende de la velocidad del viento y de la vegetación.
 13. Sobre las diferentes correlaciones encontradas ya descritas con anterioridad, todas son sumamente relevantes, ya que permiten determinar la relación existente entre el CO_2 y su dependencia hacia otras variables. En general, entender los coeficientes de correlación es fundamentales en la predicción del comportamiento del CO_2 , si una u otra variable cambia en función del tiempo (104).
 14. Para generar causalidad, ha sido menester recabar información que justifique las fluctuaciones de CO_2 con respecto de las otras variables en diversos trabajos, ya que la correlación no necesariamente vincula a las variables, haciendo al CO_2 dependiente de estas y puede darse el caso de que solo existan casualidades (104).
 15. El flujo de CO_2 es un indicador primordial en la prospección de sistemas geotérmicos, ya que proporciona información referente a la desgasificación de la zona de estudio. El promedio del periodo de estudio entre emisión y

7. CONCLUSIONES

captura de CO_2 en Acoculco, resultado del análisis de datos de esta tesis es de $-0.725 [\mu mol m^{-2} \text{ periodo}]$ o bien su equivalente de $-2.901E - 5$ [gramos m^{-2} periodo]. Siendo que el balance de flujo de CO_2 es casi cero, es decir, el ecosistema de Acoculco absorbe casi en la misma proporción el CO_2 lo que emite.

16. Comparando contra otros valores de referencia en la misma zona de estudio, donde se detalla un valor medio de 10.22 [gramos m^{-2} día] (50), se estima entonces que existe un bajo o casi nulo flujo de CO_2 proveniente del sistema geotérmico HDR, lo que denota y confirma que el sistema está sellado y tiene muy baja permeabilidad que permita su desgasificación.
17. Se espera que los resultados mostrados en la presente tesis, contribuyan a mejorar el entendimiento del comportamiento del flujo de CO_2 en el medio ambiente y el efecto que tienen las diversas variables meteorológicas sobre el mismo, durante la etapa de exploración geotérmica.

Apéndice A

Tabla de nomenclaturas

A. TABLA DE NOMENCLATURAS

°C	Grado Celsius	Hz	Hertz
°K	Grado Kelvin	J	Joule
³ HE	Isotopo de Helio	K ⁺	Ion de Potasio
Ag	Plata	KM	Kilometro
As	Arsénico	km ²	Kilómetro cuadrado
B	Boro	Li	Litio
Br	Bromo	m ²	Metro cuadrado
Ca ²⁺	Ion de Calcio	Mg ²⁺	Ion de Magnesio
CH ₄	Metano	mGal	Mega Gal
Cl	Cloro	μ mol	Micro Mol
CO	Monóxido de carbono	MW	Mega Watt
CO ₂	Dióxido de carbono	N ₂	Nitrógeno
CO ₃	Trióxido de carbono	Na ⁺	Ion de Sodio
Cs	Cesio	NH ₃	Amoniaco
Cu	Cobre	Pb	Plomo
Eu	Oro	pH	Potencial de Hidrógeno
Fe	Hierro	S	Azufre
g	Gramos	s	segundo
H ₂	Hidrogeno	Sn	Estaño
H ₂ CO ₃	Ácido Carbónico	SO ₂	Dióxido de Azufre
H ₂ O	Agua	Ti	Titanio
H ₂ S	Sulfuro de Hidrógeno	TJ	Tera Joule
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico	W	Watt
HCl	Ácido clorhídrico	Wh	Watt-hora

Tabla A.1: Nomenclaturas

Apéndice B

Matrices de correlación del periodo

“Junio - Septiembre 2016”

Base horaria

Matriz de correlación - Media aritmética - (Junio - Septiembre 2016)

	H	LE	CO ₂ flux	Air T	Air P	RH	W direction	W speed	LW in	LW out	Rain	ET
H	1	0.977178	-0.899	0.908	0.128	-0.879	0.450	0.686	0.265	0.957	0.006	0.265
LE	0.977178	1	-0.919	0.911	0.190	-0.913	0.505	0.652	0.208	0.959	-0.039	0.208
CO ₂ flux	-0.89899	-0.918841	1.000	-0.863	-0.209	0.838	-0.501	-0.668	-0.239	-0.896	-0.017	-0.239
Air T	0.907952	0.911419	-0.863	1.000	0.138	-0.731	0.436	0.863	0.460	0.980	0.177	0.460
Air P	0.127568	0.189595	-0.209	0.138	1.000	-0.306	0.323	-0.052	-0.261	0.136	-0.386	-0.261
RH	-0.879167	-0.912641	0.838	-0.731	-0.306	1.000	-0.638	-0.388	0.118	-0.806	0.297	0.118
W direction	0.450363	0.505245	-0.501	0.436	0.323	-0.638	1.000	0.113	-0.474	0.404	-0.452	-0.474
W speed	0.68639	0.651681	-0.668	0.863	-0.052	-0.388	0.113	1.000	0.792	0.825	0.536	0.792
Rain	0.006439	-0.039393	-0.017	0.177	-0.386	0.297	-0.452	0.536	0.767	0.138	1.000	0.767
ET	0.976315	0.999379	-0.922	0.913	0.198	-0.908	0.505	0.654	0.212	0.960	-0.041	0.212

Tabla B.1: Matriz de correlación - Media aritmética - Base horaria - “Junio - Septiembre 2016”

Matriz de correlación - Mediana - (Junio - Septiembre 2016)

	H	LE	CO ₂ flux	Air T	Air P	RH	W direction	W speed	LW in	LW out	Rain	ET
H	1	0.9939	-0.969	0.916	0.145	-0.965	0.543	0.669	0.008	0.965	0.000	0.993
LE	0.9939	1	-0.977	0.922	0.196	-0.982	0.557	0.645	-0.051	0.963	0.000	1.000
CO ₂ flux	-0.96912	-0.977396	1.000	-0.924	-0.128	0.963	-0.599	-0.653	0.084	-0.943	0.000	-0.976
Air T	0.916442	0.92196	-0.924	1.000	0.166	-0.885	0.505	0.839	0.202	0.981	0.000	0.920
Air P	0.14454	0.196076	-0.128	0.166	1.000	-0.292	-0.118	-0.119	-0.309	0.146	0.000	0.206
RH	-0.965384	-0.982345	0.963	-0.885	-0.292	1.000	-0.595	-0.561	0.189	-0.924	0.000	-0.983
W direction	0.543033	0.5573	-0.599	0.505	-0.118	-0.595	1.000	0.464	-0.172	0.539	0.000	0.557
W speed	0.669376	0.644971	-0.653	0.839	-0.119	-0.561	0.464	1.000	0.627	0.814	0.000	0.639
Rain	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ET	0.992929	0.999671	-0.976	0.920	0.206	-0.983	0.557	0.639	-0.058	0.961	0.000	1.000

Tabla B.2: Matriz de correlación - Mediana - Base horaria - “Junio - Septiembre 2016”

Matriz de correlación - Media recortada - (Junio - Septiembre 2016)

	H	LE	CO ₂ flux	Air T	Air P	RH	W direction	W speed	LW in	LW out	Rain	ET
H	1	0.995499	-0.970	0.929	0.139	-0.922	0.439	0.694	0.215	0.975	-0.080	0.995
LE	0.995499	1	-0.972	0.928	0.190	-0.937	0.492	0.666	0.165	0.970	-0.113	1.000
CO ₂ flux	-0.969564	-0.972089	1.000	-0.920	-0.166	0.920	-0.524	-0.690	-0.171	-0.952	0.075	-0.972
Air T	0.929432	0.927729	-0.920	1.000	0.143	-0.786	0.428	0.859	0.402	0.981	0.126	0.926
Air P	0.138629	0.189878	-0.166	0.143	1.000	-0.294	0.350	-0.069	-0.274	0.136	-0.420	0.195
RH	-0.922414	-0.937455	0.920	-0.786	-0.294	1.000	-0.637	-0.441	0.121	-0.850	0.336	-0.939
W direction	0.439149	0.491697	-0.524	0.428	0.350	-0.637	1.000	0.094	-0.537	0.395	-0.409	0.497
W speed	0.694184	0.666323	-0.690	0.859	-0.069	-0.441	0.094	1.000	0.758	0.820	0.508	0.660
Rain	-0.079967	-0.112929	0.075	0.126	-0.420	0.336	-0.409	0.508	0.739	0.067	1.000	-0.121
ET	0.994676	0.999841	-0.972	0.926	0.195	-0.939	0.497	0.660	0.157	0.968	-0.121	1.000

Tabla B.3: Matriz de correlación - Media recortada - Base horaria - “Junio - Septiembre 2016”

Matriz de correlación - Media de Winsor - (Junio - Septiembre 2016)

	H	LE	CO ₂ flux	Air T	Air P	RH	W direction	W speed	LW in	LW out	Rain	ET
H	1	0.994584	-0.944	0.930	0.135	-0.898	0.447	0.700	0.269	0.976	-0.045	0.993
LE	0.994584	1	-0.947	0.926	0.191	-0.915	0.497	0.668	0.217	0.969	-0.086	1.000
CO ₂ flux	-0.943772	-0.946747	1.000	-0.899	-0.184	0.871	-0.504	-0.700	-0.247	-0.934	0.038	-0.946
Air T	0.930481	0.926412	-0.899	1.000	0.136	-0.750	0.417	0.861	0.451	0.980	0.135	0.924
Air P	0.134594	0.191193	-0.184	0.136	1.000	-0.305	0.311	-0.062	-0.269	0.131	-0.377	0.196
RH	-0.898436	-0.915421	0.871	-0.750	-0.305	1.000	-0.648	-0.405	0.101	-0.821	0.344	-0.916
W direction	0.447445	0.497371	-0.504	0.417	0.311	-0.648	1.000	0.074	-0.513	0.393	-0.463	0.503
W speed	0.699797	0.668372	-0.700	0.861	-0.062	-0.405	0.074	1.000	0.788	0.822	0.514	0.662
Rain	-0.04494	-0.086042	0.038	0.135	-0.377	0.344	-0.463	0.514	0.754	0.086	1.000	-0.095
ET	0.993441	0.999742	-0.946	0.924	0.196	-0.916	0.503	0.662	0.208	0.967	-0.095	1.000

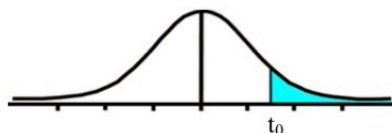
Tabla B.4: Matriz de correlación - Media de Winsor - Base horaria - “Junio - Septiembre 2016”

Apéndice C

Tabla t de Student

C. TABLA T DE STUDENT

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

Figura C.1: Tabla t-Student (31).

