

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO
DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA
EDICION 2017



TEMA: Correlación de gases difusos y gravimetría en la zona
sur de un campo geotérmico en exploración

PRESENTAN:

Bery Marjorie Urrutia Manzano
Harold Daniel Steve Selva Solórzano
William Javier Galdámez González

ASESOR:

María Inés Magaña
José Rivas

CIUDAD UNIVERSITARIA, Noviembre 2017

1 Resumen

Los estudios geoquímicos y geofísicos siempre terminan con una gran cantidad de datos que son analizados por las áreas correspondientes, este enorme conjunto de datos brinda información acerca de los límites del recurso geotérmico, posibles estructuras que se encuentran ocultas, zonas de alteración entre otras, mucha de esta información puede ser obtenida por ambas partes.

Dado que hay información que se puede obtener de manera muy similar por ambas partes, resulta conveniente realizar estudios en donde se correlacionen los resultados de cada área, no solo con el objetivo de comparar resultados, sino también de aclarar elementos que, viéndolo desde la perspectiva de un área, no quedan muy claros.

Para realizar esta correlación, primero es necesario realizar los análisis de siempre para cada área: Realización de los mapas, correlación de los gases difusos, estimación de las anomalías de Bouguer, anomalía residual, y todos los demás análisis de rutina. La aplicación de la estadística para la estimación de poblaciones y para obtener el grado de correlación entre los datos a analizar puede ayudar a resaltar los elementos que se procuran encontrar.

Ya analizados los datos por área se deben de comparar los resultados obtenidos. Aquellos resultados que coincidan son bienvenidos, y sobre aquellas que no coincidan se debe de investigar porque no lo han hecho, de esta manera se logra tener una mejor comprensión del campo estudiado.

Como resultado del estudio de gases difusos, se pudieron identificar posibles estructuras en varios lugares del área de exploración, además de una posible zona de ascenso de los fluidos. En los estudios de gravimetría se identifican varias de las estructuras identificadas en la zona oeste del campo y coincide con las posibles zonas de ascenso planteadas por los gases difusos, pero no muestran la misma coincidencia en la parte este.

Del estudio podemos concluir que, en el área de exploración, hay un área de interés en donde las técnicas de gases difusos y de gravimetría están correlacionadas, pero en la región que ambos estudios no coinciden se deberá de profundizar para identificar cual es la causa que no estén correlacionados.

Se pudieron confirmar las fallas detalladas en el mapa geológico y se plantearon posibles estructuras que no han sido delimitadas en dicho mapa, para las cuales, es sugerirle, realizar estudios más especializados para confirmar o no su existencia.

2 Índice

1	Resumen	2
	CAPITULO 1 Generalidades.....	8
1.1.	Introducción	8
1.2.	Planteamiento del problema.....	10
1.3.	Justificación del estudio	10
1.4.	Objetivos	11
1.4.1.	Objetivo General	11
1.4.2.	Objetivos Especificos.....	11
	CAPITULO 2 Marco Teórico	12
2.1.	Gases Difusos	12
2.1.1.	Mecanismo de Transporte.....	12
2.1.1.1.	Difusión	12
2.1.1.2.	Advección.....	12
2.1.1.3.	Convección.....	13
2.1.2.	Determinación de Flujo de CO ₂ y H ₂ S.....	13
2.1.2.1.	Cuantificación del flujo.....	14
2.1.3.	Determinación de la concentración de Radón - Torón.....	16
2.1.4.	Determinación de Vapor de Mercurio	18
2.1.5.	Determinación de sulfuro de hidrógeno.....	19
2.1.6.	Espectrometría de Masas	19
2.1.7.	Desgasificación Difusa	21
2.2.	Gravimetría.....	21
2.2.1.	Métodos geofísicos	21
2.2.2.	Exploración superficial.	21
2.2.3.	Método gravimétrico.....	22
2.2.4.	Fundamento físico.....	22
2.2.5.	Corrección o reducción de datos gravimétricos.....	22
2.2.6.	Anomalía de Bouguer completa	23
2.2.7.	Anomalía Regional y Residual	24
2.2.8.	Primera y segunda derivada.....	24