50	0.6794	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
51	0.6793	1.2984	1.6753	2.0076	2.4017	2.6757
52	0.6792	1.2980	1.6747	2.0066	2.4002	2.6737
53	0.6791	1.2977	1.6741	2.0057	2.3988	2.6718
54	0.6791	1.2974	1.6736	2.0049	2.3974	2.6700
55	0.6790	1.2971	1.6730	2.0040	2.3961	2.6682
56	0.6789	1.2969	1.6725	2.0032	2.3948	2.6665
57	0.6788	1.2966	1.6720	2.0025	2.3936	2.6649
58	0.6787	1.2963	1.6716	2.0017	2.3924	2.6633
59	0.6787	1.2961	1.6711	2.0010	2.3912	2.6618
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603
61	0.6785	1.2956	1.6702	1.9996	2.3890	2.6589
62	0.6785	1.2954	1.6698	1.9990	2.3880	2.6575
63	0.6784	1.2951	1.6694	1.9983	2.3870	2.6561
64	0.6783	1.2949	1.6690	1.9977	2.3860	2.6549
65	0.6783	1.2947	1.6686	1.9971	2.3851	2.6536
66	0.6782	1.2945	1.6683	1.9966	2.3842	2.6524
67	0.6782	1.2943	1.6679	1.9960	2.3833	2.6512
68	0.6781	1.2941	1.6676	1.9955	2.3824	2.6501
69	0.6781	1.2939	1.6672	1.9949	2.3816	2.6490
70	0.6780	1.2938	1.6669	1.9944	2.3808	2.6479
71	0.6780	1.2936	1.6666	1.9939	2.3800	2.6469
72	0.6779	1.2934	1.6663	1.9935	2.3793	2.6458
73	0.6779	1.2933	1.6660	1.9930	2.3785	2.6449
74	0.6778	1.2931	1.6657	1.9925	2.3778	2.6439
75	0.6778	1.2929	1.6654	1.9921	2.3771	2.6430
76	0.6777	1.2928	1.6652	1.9917	2.3764	2.6421
77	0.6777	1.2926	1.6649	1.9913	2.3758	2.6412
78	0.6776	1.2925	1.6646	1.9908	2.3751	2.6403
79	0.6776	1.2924	1.6644	1.9905	2.3745	2.6395
80	0.6776	1.2922	1.6641	1.9901	2.3739	2.6387
81	0.6775	1.2921	1.6639	1.9897	2.3733	2.6379
82	0.6775	1.2920	1.6636	1.9893	2.3727	2.6371
83	0.6775	1.2918	1.6634	1.9890	2.3721	2.6364
84	0.6774	1.2917	1.6632	1.9886	2.3716	2.6356
85	0.6774	1.2916	1.6630	1.9883	2.3710	2.6349
86	0.6774	1.2915	1.6628	1.9879	2.3705	2.6342
87	0.6773	1.2914	1.6626	1.9876	2.3700	2.6335
88	0.6773	1.2912	1.6624	1.9873	2.3695	2.6329
89	0.6773	1.2911	1.6622	1.9870	2.3690	2.6322
90	0.6772	1.2910	1.6620	1.9867	2.3685	2.6316
91	0.6772	1.2909	1.6618	1.9864	2.3680	2.6309
92	0.6772	1.2908	1.6616	1.9861	2.3676	2.6303
93	0.6771	1.2907	1.6614	1.9858	2.3671	2.6297
94	0.6771	1.2906	1.6612	1.9855	2.3667	2.6291
95	0.6771	1.2905	1.6611	1.9852	2.3662	2.6286
96	0.6771	1.2904	1.6609	1.9850	2.3658	2.6280
97	0.6770	1.2903	1.6607	1.9847	2.3654	2.6275
98	0.6770	1.2903	1.6606	1.9845	2.3650	2.6269
99	0.6770	1.2902	1.6604	1.9842	2.3646	2.6264
100	0.6770	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259
∞	0.6745	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758

Figura C.2: Tabla t-Student (continuación) (31).

Apéndice D

Valor F de la distribución de Fisher

$1 - \alpha = 0.9$ v_1 = grados de libertad del numerador
 $1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$ v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	39.864	49.500	53.593	55.833	57.240	58.204	58.906	59.439	59.857	60.195	60.473	60.705	60.902	61.073	61.220	61.350	61.465	61.566	61.658	61.740
2	8.526	9.000	9.162	9.243	9.293	9.326	9.349	9.367	9.381	9.392	9.401	9.408	9.415	9.420	9.425	9.429	9.433	9.436	9.439	9.441
3	5.538	5.462	5.391	5.343	5.309	5.285	5.266	5.252	5.240	5.230	5.222	5.216	5.210	5.205	5.200	5.196	5.193	5.190	5.187	5.184
4	4.545	4.325	4.191	4.107	4.051	4.010	3.979	3.955	3.936	3.920	3.907	3.896	3.886	3.878	3.870	3.864	3.858	3.853	3.848	3.844
5	4.060	3.780	3.619	3.520	3.453	3.405	3.368	3.339	3.316	3.297	3.282	3.268	3.257	3.247	3.238	3.230	3.223	3.217	3.212	3.207
6	3.776	3.463	3.289	3.181	3.108	3.055	3.014	2.983	2.958	2.937	2.920	2.905	2.892	2.881	2.871	2.863	2.855	2.848	2.842	2.836
7	3.589	3.257	3.074	2.961	2.883	2.827	2.785	2.752	2.725	2.703	2.684	2.668	2.654	2.643	2.632	2.623	2.615	2.607	2.601	2.595
8	3.458	3.113	2.924	2.806	2.726	2.668	2.624	2.589	2.561	2.538	2.519	2.502	2.488	2.475	2.464	2.454	2.446	2.438	2.431	2.425
9	3.360	3.006	2.813	2.693	2.611	2.551	2.505	2.469	2.440	2.416	2.396	2.379	2.364	2.351	2.340	2.330	2.320	2.312	2.305	2.298
10	3.285	2.924	2.728	2.605	2.522	2.461	2.414	2.377	2.347	2.323	2.302	2.284	2.269	2.255	2.244	2.233	2.224	2.215	2.208	2.201
11	3.225	2.860	2.660	2.536	2.451	2.389	2.342	2.304	2.274	2.248	2.227	2.209	2.193	2.179	2.167	2.156	2.147	2.138	2.130	2.123
12	3.177	2.807	2.606	2.480	2.394	2.331	2.283	2.245	2.214	2.188	2.166	2.147	2.131	2.117	2.105	2.094	2.084	2.075	2.067	2.060
13	3.136	2.763	2.560	2.434	2.347	2.283	2.234	2.195	2.164	2.138	2.116	2.097	2.080	2.066	2.053	2.042	2.032	2.023	2.014	2.007
14	3.102	2.726	2.522	2.395	2.307	2.243	2.193	2.154	2.122	2.095	2.073	2.054	2.037	2.022	2.010	1.998	1.988	1.978	1.970	1.962
15	3.073	2.695	2.490	2.361	2.273	2.208	2.158	2.119	2.086	2.059	2.037	2.017	2.000	1.985	1.972	1.961	1.950	1.941	1.932	1.924
16	3.048	2.668	2.462	2.333	2.244	2.178	2.128	2.088	2.055	2.028	2.005	1.985	1.968	1.953	1.940	1.928	1.917	1.908	1.899	1.891
17	3.026	2.645	2.437	2.308	2.218	2.152	2.102	2.061	2.028	2.001	1.978	1.958	1.940	1.925	1.912	1.900	1.889	1.879	1.870	1.862
18	3.007	2.624	2.416	2.286	2.196	2.130	2.079	2.038	2.005	1.977	1.954	1.933	1.916	1.900	1.887	1.875	1.864	1.854	1.845	1.837
19	2.990	2.606	2.397	2.266	2.176	2.109	2.058	2.017	1.984	1.956	1.932	1.912	1.894	1.878	1.865	1.852	1.841	1.831	1.822	1.814
20	2.975	2.589	2.380	2.249	2.158	2.091	2.040	1.999	1.965	1.937	1.913	1.892	1.875	1.859	1.845	1.833	1.821	1.811	1.802	1.794
21	2.961	2.575	2.365	2.233	2.142	2.075	2.023	1.982	1.948	1.920	1.896	1.875	1.857	1.841	1.827	1.815	1.803	1.793	1.784	1.776
22	2.949	2.561	2.351	2.219	2.128	2.060	2.008	1.967	1.933	1.904	1.880	1.859	1.841	1.825	1.811	1.798	1.787	1.777	1.768	1.759
23	2.937	2.549	2.339	2.207	2.115	2.047	1.995	1.953	1.919	1.890	1.866	1.845	1.827	1.811	1.796	1.784	1.772	1.762	1.753	1.744
24	2.927	2.538	2.327	2.195	2.103	2.035	1.983	1.941	1.906	1.877	1.853	1.832	1.814	1.797	1.783	1.770	1.759	1.748	1.739	1.730
25	2.918	2.528	2.317	2.184	2.092	2.024	1.971	1.929	1.895	1.866	1.841	1.820	1.802	1.785	1.771	1.758	1.746	1.736	1.726	1.718
26	2.909	2.519	2.307	2.174	2.082	2.014	1.961	1.919	1.884	1.855	1.830	1.809	1.790	1.774	1.760	1.747	1.735	1.724	1.715	1.706
27	2.901	2.511	2.299	2.165	2.073	2.005	1.952	1.909	1.874	1.845	1.820	1.799	1.780	1.764	1.749	1.736	1.724	1.714	1.704	1.695
28	2.894	2.503	2.291	2.157	2.064	1.996	1.943	1.900	1.865	1.836	1.811	1.790	1.771	1.754	1.740	1.726	1.715	1.704	1.694	1.685
29	2.887	2.495	2.283	2.149	2.057	1.988	1.935	1.892	1.857	1.827	1.802	1.781	1.762	1.745	1.731	1.717	1.705	1.695	1.685	1.676
30	2.881	2.489	2.276	2.142	2.049	1.980	1.927	1.884	1.849	1.819	1.794	1.773	1.754	1.737	1.722	1.709	1.697	1.686	1.676	1.667
40	2.835	2.440	2.226	2.091	1.997	1.927	1.873	1.829	1.793	1.763	1.737	1.715	1.695	1.678	1.662	1.649	1.636	1.625	1.615	1.605
50	2.809	2.412	2.197	2.061	1.966	1.895	1.840	1.796	1.760	1.729	1.703	1.680	1.660	1.643	1.627	1.613	1.600	1.588	1.578	1.568
60	2.791	2.393	2.177	2.041	1.946	1.875	1.819	1.775	1.738	1.707	1.680	1.657	1.637	1.619	1.603	1.589	1.576	1.564	1.553	1.543
70	2.779	2.380	2.164	2.027	1.931	1.860	1.804	1.760	1.723	1.691	1.665	1.641	1.621	1.603	1.587	1.572	1.559	1.547	1.536	1.526
80	2.769	2.370	2.154	2.016	1.921	1.849	1.793	1.748	1.711	1.680	1.653	1.629	1.609	1.590	1.574	1.559	1.546	1.534	1.523	1.513
90	2.762	2.363	2.146	2.008	1.912	1.841	1.785	1.739	1.702	1.670	1.643	1.620	1.599	1.581	1.564	1.550	1.536	1.524	1.513	1.503
100	2.756	2.356	2.139	2.002	1.906	1.834	1.778	1.732	1.695	1.663	1.636	1.612	1.592	1.573	1.557	1.542	1.528	1.516	1.505	1.494
200	2.731	2.329	2.111	1.973	1.876	1.804	1.747	1.701	1.663	1.631	1.603	1.579	1.558	1.539	1.522	1.507	1.493	1.480	1.468	1.458
500	2.716	2.313	2.095	1.956	1.859	1.786	1.729	1.683	1.644	1.612	1.583	1.559	1.537	1.518	1.501	1.485	1.471	1.458	1.446	1.435
1000	2.711	2.308	2.089	1.950	1.853	1.780	1.723	1.676	1.638	1.605	1.577	1.552	1.531	1.511	1.494	1.478	1.464	1.451	1.439	1.428

Figura D.1: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.9$ (55).

$1 - \alpha = 0.9$
 $1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	61.815	61.883	61.945	62.002	62.055	62.103	62.148	62.189	62.229	62.265	62.529	62.688	62.794	62.871	62.927	62.972	63.007	63.167	63.264	63.296
2	9.444	9.446	9.448	9.450	9.451	9.453	9.454	9.456	9.457	9.458	9.466	9.471	9.475	9.477	9.479	9.480	9.481	9.486	9.489	9.490
3	5.182	5.180	5.178	5.176	5.175	5.173	5.172	5.170	5.169	5.168	5.160	5.155	5.151	5.149	5.147	5.145	5.144	5.139	5.136	5.135
4	3.841	3.837	3.834	3.831	3.828	3.826	3.823	3.821	3.819	3.817	3.804	3.795	3.790	3.786	3.782	3.780	3.778	3.769	3.764	3.762
5	3.202	3.198	3.194	3.191	3.187	3.184	3.181	3.179	3.176	3.174	3.157	3.147	3.140	3.135	3.132	3.129	3.126	3.116	3.109	3.107
6	2.831	2.827	2.822	2.818	2.815	2.811	2.808	2.805	2.803	2.800	2.781	2.770	2.762	2.756	2.752	2.749	2.746	2.734	2.727	2.725
7	2.589	2.584	2.580	2.575	2.571	2.568	2.564	2.561	2.558	2.555	2.535	2.523	2.514	2.508	2.504	2.500	2.497	2.484	2.476	2.473
8	2.419	2.414	2.409	2.404	2.400	2.396	2.392	2.389	2.386	2.383	2.361	2.348	2.339	2.333	2.328	2.324	2.321	2.307	2.298	2.295
9	2.292	2.287	2.282	2.277	2.272	2.268	2.265	2.261	2.258	2.255	2.232	2.218	2.208	2.202	2.196	2.192	2.189	2.174	2.165	2.162
10	2.194	2.189	2.183	2.178	2.174	2.170	2.166	2.162	2.159	2.155	2.132	2.117	2.107	2.100	2.095	2.090	2.087	2.071	2.062	2.059
11	2.117	2.111	2.105	2.100	2.095	2.091	2.087	2.083	2.080	2.076	2.052	2.036	2.026	2.019	2.013	2.009	2.005	1.989	1.979	1.975
12	2.053	2.047	2.041	2.036	2.031	2.027	2.022	2.019	2.015	2.011	1.986	1.970	1.960	1.952	1.946	1.942	1.938	1.921	1.911	1.907
13	2.000	1.994	1.988	1.983	1.978	1.973	1.969	1.965	1.961	1.958	1.931	1.915	1.904	1.896	1.890	1.886	1.882	1.864	1.853	1.850
14	1.955	1.949	1.943	1.938	1.933	1.928	1.923	1.919	1.916	1.912	1.885	1.869	1.857	1.849	1.843	1.838	1.834	1.816	1.805	1.801
15	1.917	1.911	1.905	1.899	1.894	1.889	1.885	1.880	1.876	1.873	1.845	1.828	1.817	1.808	1.802	1.797	1.793	1.774	1.763	1.759
16	1.884	1.877	1.871	1.866	1.860	1.855	1.851	1.847	1.843	1.839	1.811	1.793	1.782	1.773	1.766	1.761	1.757	1.738	1.726	1.722
17	1.855	1.848	1.842	1.836	1.831	1.826	1.821	1.817	1.813	1.809	1.781	1.763	1.751	1.742	1.735	1.730	1.726	1.706	1.694	1.690
18	1.829	1.823	1.816	1.810	1.805	1.800	1.795	1.791	1.787	1.783	1.754	1.736	1.723	1.714	1.707	1.702	1.698	1.678	1.665	1.661
19	1.807	1.800	1.793	1.787	1.782	1.777	1.772	1.767	1.763	1.759	1.730	1.711	1.699	1.690	1.683	1.677	1.673	1.652	1.639	1.635
20	1.786	1.779	1.773	1.767	1.761	1.756	1.751	1.746	1.742	1.738	1.708	1.690	1.677	1.667	1.660	1.655	1.650	1.629	1.616	1.612
21	1.768	1.761	1.754	1.748	1.742	1.737	1.732	1.728	1.723	1.719	1.689	1.670	1.657	1.647	1.640	1.634	1.630	1.608	1.595	1.591
22	1.751	1.744	1.737	1.731	1.726	1.720	1.715	1.711	1.706	1.702	1.671	1.652	1.639	1.629	1.622	1.616	1.611	1.590	1.576	1.571
23	1.736	1.729	1.722	1.716	1.710	1.705	1.700	1.695	1.691	1.686	1.655	1.636	1.622	1.613	1.605	1.599	1.594	1.572	1.558	1.554
24	1.722	1.715	1.708	1.702	1.696	1.691	1.686	1.681	1.676	1.672	1.641	1.621	1.607	1.597	1.590	1.584	1.579	1.556	1.542	1.538
25	1.710	1.702	1.695	1.689	1.683	1.678	1.672	1.668	1.663	1.659	1.627	1.607	1.593	1.583	1.576	1.569	1.565	1.542	1.527	1.523
26	1.698	1.690	1.683	1.677	1.671	1.666	1.660	1.656	1.651	1.647	1.615	1.594	1.581	1.570	1.562	1.556	1.551	1.528	1.514	1.509
27	1.687	1.680	1.673	1.666	1.660	1.655	1.649	1.645	1.640	1.636	1.603	1.583	1.569	1.558	1.550	1.544	1.539	1.515	1.501	1.496
28	1.677	1.669	1.662	1.656	1.650	1.644	1.639	1.634	1.630	1.625	1.592	1.572	1.558	1.547	1.539	1.533	1.528	1.504	1.489	1.484
29	1.668	1.660	1.653	1.647	1.640	1.635	1.630	1.625	1.620	1.616	1.583	1.562	1.547	1.537	1.529	1.522	1.517	1.493	1.478	1.472
30	1.659	1.651	1.644	1.638	1.632	1.626	1.621	1.616	1.611	1.606	1.573	1.552	1.538	1.527	1.519	1.512	1.507	1.482	1.467	1.462
40	1.596	1.588	1.581	1.574	1.568	1.562	1.556	1.551	1.546	1.541	1.506	1.483	1.467	1.455	1.447	1.439	1.434	1.406	1.389	1.383
50	1.559	1.551	1.543	1.536	1.529	1.523	1.517	1.512	1.507	1.502	1.465	1.441	1.424	1.412	1.402	1.395	1.388	1.359	1.340	1.333
60	1.534	1.526	1.518	1.511	1.504	1.498	1.492	1.486	1.481	1.476	1.437	1.413	1.395	1.382	1.372	1.364	1.358	1.326	1.306	1.299
70	1.517	1.508	1.500	1.493	1.486	1.479	1.473	1.467	1.462	1.457	1.418	1.392	1.374	1.361	1.350	1.342	1.335	1.302	1.281	1.273
80	1.503	1.495	1.487	1.479	1.472	1.465	1.459	1.453	1.448	1.443	1.403	1.377	1.358	1.344	1.334	1.325	1.318	1.284	1.261	1.253
90	1.493	1.484	1.476	1.468	1.461	1.455	1.448	1.442	1.437	1.432	1.391	1.365	1.346	1.332	1.321	1.312	1.304	1.269	1.245	1.237
100	1.485	1.476	1.468	1.460	1.453	1.446	1.440	1.434	1.428	1.423	1.382	1.355	1.336	1.321	1.310	1.301	1.293	1.257	1.232	1.223
200	1.448	1.438	1.430	1.422	1.414	1.407	1.400	1.394	1.388	1.383	1.339	1.310	1.289	1.273	1.261	1.250	1.242	1.199	1.168	1.157
500	1.425	1.416	1.407	1.399	1.391	1.384	1.377	1.370	1.364	1.358	1.313	1.282	1.260	1.243	1.229	1.218	1.209	1.160	1.122	1.106
1000	1.418	1.408	1.399	1.391	1.383	1.376	1.369	1.362	1.356	1.350	1.304	1.273	1.250	1.232	1.218	1.207	1.197	1.145	1.103	1.084

Figura D.2: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.9$ (continuación) (55).

$1 - \alpha = 0.95$ v_1 = grados de libertad del numerador
 $1 - \alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$ v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	161.446	199.499	215.707	224.583	230.160	233.988	236.767	238.884	240.543	241.882	242.981	243.905	244.690	245.363	245.949	246.466	246.917	247.324	247.688	248.016
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.433	19.437	19.440	19.443	19.446
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.660
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.604	4.590	4.579	4.568	4.558
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.896	3.884	3.874
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.494	3.480	3.467	3.455	3.445
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.202	3.187	3.173	3.161	3.150
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.989	2.974	2.960	2.948	2.936
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.828	2.812	2.798	2.785	2.774
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.701	2.685	2.671	2.658	2.646
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.599	2.583	2.568	2.555	2.544
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.515	2.499	2.484	2.471	2.459
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.445	2.428	2.413	2.400	2.388
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.385	2.368	2.353	2.340	2.328
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.333	2.317	2.302	2.288	2.276
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.289	2.272	2.257	2.243	2.230
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.250	2.233	2.217	2.203	2.191
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.215	2.198	2.182	2.168	2.155
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.184	2.167	2.151	2.137	2.124
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.156	2.139	2.123	2.109	2.096
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.131	2.114	2.098	2.084	2.071
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.109	2.091	2.075	2.061	2.048
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.620	2.508	2.422	2.355	2.300	2.255	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.088	2.070	2.054	2.040	2.027
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236	2.197	2.165	2.136	2.111	2.089	2.069	2.051	2.035	2.021	2.007
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	2.052	2.034	2.018	2.003	1.990
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	2.036	2.018	2.002	1.987	1.974
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	2.021	2.003	1.987	1.972	1.959
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	2.007	1.989	1.973	1.958	1.945
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.995	1.976	1.960	1.945	1.932
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.904	1.885	1.868	1.853	1.839
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.850	1.831	1.814	1.798	1.784
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.815	1.796	1.778	1.763	1.748
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969	1.928	1.893	1.863	1.836	1.812	1.790	1.771	1.753	1.737	1.722
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.772	1.752	1.734	1.718	1.703
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938	1.897	1.861	1.830	1.803	1.779	1.757	1.737	1.720	1.703	1.688
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.746	1.726	1.708	1.691	1.676
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878	1.837	1.801	1.769	1.742	1.717	1.694	1.674	1.656	1.639	1.623
500	3.860	3.014	2.623	2.390	2.232	2.117	2.028	1.957	1.899	1.850	1.808	1.772	1.740	1.712	1.686	1.664	1.643	1.625	1.607	1.592
1000	3.851	3.005	2.614	2.381	2.223	2.108	2.019	1.948	1.889	1.840	1.798	1.762	1.730	1.702	1.676	1.654	1.633	1.614	1.597	1.581

Figura D.3: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.95$ (55).