2.2.9.	Espectro de Potencia	24
2.3.	Análisis Estadísticos	25
2.3.1.	Análisis de Poblaciones (Halil Aral, 1988)	25
2.3.2.	Análisis de Clúster (Mwangi)	27
2.3.3.	Correlación estadística de los datos (Hall, 2015).....	29
2.3.4.	Superposición de los datos.	31
CAPITULO 3 Metodología		32
3.1.	Gases Difusos	32
3.1.1.	Mediciones de flujo de dióxido de carbono (CO ₂) y sulfuro de hidrógeno (H ₂ S). 32	
3.1.2.	Determinación de la concentración de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) y vapor de mercurio (Hg).	33
3.1.3.	Determinación de ²²² Rn y ²²⁰ Rn.....	34
3.1.4.	Muestreo de gases.....	35
3.2.	Gravimetría.....	35
3.2.1.	Adquisición de datos	35
3.2.2.	Secuencia de procesamiento	36
3.2.2.1.	Control de calidad.....	36
3.2.2.2.	Anomalía de Bouguer completa.....	36
3.2.2.3.	Espectro de frecuencia	36
3.2.2.4.	Anomalía regional y residual.....	36
3.2.2.5.	Primera y Segunda derivada	37
3.3.	Análisis estadísticos	37
3.3.1.	Análisis de poblaciones.....	37
3.3.2.	Análisis de Clúster	37
3.3.3.	Correlación estadística.....	38
3.3.4.	Superposición de datos.....	38
3.4.	Correlación de gases difusos y gravimetría	38
CAPITULO 4 Análisis de datos		40
4.1.	Gases Difusos	40
4.1.1.	Mapas de distribución espacial de gases difusos	40
4.1.2.	Anomalía Hidrógeno (H ₂) y Helio (ΔHe).....	40
4.1.3.	Anomalía de Mercurio (Hg)	41

4.1.4.	Anomalía de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	42
4.1.5.	Anomalía de ^{222}Rn y $^{220}\text{Rn} / ^{222}\text{Rn}$	43
4.1.6.	Anomalía de Flujo de CO_2 y Log CO_2	44
4.2.	Gravimetría.....	45
4.2.1.	Control de calidad de los datos	45
4.2.2.	Anomalía de Bouguer Completa	46
4.2.3.	Análisis estadístico de Anomalía de Bouguer Completa.....	47
4.2.4.	Espectro de Frecuencia	48
4.2.5.	Anomalía Regional.....	49
4.2.6.	Anomalía Residual	50
4.2.7.	Primera derivada.....	50
4.2.8.	Segunda Derivada	51
4.3.	Análisis estadísticos	52
4.3.1.	Análisis de población.....	52
4.3.2.	Análisis de Clústers.....	56
4.3.3.	Correlación estadística.....	56
4.3.4.	Superposición de los datos	57
CAPITULO 5 Presentación de los resultados		59
5.1.	Gases Difusos	59
5.2.	Gravimetría.....	60
CAPITULO 6 Conclusiones y Recomendaciones.....		63
6.1.	Conclusiones	63
6.2.	Recomendaciones.....	63
5	Agradecimientos	64
6	Referencias Bibliográficas	65
7	Apéndices.....	67
7.1	Anexo A, Códigos en R.....	67
7.2	Anexo B, Gráficos de probabilidad acumulada.	69

3 Índice de Figuras.