$1 - \alpha = 0.95$
 $1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	248.307	248.579	248.823	249.052	249.260	249.453	249.631	249.798	249.951	250.096	251.144	251.774	252.196	252.498	252.723	252.898	253.043	253.676	254.062	254.186
2	19.448	19.450	19.452	19.454	19.456	19.457	19.459	19.460	19.461	19.463	19.471	19.476	19.479	19.481	19.483	19.485	19.486	19.491	19.494	19.495
3	8.654	8.648	8.643	8.638	8.634	8.630	8.626	8.623	8.620	8.617	8.594	8.581	8.572	8.566	8.561	8.557	8.554	8.540	8.532	8.529
4	5.795	5.787	5.781	5.774	5.769	5.763	5.759	5.754	5.750	5.746	5.717	5.699	5.688	5.679	5.673	5.668	5.664	5.646	5.635	5.632
5	4.549	4.541	4.534	4.527	4.521	4.515	4.510	4.505	4.500	4.496	4.464	4.444	4.431	4.422	4.415	4.409	4.405	4.385	4.373	4.369
6	3.865	3.856	3.849	3.841	3.835	3.829	3.823	3.818	3.813	3.808	3.774	3.754	3.740	3.730	3.722	3.716	3.712	3.690	3.678	3.673
7	3.435	3.426	3.418	3.410	3.404	3.397	3.391	3.386	3.381	3.376	3.340	3.319	3.304	3.294	3.286	3.280	3.275	3.252	3.239	3.234
8	3.140	3.131	3.123	3.115	3.108	3.102	3.095	3.090	3.084	3.079	3.043	3.020	3.005	2.994	2.986	2.980	2.975	2.951	2.937	2.932
9	2.926	2.917	2.908	2.900	2.893	2.886	2.880	2.874	2.869	2.864	2.826	2.803	2.787	2.776	2.768	2.761	2.756	2.731	2.717	2.712
10	2.764	2.754	2.745	2.737	2.730	2.723	2.716	2.710	2.705	2.700	2.661	2.637	2.621	2.609	2.601	2.594	2.588	2.563	2.548	2.543
11	2.636	2.626	2.617	2.609	2.601	2.594	2.588	2.582	2.576	2.570	2.531	2.507	2.490	2.478	2.469	2.462	2.457	2.431	2.415	2.410
12	2.533	2.523	2.514	2.505	2.498	2.491	2.484	2.478	2.472	2.466	2.426	2.401	2.384	2.372	2.363	2.356	2.350	2.323	2.307	2.302
13	2.448	2.438	2.429	2.420	2.412	2.405	2.398	2.392	2.386	2.380	2.339	2.314	2.297	2.284	2.275	2.267	2.261	2.234	2.218	2.212
14	2.377	2.367	2.357	2.349	2.341	2.333	2.326	2.320	2.314	2.308	2.266	2.241	2.223	2.210	2.201	2.193	2.187	2.159	2.142	2.136
15	2.316	2.306	2.297	2.288	2.280	2.272	2.265	2.259	2.253	2.247	2.204	2.178	2.160	2.147	2.137	2.130	2.123	2.095	2.078	2.072
16	2.264	2.254	2.244	2.235	2.227	2.220	2.212	2.206	2.200	2.194	2.151	2.124	2.106	2.093	2.083	2.075	2.068	2.039	2.022	2.016
17	2.219	2.208	2.199	2.190	2.181	2.174	2.167	2.160	2.154	2.148	2.104	2.077	2.058	2.045	2.035	2.027	2.020	1.991	1.973	1.967
18	2.179	2.168	2.159	2.150	2.141	2.134	2.126	2.119	2.113	2.107	2.063	2.035	2.017	2.003	1.993	1.985	1.978	1.948	1.929	1.923
19	2.144	2.133	2.123	2.114	2.106	2.098	2.090	2.084	2.077	2.071	2.026	1.999	1.980	1.966	1.955	1.947	1.940	1.910	1.891	1.884
20	2.112	2.102	2.092	2.082	2.074	2.066	2.059	2.052	2.045	2.039	1.994	1.966	1.946	1.932	1.922	1.913	1.907	1.875	1.856	1.850
21	2.084	2.073	2.063	2.054	2.045	2.037	2.030	2.023	2.016	2.010	1.965	1.936	1.916	1.902	1.891	1.883	1.876	1.845	1.825	1.818
22	2.059	2.048	2.038	2.028	2.020	2.012	2.004	1.997	1.990	1.984	1.938	1.909	1.889	1.875	1.864	1.856	1.849	1.817	1.797	1.790
23	2.036	2.025	2.014	2.005	1.996	1.988	1.981	1.973	1.967	1.961	1.914	1.885	1.865	1.850	1.839	1.830	1.823	1.791	1.771	1.764
24	2.015	2.003	1.993	1.984	1.975	1.967	1.959	1.952	1.945	1.939	1.892	1.863	1.842	1.828	1.816	1.808	1.800	1.768	1.747	1.740
25	1.995	1.984	1.974	1.964	1.955	1.947	1.939	1.932	1.926	1.919	1.872	1.842	1.822	1.807	1.796	1.787	1.779	1.746	1.725	1.718
26	1.978	1.966	1.956	1.946	1.938	1.929	1.921	1.914	1.907	1.901	1.853	1.823	1.803	1.788	1.776	1.767	1.760	1.726	1.705	1.698
27	1.961	1.950	1.940	1.930	1.921	1.913	1.905	1.898	1.891	1.884	1.836	1.806	1.785	1.770	1.758	1.749	1.742	1.708	1.686	1.679
28	1.946	1.935	1.924	1.915	1.906	1.897	1.889	1.882	1.875	1.869	1.820	1.790	1.769	1.754	1.742	1.733	1.725	1.691	1.669	1.662
29	1.932	1.921	1.910	1.901	1.891	1.883	1.875	1.868	1.861	1.854	1.806	1.775	1.754	1.738	1.726	1.717	1.710	1.675	1.653	1.645
30	1.919	1.908	1.897	1.887	1.878	1.870	1.862	1.854	1.847	1.841	1.792	1.761	1.740	1.724	1.712	1.703	1.695	1.660	1.637	1.630
40	1.826	1.814	1.803	1.793	1.783	1.775	1.766	1.759	1.751	1.744	1.693	1.660	1.637	1.621	1.608	1.597	1.589	1.551	1.526	1.517
50	1.771	1.759	1.748	1.737	1.727	1.718	1.710	1.702	1.694	1.687	1.634	1.599	1.576	1.558	1.544	1.534	1.525	1.484	1.457	1.448
60	1.735	1.722	1.711	1.700	1.690	1.681	1.672	1.664	1.656	1.649	1.594	1.559	1.534	1.516	1.502	1.491	1.481	1.438	1.409	1.399
70	1.709	1.696	1.685	1.674	1.664	1.654	1.646	1.637	1.629	1.622	1.566	1.530	1.505	1.486	1.471	1.459	1.450	1.404	1.374	1.364
80	1.689	1.677	1.665	1.654	1.644	1.634	1.626	1.617	1.609	1.602	1.545	1.508	1.482	1.463	1.448	1.436	1.426	1.379	1.347	1.336
90	1.675	1.662	1.650	1.639	1.629	1.619	1.610	1.601	1.593	1.586	1.528	1.491	1.465	1.445	1.429	1.417	1.407	1.358	1.326	1.314
100	1.663	1.650	1.638	1.627	1.616	1.607	1.598	1.589	1.581	1.573	1.515	1.477	1.450	1.430	1.415	1.402	1.392	1.342	1.308	1.296
200	1.609	1.596	1.583	1.572	1.561	1.551	1.542	1.533	1.524	1.516	1.455	1.415	1.386	1.364	1.346	1.332	1.321	1.263	1.221	1.205
500	1.577	1.563	1.551	1.539	1.528	1.518	1.508	1.499	1.490	1.482	1.419	1.376	1.345	1.322	1.303	1.288	1.275	1.210	1.159	1.138
1000	1.566	1.553	1.540	1.528	1.517	1.507	1.497	1.488	1.479	1.471	1.406	1.363	1.332	1.308	1.289	1.273	1.260	1.190	1.134	1.110

Figura D.4: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.95$ (continuación) (55).

$1 - \alpha = 0.975$
 $1 - \alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

v_1 = grados de libertad del numerador
 v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	647.793	799.482	864.151	899.599	921.835	937.114	948.203	956.643	963.279	968.634	973.028	976.725	979.839	982.545	984.874	986.911	988.715	990.345	991.800	993.081
2	38.506	39.000	39.166	39.248	39.298	39.331	39.356	39.373	39.387	39.398	39.407	39.415	39.421	39.427	39.431	39.436	39.439	39.442	39.446	39.448
3	17.443	16.044	15.439	15.101	14.885	14.735	14.624	14.540	14.473	14.419	14.374	14.337	14.305	14.277	14.253	14.232	14.213	14.196	14.181	14.167
4	12.218	10.649	9.979	9.604	9.364	9.197	9.074	8.980	8.905	8.844	8.794	8.751	8.715	8.684	8.657	8.633	8.611	8.592	8.575	8.560
5	10.007	8.434	7.764	7.388	7.146	6.978	6.853	6.757	6.681	6.619	6.568	6.525	6.488	6.456	6.428	6.403	6.381	6.362	6.344	6.329
6	8.813	7.260	6.599	6.227	5.988	5.820	5.695	5.600	5.523	5.461	5.410	5.366	5.329	5.297	5.269	5.244	5.222	5.202	5.184	5.168
7	8.073	6.542	5.890	5.523	5.285	5.119	4.995	4.899	4.823	4.761	4.709	4.666	4.628	4.596	4.568	4.543	4.521	4.501	4.483	4.467
8	7.571	6.059	5.416	5.053	4.817	4.652	4.529	4.433	4.357	4.295	4.243	4.200	4.162	4.130	4.101	4.076	4.054	4.034	4.016	3.999
9	7.209	5.715	5.078	4.718	4.484	4.320	4.197	4.102	4.026	3.964	3.912	3.868	3.831	3.798	3.769	3.744	3.722	3.701	3.683	3.667
10	6.937	5.456	4.826	4.468	4.236	4.072	3.950	3.855	3.779	3.717	3.665	3.621	3.583	3.550	3.522	3.496	3.474	3.453	3.435	3.419
11	6.724	5.256	4.630	4.275	4.044	3.881	3.759	3.664	3.588	3.526	3.474	3.430	3.392	3.359	3.330	3.304	3.282	3.261	3.243	3.226
12	6.554	5.096	4.474	4.121	3.891	3.728	3.607	3.512	3.436	3.374	3.321	3.277	3.239	3.206	3.177	3.152	3.129	3.108	3.090	3.073
13	6.414	4.965	4.347	3.996	3.767	3.604	3.483	3.388	3.312	3.250	3.197	3.153	3.115	3.082	3.053	3.027	3.004	2.983	2.965	2.948
14	6.298	4.857	4.242	3.892	3.663	3.501	3.380	3.285	3.209	3.147	3.095	3.050	3.012	2.979	2.949	2.923	2.900	2.879	2.861	2.844
15	6.200	4.765	4.153	3.804	3.576	3.415	3.293	3.199	3.123	3.060	3.008	2.963	2.925	2.891	2.862	2.836	2.813	2.792	2.773	2.756
16	6.115	4.687	4.077	3.729	3.502	3.341	3.219	3.125	3.049	2.986	2.934	2.889	2.851	2.817	2.788	2.761	2.738	2.717	2.698	2.681
17	6.042	4.619	4.011	3.665	3.438	3.277	3.156	3.061	2.985	2.922	2.870	2.825	2.786	2.753	2.723	2.697	2.673	2.652	2.633	2.616
18	5.978	4.560	3.954	3.608	3.382	3.221	3.100	3.005	2.929	2.866	2.814	2.769	2.730	2.696	2.667	2.640	2.617	2.596	2.576	2.559
19	5.922	4.508	3.903	3.559	3.333	3.172	3.051	2.956	2.880	2.817	2.765	2.720	2.681	2.647	2.617	2.591	2.567	2.546	2.526	2.509
20	5.871	4.461	3.859	3.515	3.289	3.128	3.007	2.913	2.837	2.774	2.721	2.676	2.637	2.603	2.573	2.547	2.523	2.501	2.482	2.464
21	5.827	4.420	3.819	3.475	3.250	3.090	2.969	2.874	2.798	2.735	2.682	2.637	2.598	2.564	2.534	2.507	2.483	2.462	2.442	2.425
22	5.786	4.383	3.783	3.440	3.215	3.055	2.934	2.839	2.763	2.700	2.647	2.602	2.563	2.528	2.498	2.472	2.448	2.426	2.407	2.389
23	5.750	4.349	3.750	3.408	3.183	3.023	2.902	2.808	2.731	2.668	2.615	2.570	2.531	2.497	2.466	2.440	2.416	2.394	2.374	2.357
24	5.717	4.319	3.721	3.379	3.155	2.995	2.874	2.779	2.703	2.640	2.586	2.541	2.502	2.468	2.437	2.411	2.386	2.365	2.345	2.327
25	5.686	4.291	3.694	3.353	3.129	2.969	2.848	2.753	2.677	2.613	2.560	2.515	2.476	2.441	2.411	2.384	2.360	2.338	2.318	2.300
26	5.659	4.265	3.670	3.329	3.105	2.945	2.824	2.729	2.653	2.590	2.536	2.491	2.452	2.417	2.387	2.360	2.335	2.314	2.294	2.276
27	5.633	4.242	3.647	3.307	3.083	2.923	2.802	2.707	2.631	2.568	2.514	2.469	2.429	2.395	2.364	2.337	2.313	2.291	2.271	2.253
28	5.610	4.221	3.626	3.286	3.063	2.903	2.782	2.687	2.611	2.547	2.494	2.448	2.409	2.374	2.344	2.317	2.292	2.270	2.251	2.232
29	5.588	4.201	3.607	3.267	3.044	2.884	2.763	2.669	2.592	2.529	2.475	2.430	2.390	2.355	2.325	2.298	2.273	2.251	2.231	2.213
30	5.568	4.182	3.589	3.250	3.026	2.867	2.746	2.651	2.575	2.511	2.458	2.412	2.372	2.338	2.307	2.280	2.255	2.233	2.213	2.195
40	5.424	4.051	3.463	3.126	2.904	2.744	2.624	2.529	2.452	2.388	2.334	2.288	2.248	2.213	2.182	2.154	2.129	2.107	2.086	2.068
50	5.340	3.975	3.390	3.054	2.833	2.674	2.553	2.458	2.381	2.317	2.263	2.216	2.176	2.140	2.109	2.081	2.056	2.033	2.012	1.993
60	5.286	3.925	3.343	3.008	2.786	2.627	2.507	2.412	2.334	2.270	2.216	2.169	2.129	2.093	2.061	2.033	2.008	1.985	1.964	1.944
70	5.247	3.890	3.309	2.975	2.754	2.595	2.474	2.379	2.302	2.237	2.183	2.136	2.095	2.059	2.028	1.999	1.974	1.950	1.929	1.910
80	5.218	3.864	3.284	2.950	2.730	2.571	2.450	2.355	2.277	2.213	2.158	2.111	2.071	2.035	2.003	1.974	1.948	1.925	1.904	1.884
90	5.196	3.844	3.265	2.932	2.711	2.552	2.432	2.336	2.259	2.194	2.140	2.092	2.051	2.015	1.983	1.955	1.929	1.905	1.884	1.864
100	5.179	3.828	3.250	2.917	2.696	2.537	2.417	2.321	2.244	2.179	2.124	2.077	2.036	2.000	1.968	1.939	1.913	1.890	1.868	1.849
200	5.100	3.758	3.182	2.850	2.630	2.472	2.351	2.256	2.178	2.113	2.058	2.010	1.969	1.932	1.900	1.870	1.844	1.820	1.798	1.778
500	5.054	3.716	3.142	2.811	2.592	2.434	2.313	2.217	2.139	2.074	2.019	1.971	1.929	1.892	1.859	1.830	1.803	1.779	1.757	1.736
1000	5.039	3.703	3.129	2.799	2.579	2.421	2.300	2.204	2.126	2.061	2.006	1.958	1.916	1.879	1.846	1.816	1.789	1.765	1.743	1.722

Figura D.5: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.975$ (55).

1 - $\alpha = 0.975$
1 - $\alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	994.303	995.351	996.341	997.272	998.087	998.843	999.542	1000.240	1000.823	1001.405	1005.596	1008.098	1009.787	1011.009	1011.911	1012.610	1013.163	1015.724	1017.237	1017.761
2	39.450	39.452	39.455	39.457	39.458	39.459	39.461	39.462	39.463	39.465	39.473	39.478	39.481	39.484	39.486	39.487	39.488	39.493	39.496	39.497
3	14.155	14.144	14.134	14.124	14.115	14.107	14.100	14.093	14.086	14.081	14.036	14.010	13.992	13.979	13.970	13.962	13.956	13.929	13.913	13.908
4	8.546	8.533	8.522	8.511	8.501	8.492	8.483	8.475	8.468	8.461	8.411	8.381	8.360	8.346	8.335	8.326	8.319	8.288	8.270	8.264
5	6.314	6.301	6.289	6.278	6.268	6.258	6.250	6.242	6.234	6.227	6.175	6.144	6.123	6.107	6.096	6.087	6.080	6.048	6.028	6.022
6	5.154	5.141	5.128	5.117	5.107	5.097	5.088	5.080	5.072	5.065	5.012	4.980	4.959	4.943	4.932	4.923	4.915	4.882	4.862	4.856
7	4.452	4.439	4.426	4.415	4.405	4.395	4.386	4.378	4.370	4.362	4.309	4.276	4.254	4.239	4.227	4.218	4.210	4.176	4.156	4.149
8	3.985	3.971	3.959	3.947	3.937	3.927	3.918	3.909	3.901	3.894	3.840	3.807	3.784	3.768	3.756	3.747	3.739	3.705	3.684	3.677
9	3.652	3.638	3.626	3.614	3.604	3.594	3.584	3.576	3.568	3.560	3.505	3.472	3.449	3.433	3.421	3.411	3.403	3.368	3.347	3.340
10	3.403	3.390	3.377	3.365	3.355	3.345	3.335	3.327	3.319	3.311	3.255	3.221	3.198	3.182	3.169	3.160	3.152	3.116	3.094	3.087
11	3.211	3.197	3.184	3.173	3.162	3.152	3.142	3.133	3.125	3.118	3.061	3.027	3.004	2.987	2.974	2.964	2.956	2.920	2.898	2.890
12	3.057	3.043	3.031	3.019	3.008	2.998	2.988	2.979	2.971	2.963	2.906	2.871	2.848	2.831	2.818	2.808	2.800	2.763	2.740	2.733
13	2.932	2.918	2.905	2.893	2.882	2.872	2.862	2.853	2.845	2.837	2.780	2.744	2.720	2.703	2.690	2.680	2.671	2.634	2.611	2.603
14	2.828	2.814	2.801	2.789	2.778	2.767	2.758	2.749	2.740	2.732	2.674	2.638	2.614	2.597	2.583	2.573	2.565	2.526	2.503	2.495
15	2.740	2.726	2.713	2.701	2.689	2.679	2.669	2.660	2.652	2.644	2.585	2.549	2.524	2.506	2.493	2.482	2.474	2.435	2.411	2.403
16	2.665	2.651	2.637	2.625	2.614	2.603	2.594	2.584	2.576	2.568	2.509	2.472	2.447	2.429	2.415	2.405	2.396	2.357	2.333	2.324
17	2.600	2.585	2.572	2.560	2.548	2.538	2.528	2.519	2.510	2.502	2.442	2.405	2.380	2.362	2.348	2.337	2.329	2.289	2.264	2.256
18	2.543	2.529	2.515	2.503	2.491	2.481	2.471	2.461	2.453	2.445	2.384	2.347	2.321	2.303	2.289	2.278	2.269	2.229	2.204	2.195
19	2.493	2.478	2.465	2.452	2.441	2.430	2.420	2.411	2.402	2.394	2.333	2.295	2.270	2.251	2.237	2.226	2.217	2.176	2.150	2.142
20	2.448	2.434	2.420	2.408	2.396	2.385	2.375	2.366	2.357	2.349	2.287	2.249	2.223	2.205	2.190	2.179	2.170	2.128	2.103	2.094
21	2.409	2.394	2.380	2.368	2.356	2.345	2.335	2.325	2.317	2.308	2.246	2.208	2.182	2.163	2.148	2.137	2.128	2.086	2.060	2.051
22	2.373	2.358	2.344	2.332	2.320	2.309	2.299	2.289	2.280	2.272	2.210	2.171	2.145	2.125	2.111	2.099	2.090	2.047	2.021	2.012
23	2.340	2.325	2.312	2.299	2.287	2.276	2.266	2.256	2.247	2.239	2.176	2.137	2.111	2.091	2.077	2.065	2.056	2.013	1.986	1.977
24	2.311	2.296	2.282	2.269	2.257	2.246	2.236	2.226	2.217	2.209	2.146	2.107	2.080	2.060	2.045	2.034	2.024	1.981	1.954	1.945
25	2.284	2.269	2.255	2.242	2.230	2.219	2.209	2.199	2.190	2.182	2.118	2.079	2.052	2.032	2.017	2.005	1.996	1.952	1.924	1.915
26	2.259	2.244	2.230	2.217	2.205	2.194	2.184	2.174	2.165	2.157	2.093	2.053	2.026	2.006	1.991	1.979	1.969	1.925	1.897	1.888
27	2.237	2.222	2.208	2.195	2.183	2.171	2.161	2.151	2.142	2.133	2.069	2.029	2.002	1.982	1.966	1.954	1.945	1.900	1.872	1.862
28	2.216	2.201	2.187	2.174	2.161	2.150	2.140	2.130	2.121	2.112	2.048	2.007	1.980	1.959	1.944	1.932	1.922	1.877	1.848	1.839
29	2.196	2.181	2.167	2.154	2.142	2.131	2.120	2.110	2.101	2.092	2.028	1.987	1.959	1.939	1.923	1.911	1.901	1.855	1.827	1.817
30	2.178	2.163	2.149	2.136	2.124	2.112	2.102	2.092	2.083	2.074	2.009	1.968	1.940	1.920	1.904	1.892	1.882	1.835	1.806	1.797
40	2.051	2.035	2.020	2.007	1.994	1.983	1.972	1.962	1.952	1.943	1.875	1.832	1.803	1.781	1.764	1.751	1.741	1.691	1.659	1.648
50	1.976	1.960	1.945	1.931	1.919	1.907	1.895	1.885	1.875	1.866	1.796	1.752	1.721	1.698	1.681	1.667	1.656	1.603	1.569	1.557
60	1.927	1.911	1.896	1.882	1.869	1.857	1.845	1.835	1.825	1.815	1.744	1.699	1.667	1.643	1.625	1.611	1.599	1.543	1.507	1.495
70	1.892	1.876	1.861	1.847	1.833	1.821	1.810	1.799	1.789	1.779	1.707	1.660	1.628	1.604	1.585	1.570	1.558	1.500	1.463	1.449
80	1.866	1.850	1.835	1.820	1.807	1.795	1.783	1.772	1.762	1.752	1.679	1.632	1.599	1.574	1.555	1.540	1.527	1.467	1.428	1.414
90	1.846	1.830	1.814	1.800	1.787	1.774	1.763	1.752	1.741	1.731	1.657	1.610	1.576	1.551	1.531	1.516	1.503	1.441	1.401	1.386
100	1.830	1.814	1.798	1.784	1.770	1.758	1.746	1.735	1.725	1.715	1.640	1.592	1.558	1.532	1.512	1.496	1.483	1.420	1.378	1.363
200	1.759	1.742	1.726	1.712	1.698	1.685	1.673	1.661	1.650	1.640	1.562	1.511	1.474	1.447	1.425	1.407	1.393	1.320	1.269	1.250
500	1.717	1.700	1.684	1.669	1.655	1.641	1.629	1.617	1.606	1.596	1.515	1.462	1.423	1.394	1.370	1.351	1.336	1.254	1.192	1.166
1000	1.703	1.686	1.670	1.654	1.640	1.627	1.614	1.603	1.591	1.581	1.499	1.445	1.406	1.376	1.352	1.332	1.316	1.230	1.162	1.132

Figura D.6: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.975$ (continuación) (55).

1 - $\alpha = 0.99$
1 - $\alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

v_1 = grados de libertad del numerador
 v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	4052.185	4999.340	5403.534	5624.257	5763.955	5858.950	5928.334	5980.954	6022.397	6055.925	6083.399	6106.682	6125.774	6143.004	6156.974	6170.012	6181.188	6191.432	6200.746	6208.662
2	98.502	99.000	99.164	99.251	99.302	99.331	99.357	99.375	99.390	99.397	99.408	99.419	99.422	99.426	99.433	99.437	99.441	99.444	99.448	99.448
3	34.116	30.816	29.457	28.710	28.237	27.911	27.671	27.489	27.345	27.228	27.132	27.052	26.983	26.924	26.872	26.826	26.786	26.751	26.719	26.690
4	21.198	18.000	16.694	15.977	15.522	15.207	14.976	14.799	14.659	14.546	14.452	14.374	14.306	14.249	14.198	14.154	14.114	14.079	14.048	14.019
5	16.258	13.274	12.060	11.392	10.967	10.672	10.456	10.289	10.158	10.051	9.963	9.888	9.825	9.770	9.722	9.680	9.643	9.609	9.580	9.553
6	13.745	10.925	9.780	9.148	8.746	8.466	8.260	8.102	7.976	7.874	7.790	7.718	7.657	7.605	7.559	7.519	7.483	7.451	7.422	7.396
7	12.246	9.547	8.451	7.847	7.460	7.191	6.993	6.840	6.719	6.620	6.538	6.469	6.410	6.359	6.314	6.275	6.240	6.209	6.181	6.155
8	11.259	8.649	7.591	7.006	6.632	6.371	6.178	6.029	5.911	5.814	5.734	5.667	5.609	5.559	5.515	5.477	5.442	5.412	5.384	5.359
9	10.562	8.022	6.992	6.422	6.057	5.802	5.613	5.467	5.351	5.257	5.178	5.111	5.055	5.005	4.962	4.924	4.890	4.860	4.833	4.808
10	10.044	7.559	6.552	5.994	5.636	5.386	5.200	5.057	4.942	4.849	4.772	4.706	4.650	4.601	4.558	4.520	4.487	4.457	4.430	4.405
11	9.646	7.206	6.217	5.668	5.316	5.069	4.886	4.744	4.632	4.539	4.462	4.397	4.342	4.293	4.251	4.213	4.180	4.150	4.123	4.099
12	9.330	6.927	5.953	5.412	5.064	4.821	4.640	4.499	4.388	4.296	4.220	4.155	4.100	4.052	4.010	3.972	3.939	3.910	3.883	3.858
13	9.074	6.701	5.739	5.205	4.862	4.620	4.441	4.302	4.191	4.100	4.025	3.960	3.905	3.857	3.815	3.778	3.745	3.716	3.689	3.665
14	8.862	6.515	5.564	5.035	4.695	4.456	4.278	4.140	4.030	3.939	3.864	3.800	3.745	3.698	3.656	3.619	3.586	3.556	3.529	3.505
15	8.683	6.359	5.417	4.893	4.556	4.318	4.142	4.004	3.895	3.805	3.730	3.666	3.612	3.564	3.522	3.485	3.452	3.423	3.396	3.372
16	8.531	6.226	5.292	4.773	4.437	4.202	4.026	3.890	3.780	3.691	3.616	3.553	3.498	3.451	3.409	3.372	3.339	3.310	3.283	3.259
17	8.400	6.112	5.185	4.669	4.336	4.101	3.927	3.791	3.682	3.593	3.518	3.455	3.401	3.353	3.312	3.275	3.242	3.212	3.186	3.162
18	8.285	6.013	5.092	4.579	4.248	4.015	3.841	3.705	3.597	3.508	3.434	3.371	3.316	3.269	3.227	3.190	3.158	3.128	3.101	3.077
19	8.185	5.926	5.010	4.500	4.171	3.939	3.765	3.631	3.523	3.434	3.360	3.297	3.242	3.195	3.153	3.116	3.084	3.054	3.027	3.003
20	8.096	5.849	4.938	4.431	4.103	3.871	3.699	3.564	3.457	3.368	3.294	3.231	3.177	3.130	3.088	3.051	3.018	2.989	2.962	2.938
21	8.017	5.780	4.874	4.369	4.042	3.812	3.640	3.506	3.398	3.310	3.236	3.173	3.119	3.072	3.030	2.993	2.960	2.931	2.904	2.880
22	7.945	5.719	4.817	4.313	3.988	3.758	3.587	3.453	3.346	3.258	3.184	3.121	3.067	3.019	2.978	2.941	2.908	2.879	2.852	2.827
23	7.881	5.664	4.765	4.264	3.939	3.710	3.539	3.406	3.299	3.211	3.137	3.074	3.020	2.973	2.931	2.894	2.861	2.832	2.805	2.780
24	7.823	5.614	4.718	4.218	3.895	3.667	3.496	3.363	3.256	3.168	3.094	3.032	2.977	2.930	2.889	2.852	2.819	2.789	2.762	2.738
25	7.770	5.568	4.675	4.177	3.855	3.627	3.457	3.324	3.217	3.129	3.056	2.993	2.939	2.892	2.850	2.813	2.780	2.751	2.724	2.699
26	7.721	5.526	4.637	4.140	3.818	3.591	3.421	3.288	3.182	3.094	3.021	2.958	2.904	2.857	2.815	2.778	2.745	2.715	2.688	2.664
27	7.677	5.488	4.601	4.106	3.785	3.558	3.388	3.256	3.149	3.062	2.989	2.926	2.872	2.824	2.783	2.746	2.713	2.683	2.656	2.632
28	7.636	5.453	4.568	4.074	3.754	3.528	3.358	3.226	3.120	3.032	2.959	2.896	2.842	2.795	2.753	2.716	2.683	2.653	2.626	2.602
29	7.598	5.420	4.538	4.045	3.725	3.499	3.330	3.198	3.092	3.005	2.931	2.868	2.814	2.767	2.726	2.689	2.656	2.626	2.599	2.574
30	7.562	5.390	4.510	4.018	3.699	3.473	3.305	3.173	3.067	2.979	2.906	2.843	2.789	2.742	2.700	2.663	2.630	2.600	2.573	2.549
40	7.314	5.178	4.313	3.828	3.514	3.291	3.124	2.993	2.888	2.801	2.727	2.665	2.611	2.563	2.522	2.484	2.451	2.421	2.394	2.369
50	7.171	5.057	4.199	3.720	3.408	3.186	3.020	2.890	2.785	2.698	2.625	2.563	2.508	2.461	2.419	2.382	2.348	2.318	2.290	2.265
60	7.077	4.977	4.126	3.649	3.339	3.119	2.953	2.823	2.718	2.632	2.559	2.496	2.442	2.394	2.352	2.315	2.281	2.251	2.223	2.198
70	7.011	4.922	4.074	3.600	3.291	3.071	2.906	2.777	2.672	2.585	2.512	2.450	2.395	2.348	2.306	2.268	2.234	2.204	2.176	2.150
80	6.963	4.881	4.036	3.563	3.255	3.036	2.871	2.742	2.637	2.551	2.478	2.415	2.361	2.313	2.271	2.233	2.199	2.169	2.141	2.115
90	6.925	4.849	4.007	3.535	3.228	3.009	2.845	2.715	2.611	2.524	2.451	2.389	2.334	2.286	2.244	2.206	2.172	2.142	2.114	2.088
100	6.895	4.824	3.984	3.513	3.206	2.988	2.823	2.694	2.590	2.503	2.430	2.368	2.313	2.265	2.223	2.185	2.151	2.120	2.092	2.067
200	6.763	4.713	3.881	3.414	3.110	2.893	2.730	2.601	2.497	2.411	2.338	2.275	2.220	2.172	2.129	2.091	2.057	2.026	1.997	1.971
500	6.686	4.648	3.821	3.357	3.054	2.838	2.675	2.547	2.443	2.356	2.283	2.220	2.166	2.117	2.075	2.036	2.002	1.970	1.942	1.915
1000	6.660	4.626	3.801	3.338	3.036	2.820	2.657	2.529	2.425	2.339	2.266	2.203	2.148	2.099	2.056	2.018	1.983	1.952	1.923	1.897