Figura 1. Flujo de gas contra tiempo.....	13
Figura 2. Flujómetro equipado para la determinación simultánea de H ₂ S y CO ₂	16
Figura 3. Equipo portátil para determinación de Radón, Pylon AB6A.....	16
Figura 4. Equipo medidor de Hg, Jerome 431-X.	18
Figura 5. Esquema de funcionamiento de medidor de vapor de mercurio.....	19
Figura 6. Equipo medidor de H ₂ S, Jerome 631-X.....	19
Figura 7. Esquema de funcionamiento de espectrómetro de masas cuadrupolar.	20
Figura 8. Espectrometro de masas (ThermoStar TM GSD 301).....	20
Figura 9. Significado de la primer y segunda derivada (modificado de Ortega, 2014)	24
Figura 10. Grafico de Probabilidad acumulada para la temperatura ambiente del área de estudio.....	25
Figura 11. Gráfico de Probabilidad acumulada con la división de las poblaciones.	26
Figura 12. Mapa de isocontornos para la temperatura ambiente, con sus respectivas poblaciones. Población A: Azul, Población A-B: Verde, Población B: Rojo.	27
Figura 13. Ejemplo de iteraciones para el algoritmo k-means.	28
Figura 14. Dendograma, resultado de los algoritmos de jerarquía.	29
Figura 15. Correlación de dos variables, (E,α). Nótese que mientras más dispersos se encuentren los datos, menor es la correlación entre ellos ("r").	30
Figura 16. Muestreo en Campo	32
Figura 17. Medición de Flujo de CO ₂ y H ₂ S.	33
Figura 18. Sonda de acero Inoxidable.	33
Figura 19. Determinación de Hg / H ₂ S en equipos Jerome.	34
Figura 20. Medidor portátil de Radón, Pylon AB6A.....	34
Figura 21. Espectrómetro de masas cuadrupolar, en recuadro se muestra los vacutainer para el traslado y almacenamiento de muestras.	35
Figura 22. Anomalía de Helio (ΔHe).....	41
Figura 23. Anomalía de Hidrógeno	41
Figura 24. Anomalía de Mercurio (Hg).....	42
Figura 25. Anomalía de la relación de ⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar.....	43
Figura 26. Anomalía de ²²² Rn	44
Figura 27. Anomalía de la relación de ²²⁰ Rn/ ²²² Rn.....	44
Figura 28. Anomalía de flujo de CO ₂	45
Figura 29. Anomalía de Log CO ₂	45
Figura 30. Control de la calidad de datos.....	46
Figura 31. Mapa de isocontornos de Anomalía de Bouguer Completa.....	47
Figura 32. Mapa de isocontornos de Anomalía de Bouguer Completa con su distribución de poblaciones.....	48
Figura 33. Espectro de potencia de la zona de estudio.....	49
Figura 34. Mapa de isocontornos de Anomalía Regional	49
Figura 35. Mapa de isocontornos de la Anomalía Residual.....	50
Figura 36. Mapa de isocontornos de la Primera Derivada Horizontal.....	51
Figura 37. Mapa de isocontornos de la Segunda Derivada Horizontal	51

<i>Figura 38. Frecuencia acumulada para el Nitrógeno.....</i>	52
<i>Figura 39. Frecuencia acumulada para el Hidrógeno.....</i>	53
<i>Figura 40. Frecuencia acumulada para el Mercurio y SO₂.</i>	53
<i>Figura 41. Frecuencia acumulada para el Radón. A la izquierda, la concentración en sus valores observados. A la derecha, el logaritmo base 10 de la concentración. Nótese que al aplicar la función logaritmo, es más fácil identificar las poblaciones presentes.</i>	54
<i>Figura 42. Tabla de correlaciones de Pearson. En color verde se encuentran las correlaciones positivas y en color azul las correlaciones negativas. La escala de color indica la magnitud de la correlación.....</i>	56
<i>Figura 43. Mapa de superposición de clústers para la relación Radón/Torón - Flujo de CO₂</i>	57
<i>Figura 44. Mapa de superposición de clústers para la relación ⁴⁰Ar/³⁶Ar – Hg</i>	58
<i>Figura 45. Mapa de superposición de clústers para la relación Radón/Torón - Flujo de CO₂ - ⁴⁰Ar/³⁶Ar.....</i>	58
<i>Figura 46. Mapa de estructuras geológicas identificadas a partir de anomalías de gases difusos.</i>	59
<i>Figura 47. Delimitación de lineamientos asociados a estructuras geológicas a partir de la anomalía residual</i>	61
<i>Figura 48. Integración de lineamientos geológicos encontrado con gases difusos, gravimetría y análisis de clúster con la geología local.....</i>	62
<i>Figura Anexa 49. Gráfico para el ⁴⁰Ar/³⁶Ar</i>	69
<i>Figura Anexa 50. Gráfico para el CO₂.....</i>	69
<i>Figura Anexa 51. Gráfico para el CO₂ (Flujo)</i>	69
<i>Figura Anexa 52. Gráfico para el H₂.....</i>	69
<i>Figura Anexa 53. Gráfico para el ΔHe</i>	70
<i>Figura Anexa 54. Gráfico para el Hg.....</i>	70
<i>Figura Anexa 55. Gráfico para el Radón.....</i>	70
<i>Figura Anexa 56. Gráfico para la relación Radón/Torón</i>	70
<i>Figura Anexa 57. Gráfico para la anomalía de Bouguer.....</i>	70

4 Índice de tablas.