Figura D.7: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.99$ (55).

1 - $\alpha = 0.99$
1 - $\alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	6216.113	6223.097	6228.685	6234.273	6239.861	6244.518	6249.174	6252.900	6257.091	6260.350	6286.427	6302.260	6312.970	6320.886	6326.474	6330.665	6333.925	6349.757	6359.536	6362.796
2	99.451	99.455	99.455	99.455	99.459	99.462	99.462	99.462	99.462	99.466	99.477	99.477	99.484	99.484	99.484	99.488	99.491	99.491	99.499	99.499
3	26.664	26.639	26.617	26.597	26.579	26.562	26.546	26.531	26.517	26.504	26.411	26.354	26.316	26.289	26.269	26.253	26.241	26.183	26.148	26.137
4	13.994	13.970	13.949	13.929	13.911	13.894	13.878	13.864	13.850	13.838	13.745	13.690	13.652	13.626	13.605	13.590	13.577	13.520	13.486	13.475
5	9.528	9.506	9.485	9.466	9.449	9.433	9.418	9.404	9.391	9.379	9.291	9.238	9.202	9.176	9.157	9.142	9.130	9.075	9.042	9.032
6	7.372	7.351	7.331	7.313	7.296	7.281	7.266	7.253	7.240	7.229	7.143	7.091	7.057	7.032	7.013	6.998	6.987	6.934	6.901	6.891
7	6.132	6.111	6.092	6.074	6.058	6.043	6.029	6.016	6.003	5.992	5.908	5.858	5.824	5.799	5.781	5.766	5.755	5.702	5.671	5.660
8	5.336	5.316	5.297	5.279	5.263	5.248	5.234	5.221	5.209	5.198	5.116	5.065	5.032	5.007	4.989	4.975	4.963	4.911	4.880	4.869
9	4.786	4.765	4.746	4.729	4.713	4.698	4.684	4.672	4.660	4.649	4.567	4.517	4.483	4.459	4.441	4.426	4.415	4.363	4.332	4.321
10	4.383	4.363	4.344	4.327	4.311	4.296	4.283	4.270	4.258	4.247	4.165	4.115	4.082	4.058	4.039	4.025	4.014	3.962	3.930	3.920
11	4.077	4.057	4.038	4.021	4.005	3.990	3.977	3.964	3.952	3.941	3.860	3.810	3.776	3.752	3.734	3.719	3.708	3.656	3.624	3.613
12	3.836	3.816	3.798	3.780	3.765	3.750	3.736	3.724	3.712	3.701	3.619	3.569	3.535	3.511	3.493	3.478	3.467	3.414	3.382	3.372
13	3.643	3.622	3.604	3.587	3.571	3.556	3.543	3.530	3.518	3.507	3.425	3.375	3.341	3.317	3.298	3.284	3.272	3.219	3.187	3.176
14	3.483	3.463	3.444	3.427	3.412	3.397	3.383	3.371	3.359	3.348	3.266	3.216	3.181	3.157	3.138	3.124	3.112	3.059	3.026	3.015
15	3.350	3.330	3.311	3.294	3.278	3.264	3.250	3.237	3.225	3.214	3.132	3.081	3.047	3.022	3.004	2.989	2.977	2.923	2.891	2.880
16	3.237	3.216	3.198	3.181	3.165	3.150	3.137	3.124	3.112	3.101	3.018	2.967	2.933	2.908	2.889	2.875	2.863	2.808	2.775	2.764
17	3.139	3.119	3.101	3.083	3.068	3.053	3.039	3.026	3.014	3.003	2.920	2.869	2.835	2.810	2.791	2.776	2.764	2.709	2.676	2.664
18	3.055	3.035	3.016	2.999	2.983	2.968	2.955	2.942	2.930	2.919	2.835	2.784	2.749	2.724	2.705	2.690	2.678	2.623	2.589	2.577
19	2.981	2.961	2.942	2.925	2.909	2.894	2.880	2.868	2.855	2.844	2.761	2.709	2.674	2.649	2.630	2.614	2.602	2.547	2.512	2.501
20	2.916	2.895	2.877	2.859	2.843	2.829	2.815	2.802	2.790	2.778	2.695	2.643	2.608	2.582	2.563	2.548	2.535	2.479	2.445	2.433
21	2.857	2.837	2.818	2.801	2.785	2.770	2.756	2.743	2.731	2.720	2.636	2.584	2.548	2.523	2.503	2.488	2.476	2.419	2.384	2.372
22	2.805	2.785	2.766	2.749	2.733	2.718	2.704	2.691	2.679	2.667	2.583	2.531	2.495	2.469	2.450	2.434	2.422	2.365	2.329	2.317
23	2.758	2.738	2.719	2.702	2.686	2.671	2.657	2.644	2.632	2.620	2.536	2.483	2.447	2.421	2.401	2.386	2.373	2.316	2.280	2.268
24	2.716	2.695	2.676	2.659	2.643	2.628	2.614	2.601	2.589	2.577	2.492	2.440	2.403	2.377	2.357	2.342	2.329	2.271	2.235	2.223
25	2.677	2.657	2.638	2.620	2.604	2.589	2.575	2.562	2.550	2.538	2.453	2.400	2.364	2.337	2.317	2.302	2.289	2.230	2.194	2.182
26	2.642	2.621	2.602	2.585	2.569	2.554	2.540	2.526	2.514	2.503	2.417	2.364	2.327	2.301	2.281	2.265	2.252	2.193	2.156	2.144
27	2.609	2.589	2.570	2.552	2.536	2.521	2.507	2.494	2.481	2.470	2.384	2.330	2.294	2.267	2.247	2.231	2.218	2.159	2.122	2.109
28	2.579	2.559	2.540	2.522	2.506	2.491	2.477	2.464	2.451	2.440	2.354	2.300	2.263	2.236	2.216	2.200	2.187	2.127	2.090	2.077
29	2.552	2.531	2.512	2.495	2.478	2.463	2.449	2.436	2.423	2.412	2.325	2.271	2.234	2.207	2.187	2.171	2.158	2.097	2.060	2.047
30	2.526	2.506	2.487	2.469	2.453	2.437	2.423	2.410	2.398	2.386	2.299	2.245	2.208	2.181	2.160	2.144	2.131	2.070	2.032	2.019
40	2.346	2.325	2.306	2.288	2.271	2.256	2.241	2.228	2.215	2.203	2.114	2.058	2.019	1.991	1.969	1.952	1.938	1.874	1.833	1.819
50	2.242	2.221	2.202	2.183	2.167	2.151	2.136	2.123	2.110	2.098	2.007	1.949	1.909	1.880	1.857	1.839	1.825	1.757	1.713	1.698
60	2.175	2.153	2.134	2.115	2.098	2.083	2.068	2.054	2.041	2.028	1.936	1.877	1.836	1.806	1.783	1.764	1.749	1.678	1.633	1.617
70	2.127	2.106	2.086	2.067	2.050	2.034	2.019	2.005	1.992	1.980	1.886	1.826	1.785	1.754	1.730	1.711	1.695	1.622	1.574	1.558
80	2.092	2.070	2.050	2.032	2.015	1.999	1.983	1.969	1.956	1.944	1.849	1.788	1.746	1.714	1.690	1.671	1.655	1.579	1.530	1.512
90	2.065	2.043	2.023	2.004	1.987	1.971	1.956	1.942	1.928	1.916	1.820	1.759	1.716	1.684	1.659	1.639	1.623	1.546	1.494	1.476
100	2.043	2.021	2.001	1.983	1.965	1.949	1.934	1.919	1.906	1.893	1.797	1.735	1.692	1.659	1.634	1.614	1.598	1.518	1.466	1.447
200	1.947	1.925	1.905	1.886	1.868	1.851	1.836	1.821	1.807	1.794	1.694	1.629	1.583	1.548	1.521	1.499	1.481	1.391	1.328	1.304
500	1.891	1.869	1.848	1.829	1.810	1.794	1.778	1.763	1.749	1.735	1.633	1.566	1.517	1.481	1.452	1.428	1.408	1.308	1.232	1.201
1000	1.872	1.850	1.829	1.810	1.791	1.774	1.758	1.743	1.729	1.716	1.613	1.544	1.495	1.458	1.428	1.404	1.383	1.278	1.195	1.159

Figura D.8: Valor F de la distribución de Fisher con un nivel de confianza $1 - \alpha = 0.99$ (continuación) (55).

Bibliografía

- [N2] Xvii congreso nacional de geoquímica. [58](#)
- [2] Ahmad Mahir, R. and Al-Khazaleh, A. (2009). New method to estimate missing data by using the asymmetrical winsorized mean in a time series. *Applied Mathematical Sciences*, 3(35):1715–1726. [58](#)
- [3] Alvarez, A. I. M., González, A. Z., Rodríguez, H. R., Palomo, J. O. C., and Zapata, M. C. (2017). Eficiencia del uso del agua de un viñedo y su relación con porosidad del suelo. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5):57–69. [102](#)
- [4] Arnorsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svavarsson, H. (1983). The chemistry of geothermal waters in iceland. iii. chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3):567–577. [20](#)
- [5] Association, G. E. et al. (2016). Annual us & global geothermal power production report. *Washington, DC*. [XIII](#), [XIII](#), [9](#), [10](#)
- [6] Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global change biology*, 9(4):479–492. [75](#)
- [7] Baldocchi, D. D., Hincks, B. B., and Meyers, T. P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69(5):1331–1340. [40](#)
- [8] Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2):3 – 65. [XIII](#), [7](#), [13](#), [14](#), [16](#), [17](#)
- [9] Batini, F. and Nicolich, R. (1985). P and s reflection seismic profiling and well logging in the travale geothermal field. *Geothermics*, 14(5-6):731–747. [47](#), [48](#), [49](#)

BIBLIOGRAFÍA

- [10] Bergoeing, J. P. and Protti Q, M. (2009). Tectónica de placas y sismicidad en américa central. *Revista Geográfica*, pages 153–169. [2](#), [4](#), [6](#)
- [11] Berlo, K., Blundy, J., Turner, S., Cashman, K., Hawkesworth, C., and Black, S. (2004). Geochemical precursors to volcanic activity at mount st. helens, usa. *Science*, 306(5699):1167–1169. [18](#)
- [12] Bertani, R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 60:31 – 43. [8](#), [11](#)
- [13] Bingqiu, Z., Lixin, Z., Changyi, S., Hui, Y., and Gongyuan, W. (1989). Application of geochemical methods in the search for geothermal fields. *Journal of Geochemical Exploration*, 33(1):171 – 183. [29](#)
- [14] Braile, D. L. (2017 (accessed September 23, 2017)). *Seismology and Seismic Waves*. [xiv](#), [xiv](#), [46](#), [47](#)
- [15] Brogi, A., Lazzarotto, A., Liotta, D., and Ranalli, G. (2003). Extensional shear zones as imaged by reflection seismic lines: the larderello geothermal field (central italy). *Tectonophysics*, 363(1):127–139. [48](#)
- [16] Burba, G. (2013). *Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-Cor Biosciences. [xi](#), [xiv](#), [xiv](#), [xiv](#), [79](#), [80](#), [81](#), [82](#), [83](#), [84](#), [85](#), [90](#), [91](#)
- [17] Camarda, M., Gurrieri, S., and 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(3):387–393. [37](#), [38](#)
- [18] Chandrasekharam, D. and Bundschuh, J. (2008). *Low-enthalpy geothermal resources for power generation*, volume 172. CRC Press Leiden. [31](#), [32](#)
- [19] Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., and Marini, L. (1998a). Soil co₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5):543–552. [xiii](#), [37](#), [38](#), [40](#)
- [20] Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., and Marini, L. (1998b). Soil co₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5):543–552. [20](#)
- [21] Christenson, B. and Tassi, F. (2015). Gases in volcanic lake environments. In *Volcanic lakes*, pages 125–153. Springer. [77](#)

- [22] Correa Espinosa, J. A. and García Valladares, O. (2011). *Metodología para la determinación de coeficientes de transferencia de calor en tuberías horizontales y su análisis de incertidumbre utilizando propagación de errores*. 65
- [23] de C.V., G. I. S. (2005). Geotem: Prospectando el valor de México. *Geotermia*, 1(1):72. 76
- [24] Díaz, F. R., Lopez, F. J. B., Font, E. S., and Guijosa, L. P. (2010). Bioestadística: métodos y aplicaciones. 66, 67
- [25] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. 87
- [26] Dux, J. (2013). *Handbook of quality assurance for the analytical chemistry laboratory*. Springer Science & Business Media. 63
- [27] Ellis, A. J., Ellis, W., and Mahon, W. (1977). *Chemistry and geothermal systems*. Number 553.79 E4. 35
- [28] Erwin, K. (1975). *Introducción a la Estadística Matemática*. México: Edit. Limusa. 58, 68
- [29] Espejel Maldonado, O. and Olvera Treviño, M. d. l. P. (2005). *Incetidumbre en material volumetrico*. 64
- [30] Espíndola, J. and Jiménez, Z. (1990). *Terremotos y ondas sísmicas: una breve introducción*, volume 1. Universidad Nacional Autónoma de México. 46
- [31] Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (22 de Febrero de 2018). *Tabla t-Student*. Universidad Autónoma de Madrid. xv, xv, 122, 123
- [32] Fine, G. and Stolper, E. (1986). Dissolved carbon dioxide in basaltic glasses: concentrations and speciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 76(3-4):263–278. 77
- [33] Finnigan, J. (2004). A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part ii: coordinate systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(1):1–41. 41
- [34] Foken, T. and Wichura, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and forest meteorology*, 78(1-2):83–105. 75
- [35] Foulger, G. (1982). Geothermal exploration and reservoir monitoring using earthquakes and the passive seismic method. *Geothermics*, 11(4):259–268. 50, 51

BIBLIOGRAFÍA

- [36] Fountain, D. M., Hurich, C. A., and Smithson, S. B. (1984). Seismic reflectivity of mylonite zones in the crust. *Geology*, 12(4):195–198. [47](#)
- [37] Fournier, R. and Truesdell, A. (1973). An empirical natural geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5):1255–1275. [33](#)
- [38] Fournier, R. O. (1979). Geochemical and hydrologic considerations and the use of enthalpy-chloride diagrams in the prediction of underground conditions in hot-spring systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5(1-2):1–16. [XIII](#), [30](#)
- [39] García, G. M., Pachepsky, Y. A., and Vereecken, H. (2014). Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture. *Journal of hydrology*, 516:154–160. [102](#)
- [40] García Gutiérrez, F. A. and Aguilar Sierra, A. (2014). *Simulación interactiva de la tectónica de placas en la esfera terrestre*. [XIII](#), [2](#), [4](#), [7](#)
- [41] Gattinoni, N. N. et al. (2014). *Intercambios de masa y energía entre la vegetación y la capa límite atmosférica en dos ecosistemas de Argentina*. PhD thesis, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. [103](#), [104](#)
- [42] Giggenbach, W. (1987). Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. *Applied Geochemistry*, 2(2):143–161. [77](#)
- [43] Giggenbach, W. (1992). Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and planetary science letters*, 113(4):495–510. [33](#), [37](#)
- [44] Goff, F., Adams, A., Trujillo, P., Counce, D., Janik, C., Fahlquist, L., Roldan, A., and Revolorio, M. (1991). A re-evaluation of the Moyuta geothermal system, southern Guatemala. Technical report, Los Alamos National Lab., NM (United States). [20](#)
- [45] Google Maps (29 de Mayo de 2018). *19.922933, -98.143467*. [XIV](#), [76](#), [91](#)
- [46] Gosset, W. S. and Snedecor, G. W. (2018). t-student y f-snedecor. *Uptc-Virtual*. [68](#), [69](#)
- [47] Granda, A. (1988). Esquemas conceptuales previos de los alumnos en geología. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 6(3):239–243. [46](#)

-
- [48] Gupta, H. K. and Roy, S. (2006). *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century*. Elsevier. 31, 32
- [49] Hernández, P. A., Pérez, N. M., Salazar, J. M., Nakai, S., Notsu, K., and Wakita, H. (1998). Diffuse emission of carbon dioxide, methane, and helium-3 from teide volcano, tenerife, canary islands. *Geophysical Research Letters*, 25(17):3311–3314. 40
- [50] Hernández Arias, E. H. (2018). Medición y análisis del flujo de co2 en las zonas geotérmicas alcaparrosa y los azufres en el estado de puebla, méxico. 112
- [51] Hernández Delgado, R. A. and Ramírez Cañas, A. E. (2016). *Diseño de un sistema de secado de café, mediante la utilización de un fluido geotérmico de baja entalpia como fuente térmica*. PhD thesis, Universidad de El Salvador. 22
- [52] Hinkle, M. E. (1994). Environmental conditions affecting concentrations of he, co2, o2 and n2 in soil gases. *Applied Geochemistry*, 9(1):53–63. 93, 97, 98
- [53] Hochstein, M. and Hunt, T. (1970). Seismic, gravity and magnetic studies, broadlands geothermal field, new zealand. *Geothermics*, 2:333 – 346. XIV, XIV, XIV, 42, 43, 44, 45
- [54] Hooker Anderson, E. N., Juárez Ramos, L. T., and Cisneros Centeno, A. A. (2015). *Comparación de los resultados de dos equipos de medición, uno de campo con uno de laboratorio, empleando el método turbidimétrico para la determinación de sulfatos en muestras de aguas geotérmicas*. PhD thesis. 19, 22
- [55] Irene Patricia Valdez y Alfaro (23 de Febrero de 2018). *Valor F de la distribución de Fisher*. XV, XV, XV, XV, XV, XV, XV, XV, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133
- [56] John, P. W. (1998). *Statistical design and analysis of experiments*, volume 22. Siam. XIV, 61
- [57] Jones, B., Renaut, R. W., and Owen, R. B. (2011). Life cycle of a geyser discharge apron: Evidence from waikite geyser, whakarewarewa geothermal area, north island, new zealand. *Sedimentary Geology*, 236(1-2):77–94. 21
- [58] Jones, B., Renaut, R. W., Torfason, H., and Owen, R. B. (2007). The geological history of geysir, iceland: a tephrochronological approach to the dating of sinter. *Journal of the Geological Society*, 164(6):1241–1252. 21
- [59] Kious, W. J. and Tilling, R. I. (1996). *This dynamic Earth: the story of plate tectonics*. DIANE Publishing. XIII, 2, 3

BIBLIOGRAFÍA

- [60] Klemperer, S. L. (1987). A relation between continental heat flow and the seismic reflectivity of the lower crust. *Geophysical Journal International*, 61(1):1–11. [48](#)
- [61] Kline, S. (1985). The purposes of uncertainty analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 107(2):153–160. [65](#)
- [62] Lagmay, A. M. F. A., Tengonciang, A. M. P., Marcos, H. V., and Pascua, C. S. (2003). A structural model guide for geothermal exploration in ancestral mount bao, leyte, philippines. *Journal of volcanology and geothermal research*, 122(1):133–141. [XIII](#), [26](#), [27](#)
- [63] Lago, M., Sanz, T., and Majarena, U. (2015). El vulcanismo y su potencial geotérmico: perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(1):80. [27](#)
- [64] Le Bert, G. H. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México. *Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía*. [33](#), [34](#), [35](#), [36](#), [37](#)
- [65] Ledesma, R. M. P. (2001). *Calor de la tierra*. Fondo De Cultura Economica. [XIII](#), [19](#), [22](#), [23](#)
- [66] Lewicki, J., Hilley, G., Tosha, T., Aoyagi, R., Yamamoto, K., and Benson, S. (2007). Dynamic coupling of volcanic CO₂ flow and wind at the horseshoe lake tree kill, mammoth mountain, California. *Geophysical Research Letters*, 34(3). [92](#)
- [67] Lewicki, J. L. and Hilley, G. E. (2009). Eddy covariance mapping and quantification of surface CO₂ leakage fluxes. *Geophysical Research Letters*, 36(21). [XIII](#), [42](#)
- [68] LI-COR Biosciences (27 de Noviembre de 2018a). *LI-200R Piranómetro*. [XIV](#), [87](#)
- [69] LI-COR Biosciences (28 de Noviembre de 2018b). *Resultados en el Sitio de Estudio con el Sistema Smart Flux ®*. [XIV](#), [90](#)
- [70] LI-COR Biosciences (28 de Noviembre de 2018c). *TR-525M Rainfall Sensor*. [XIV](#), [88](#)
- [71] Lindgren, B. W. et al. (1966). Introduction to probability and statistics/by bw lindgren, and gw mcelrath. Technical report. [62](#)