<i>Tabla 1: Métodos Geofísicos para la identificación de estructuras. Modificado de (Mwangi).....</i>	21
<i>Tabla 2. Valores para cada una de las poblaciones calculadas.</i>	26
<i>Tabla 3: Profundidades estimadas de las anomalías gravimétricas</i>	48
<i>Tabla 4. Tabla resumen de gases con tres poblaciones. (Base, Transición, Anómala)....</i>	54
<i>Tabla 5. Tabla resumen de gases con más de tres poblaciones.....</i>	55
<i>Tabla 5. Tabla resumen los lineamientos encontrados.</i>	61

CAPITULO 1 Generalidades

1.1. Introducción

Energía Geotérmica

Es un hecho bien conocido que las capas internas de la tierra son muy calientes, y la temperatura aumenta, a razón de 1 grado centígrado por cada 100 pies de profundidad.

Esa energía de calor es energía geotérmica. Es el calor remanente derivado de la formación del planeta hace cuatro mil quinientos millones de años, así como el calor de la desintegración radiactiva de los isótopos inestables naturales. Ese calor es suficiente para alimentar la tectónica de placas, que es el movimiento lento de bloques masivos de la corteza terrestre y el manto superior, y para impulsar los procesos de construcción de montañas que ocurren cuando esos bloques colisionan. También es suficiente para derretir rocas, generar volcanes, calentar agua para formar fuentes termales y mantener los sótanos a temperatura constante. Es un recurso energético perpetuo e inagotable.

Las fuentes de combustible han sido tradicionalmente madera, carbón, petróleo y gas natural. Los cambios en el uso de estos combustibles a lo largo del tiempo, así como la contribución de la generación hidroeléctrica y nuclear, han aumentado desde mediados del siglo pasado. El carbón, el gas natural y el petróleo representan más del 85% de la energía utilizada solo en los Estados Unidos.

Aunque estos combustibles pueden, en combinación, proporcionar décadas a varios cientos de años de suministro, la combinación de las emisiones de gases de efecto invernadero y la competencia por los combustibles a base de petróleo que están implícitos con el aumento de la población en el planeta, y han hecho depender de manera problemática estas fuentes de energía. Además, estos combustibles se derivan de una base de recursos que no se repone.

En cambio, estos recursos se extraen de materiales derivados geológicamente que tomaron millones de años en formarse. Como un producto básico, estos combustibles fósiles no son renovables y serán cada vez más difíciles de extraer, y por lo tanto más costosos.

La energía geotérmica tiene varios atributos que le permiten cumplir con los criterios, entre ellos se encuentra el reemplazo de los combustibles fósiles como fuentes de generación eléctrica. Un atributo es que la energía geotérmica no requiere combustible. Como depende del flujo persistente de calor del interior de la Tierra, puede ser aprovechado sin recurrir a una infraestructura de suministro de combustible. Por cada kilovatio de energía eléctrica desplazada por el uso de energía geotérmica, las emisiones de gases de efecto invernadero que se producirían a partir de una planta de energía alimentada con combustibles fósiles se reducen en un 90% como mínimo y, en muchos casos, se eliminan por completo (Glassley, 2010).

Exploración Geotérmica

Una primera aproximación a la localización de objetivos de interés geotérmico son los márgenes de las placas litosféricas, caracterizadas por una actividad tectónica y magmática reciente.

Sin embargo, el hecho de que una región pertenezca geográficamente a estas porciones de continentes no garantiza el hallazgo de campos geotérmicos con interés industrial. Por consiguiente, para poder desarrollar un proyecto geotérmico, será necesario iniciar actividades de exploración, esto permitirá formular primeras hipótesis de trabajo, así como seleccionar zonas preferenciales, permitiendo con ello articular más fácilmente el desarrollo de un proyecto geotérmico.

Desde el punto de vista práctico, un proyecto geotérmico consta de cinco etapas diferentes: Estudio de reconocimiento, Estudio de Pre-factibilidad, Estudio de Factibilidad, Desarrollo y Explotación. Con lo anterior, las primeras tres se refieren a la parte exploratoria del proyecto (OLADE, 1978)

Entre los métodos de exploración se encuentra la exploración geoquímica y la exploración geofísica. En la exploración geoquímica, un área geotérmica puede ser considerada como un sistema químico de altura, los componentes principales de este sistema son la fase de fluidos (agua, vapor, gases) y la fase sólida compleja (roca). Dos clases de sistemas geotérmicos han sido reconocidos basándose en el estado físico del fluido que domina el control de presión: sistemas de agua caliente y sistemas de vapor dominante.