- [72] Liotta, D. and Ranalli, G. (1999). Correlation between seismic reflectivity and rheology in extended lithosphere: southern tuscany, inner northern apennines, italy. *Tectonophysics*, 315(1):109–122. [48](#)
- [73] López Hernández, A. (2009). Evolución volcánica del complejo tulancingo-acoculco y su sistema hidrotermal, estados de hidalgo y puebla, méxico. *PhD, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico (in Spanish)*. [76](#)
- [74] Lumb, J. and Macdonald, W. (1970). Near-surface resistivity surveys of geothermal areas using the electromagnetic method. *Geothermics*, 2:311 – 317. [xiv](#), [52](#), [53](#)
- [75] Lund, J. W. and Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60:66 – 93. [8](#), [11](#)
- [76] Majer, E. and McEvelly, T. (1979). Seismological investigations at the geysers geothermal field. *Geophysics*, 44(2):246–269. [49](#), [51](#)
- [77] Majer, E., McEvelly, T., Albores, A., et al. (1980). Seismological studies at cerro prieto. *Geothermics*, 9(1-2):79–88. [49](#)
- [78] Manrique, I. C. and Garvi, M. G. (2006). *Estadística descriptiva y cálculo de probabilidades*. Pearson educación. [57](#), [58](#), [59](#), [60](#)
- [79] Manteiga, M. and de Vargas Luque, A. P. (2005). Estadística aplicada. [57](#), [59](#), [60](#), [61](#), [66](#), [67](#)
- [80] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons. [99](#), [101](#)
- [81] Marini, L. (2000). Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy. *Italy: University of Genua*. [31](#), [32](#)
- [82] Martínez, E., Fuentes, J. P., and Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1):68–96. [79](#)
- [83] Martinez Bolivar, A. P. (2001). Metodología para estimar la precision y exactitud de monitores pasivos de nox para muestreos ambientales. [64](#)
- [84] Matsuo, S. (1960). On the origin of volcanic gases. *The Journal of earth sciences, Nagoya University*, 8(2):222–245. [33](#)

BIBLIOGRAFÍA

- [85] Mayocchi, C. and Bristow, K. L. (1995). Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. *Agricultural and forest meteorology*, 75(1-3):43–50. [85](#), [86](#)
- [86] McCall, G. (1957). The menengai caldera, kenya colony. In *Proceedings of the 20th International Congress*, volume 1, pages 47–54. [51](#)
- [87] MCEvilly, T., Majer, E., Bartschi, J., and Heinson, J. (1978). Geothermal seismic field system development. *GEOHERMAL EXPLORATION TECHNOLOGY ANNUAL REPORT 1978*, page 12. [49](#)
- [88] McKenzie, W. F. and Truesdell, A. (1977). Geothermal reservoir temperatures estimated from the oxygen isotope compositions of dissolved sulfate and water from hot springs and shallow drillholes. *Geothermics*, 5(1):51–61. [33](#)
- [89] Meidav, T. (1970). Application of electrical resistivity and gravimetry in deep geothermal exploration. *Geothermics*, 2:303 – 310. [xiv](#), [42](#), [55](#)
- [90] Meissner, R. (1986). *The continental crust: a geophysical approach*, volume 34. Academic Press. [47](#)
- [91] Mexicana, N. (2006). Nmx-ec-17025-imnc-2000 “requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración”. *Equivalente a la norma ISO/IEC, 17025*. [64](#)
- [92] Mongelli, F., Zito, G., Ciaranfi, N., and Pieri, P. (1989). Interpretation of heat flow density of the apennine chain, italy. *Tectonophysics*, 164(2-4):267–280. [48](#)
- [93] Montgomery, R. (1948). Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. *Journal of Meteorology*, 5(6):265–274. [41](#)
- [94] Moreno, H. A. (2008). Annual and diurnal cycles of the inverse relation between plant transpiration and carbon sequestration. *Revista EIA*, (9):53–68. [102](#)
- [95] Muffler, P. and Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2-4):53–89. [8](#)
- [96] Nicholson, K. (2012). Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques. [77](#)
- [97] Norling, B., Rowe, M., Chambefort, I., III, F. T., and Morrow, S. (2016). Volatile behavior and trace metal transport in the magmatic–geothermal system at pūtauaki (mt. edgcumbe), new zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 318:27 – 44. [18](#)

-
- [98] Norton, D. and Panichi, C. (1978). Determination of the sources and circulation paths of thermal fluids: the abano region, northern italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8):1283–1294. [33](#)
- [99] Ord, K. et al. (1996). *Outliers in statistical data: V. barnett and t. lewis*, 1994, (john wiley & sons, chichester), 584 pp., [uk pound] 55.00, isbn 0-471-93094-6. *International Journal of Forecasting*, 12(1):175–176. [58](#), [94](#)
- [100] Park, R. G. (2012). *Introducing Tectonics, Rock Structures and Mountain Belts*. Dunedin Academic Press Limited. [XIII](#), [XIII](#), [XIII](#), [1](#), [2](#), [4](#), [5](#), [6](#)
- [101] Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, A., Taran, Y., Guevara, M., and Santoyo, E. (2014). Fluid geochemistry and soil gas fluxes (co₂-ch₄-h₂s) at a promissory hot dry rock geothermal system: The acoculco caldera, mexico. *Journal of volcanology and geothermal research*, 284:122–137. [XIV](#), [75](#), [78](#)
- [102] Pentecost, A., Jones, B., and Renaut, R. (2003). What is a hot spring? *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(11):1443–1446. [19](#)
- [103] Petcher, P., Burrows, S. E., and Dixon, S. (2014). Shear horizontal (sh) ultrasound wave propagation around smooth corners. *Ultrasonics*, 54(4):997–1004. [47](#)
- [104] Pita Fernández, S. and Pértega Díaz, S. (1997). Relación entre variables cuantitativas. *Cad Aten Primaria*, 4:141–4. [111](#)
- [105] Quant Sanchez, J. and Loria Acereto, A. (1991). *Precision y exactitud en un sistema automatizado de mediciones quimico-enzimatico*. [64](#)
- [106] Quijano León, J. L. (2007). Manual de geotermia. *Ciencias de la Tierra e Ingeniería*. [19](#), [20](#), [22](#), [43](#), [52](#)
- [107] Renaut, R., Owen, R., and Ego, J. (2008). Recent changes in geyser activity at loburu, lake bogoria, kenya rift valley. *GOSA Trans*, 10:4–14. [21](#)
- [108] Rey, J. F. (1999). *Nociones de topografía, geodesia y cartografía*. Universidad de Extremadura. [XIII](#), [26](#)
- [109] Rinehart, J. S. (1980). *Geysers and geothermal energy*, volume 223. Springer. [XIII](#), [20](#), [21](#)
- [110] Rogie, J. D., Kerrick, D. M., Sorey, M. L., Chiodini, G., and Galloway, D. L. (2001). Dynamics of carbon dioxide emission at mammoth mountain, california. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3-4):535–541. [93](#)
-

BIBLIOGRAFÍA

- [111] Sanfuentes, C., Sierra-Almeida, A., and Cavieres, L. A. (2012). Efecto del aumento de la temperatura en la fotosíntesis de una especie alto-andina en dos altitudes. *Gayana. Botánica*, 69(1):37–45. [96](#), [109](#)
- [112] Sani, F., Bonini, M., Montanari, D., Moratti, G., Corti, G., and Ventisette, C. D. (2016). The structural evolution of the radicondoli–volterra basin (southern tuscany, italy): Relationships with magmatism and geothermal implications. *Geothermics*, 59, Part A:38 – 55. [XIII](#), [18](#)
- [113] Santoyo, E. (2012). Los sistemas de roca seca caliente: Una fuente de energía renovable oportuna a considerar en el programa de explotación de la geotermia. In *XXII Congreso Nacional de Geoquímica*, volume 18, page 9. [XIII](#), [14](#), [15](#), [16](#)
- [114] Sauer, T. J. and Horton, R. (2005). Soil heat flux. [XIV](#), [85](#), [86](#), [87](#)
- [115] Schotland, R. (1955). The measurement of wind velocity by sonic means. *Journal of meteorology*, 12(4):386–390. [41](#)
- [116] Stolper, E. and Holloway, J. R. (1988). Experimental determination of the solubility of carbon dioxide in molten basalt at low pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 87(4):397–408. [37](#)
- [117] Swinbank, W. (1951). The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 8(3):135–145. [80](#)
- [118] Taran, Y. A. and Giggenbach, W. F. (2003). Geochemistry of light hydrocarbons in subduction-related volcanic and hydrothermal fluids. *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10:61–74. [77](#)
- [119] Tenzer, H. (2001). Development of hot dry rock technology. *Bulletin Geo-Heat Center*, 32(4):14–22. [15](#), [16](#)
- [120] Thanassoulas, C. (1991). Geothermal exploration using electrical methods. *Geoexploration*, 27(3):321 – 350. [54](#)
- [121] Tobin, D. G., Ward, P. L., and Drake, C. L. (1969). Microearthquakes in the rift valley of kenya. *Geological Society of America Bulletin*, 80(10):2043–2046. [49](#), [50](#), [51](#)
- [122] Tonami, F. (1970). Geochemical methods of exploration for geothermal energy. *Geothermics*, 2:492 – 515. [29](#), [30](#)

- [123] Tonani, F. and Miele, G. (1991). Methods for measuring flow of carbon dioxide through soils in the volcanic setting. In *Proc. Int. Conf. Active Volcanoes and Risk Mitigation*, volume 27. 38
- [124] Universidad Interamericana para el Desarrollo (22 de Febrero de 2018). *Distribucion de t Student*. 67, 69
- [125] University, M. T. (2017 (accessed September 23, 2017)). *Seismology and Seismic Waves*. 43
- [126] Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R., and Anderson, E. (2000). Understanding the resistivities observed in geothermal systems. In *proceedings world geothermal congress*, pages 1915–1920. 52
- [127] VAISALA (28 de Noviembre de 2018). *Guía del usuario: Sonda HMP155 de humedad y temperatura Vaisala HUMICAP®*. xiv, 89
- [128] Velasco, E., Perrusquia, R., Jiménez, E., Hernández, F., Camacho, P., Rodríguez, S., Retama, A., and Molina, L. (2014). Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of mexico city. *Atmospheric Environment*, 97:226–238. 109
- [129] Verma, S. (2005). Estadística básica para el manejo de datos experimentales: aplicación en la geoquímica (geoquimiometría): México. *DF, Universidad Nacional Autónoma de México*. 65
- [130] Verma, S. P. (2012). Geochemometrics. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1):276–298. 94
- [131] Viggiano-Guerra, J. C., Armenta, M. F., and Silva, G. R. (2011). Evolución del sistema geotérmico de acoculco, pue., méxico: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo eac-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1):14–24. 76
- [132] Wallace, P. J. (2005). Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 140(1-3):217–240. 77
- [133] Ward, P. L. and Björnsson, S. (1971). Microearthquakes, swarms, and the geothermal areas of iceland. *Journal of Geophysical Research*, 76(17):3953–3982. xiv, xiv, 48, 49, 50
- [134] Ward, P. L., Palmason, G., and Drake, C. (1969). Microearthquake survey and the mid-atlantic ridge in iceland. *Journal of Geophysical Research*, 74(2):665–684. 49, 50

BIBLIOGRAFÍA

- [135] Wei, G., Meng, J., Du, X., and Yang, Y. (2015). Performance analysis on a hot dry rock geothermal resource power generation system based on kalina cycle. *Energy Procedia*, 75:937–945. [14](#), [15](#)
- [136] Welles, J., Demetriades-Shah, T., and McDermitt, D. (2001). Considerations for measuring ground co 2 effluxes with chambers. *Chemical Geology*, 177(1):3–13. [XIII](#), [38](#), [39](#)
- [137] Werner, C. and Cardellini, C. (2006a). Comparison of carbon dioxide emissions with fluid upflow, chemistry, and geologic structures at the rotorua geothermal system, new zealand. *Geothermics*, 35(3):221–238. [92](#)
- [138] Werner, C. and Cardellini, C. (2006b). Comparison of carbon dioxide emissions with fluid upflow, chemistry, and geologic structures at the rotorua geothermal system, new zealand. *Geothermics*, 35(3):221–238. [93](#)
- [139] Werner, C., Chiodini, G., Granieri, D., Caliro, S., Avino, R., and Russo, M. (2006). Eddy covariance measurements of hydrothermal heat flux at solfatara volcano, italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1-2):72–82. [111](#)
- [140] Wiebe, R. and Gaddy, V. (1940). The solubility of carbon dioxide in water at various temperatures from 12 to 40 and at pressures to 500 atmospheres. critical phenomena. *Journal of the American Chemical Society*, 62(4):815–817. [XIV](#), [77](#), [79](#)
- [141] Wohletz, K. and Heiken, G. (1992). *Volcanology and geothermal energy*. University of California Press Berkeley. [8](#), [28](#), [29](#)