Los estudios geoquímicos son utilizados para determinar la variación en el medio ambiente geoquímico, mediante la clasificación de los tipos e interacciones de las diferentes aguas y gases, de acuerdo con su composición. Además, determina el origen de la fase fluida, así como la localización de la recarga, mediante el análisis isotópico de las aguas. Los patrones de distribución de ciertos elementos particulares que ayuden a delimitar un sistema geotérmico se realizan con ayuda de la exploración geoquímica. También la temperatura del reservorio puede ser estimada a partir de estudios geoquímicos.

Los estudios geofísicos, tienen como objetivo principal el empleo de técnicas de prospección durante la exploración, para contribuir con los estudios geoquímicos y geológicos en la elaboración del modelo geotérmico del área de interés. A partir de la geofísica se determina las condiciones geológicas y estructurales regionales, la localización y delimitación de anomalías térmicas en el área y se definen condiciones estructurales particulares.

Los métodos de prospección geofísica se basan en la medición de la variación, en el tiempo y en el espacio, de alguna de las propiedades físicas de las rocas, entre ellas la densidad, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica y térmica. El análisis de estas variables permite realizar una interpretación en conjunto a la geología y geoquímica, para la elaboración de un modelo geotérmico (OLADE, 1978).

1.2. Planteamiento del problema

Los estudios de exploración en geotermia tienen como objetivo identificar de la mejor manera posible los recursos geotérmicos profundos y de alta temperatura; esto se ha logrado realizando múltiples estudios con diferentes técnicas: geología, geoquímica y geofísica; dichas técnicas proporcionan información muy útil que posteriormente será ingresada en un modelo conceptual del campo en exploración.

En la mayoría de los casos, los datos que son obtenidos utilizando una técnica específica, puede compartir características en común con otro estudio realizado con otra técnica en el mismo lugar. Tomando en cuenta esta premisa, varios estudios aislados se han realizado haciendo correlaciones entre técnicas de exploración, con el fin de obtener información extra partiendo del mismo set de datos; dichos estudios han proporcionado resultados considerablemente buenos.

Para lograr extraer toda la información posible de un área de investigación, es necesario realizar correlaciones entre datos de diferentes técnicas y lo que dichas correlaciones pueden significar en un campo geotérmico en exploración.

1.3. Justificación del estudio

Los estudios de correlación de datos, son necesario para poder extraer más información y sustentar la misma, no únicamente en una técnica, sino en varias técnicas con el apoyo estadístico.

Por los motivos mencionados anteriormente, es de gran importancia realizar estudios de inter-correlación entre los datos obtenidos por diferentes técnicas; se deben de realizar correlaciones entre varios métodos para conocer qué información comparten en común, que información adicional puede ofrecer la correlación y mucha más información que pueda ser descubierta durante el análisis de los datos.

De esta forma, se puede mejorar la comprensión del campo geotérmico, lo que puede interpretarse como una reducción al riesgo que conlleva la exploración y explotación de campos geotérmicos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Identificar posibles elementos de interés geotérmico a partir de la correlación de gases difusos y gravimetría

1.4.2. Objetivos Específicos

- Recolectar los datos sobre gases difusos y gravimétricos que se tengan del área de exploración.
- Recopilar datos de gases difusos que complementen los datos que se hayan recopilado.
- Analizar los datos de gases difusos, aplicando análisis estadísticos de población, y seleccionando los gases que describan de mejor manera los posibles elementos de interés geoquímico.
- Analizar los datos de gravimetría calculando la anomalía de Bouguer completa, y aplicándole los filtros que ayuden a definir más claramente las zonas de interés geofísico.
- Correlacionar los resultados obtenidos con ambas técnicas definiendo las zonas de interés respaldada por ambas técnicas.

CAPITULO 2 Marco Teórico

2.1. Gases Difusos

2.1.1. Mecanismo de Transporte

El transporte de solutos en medios porosos se rige por tres grandes procesos:

- Advección
- Difusión
- Convección

2.1.1.1. Difusión

La difusión es el movimiento de un componente de una mezcla, debido a un estímulo físico. La principal causa de la difusión es la existencia de un gradiente de concentración del componente que difunde en una dirección tal que tiende a igualar las concentraciones y destruir el gradiente. Cuando el gradiente se mantiene, suministrando el componente que difunde en el extremo de concentración más elevada y retirándolo en el extremo de baja concentración, se obtiene un flujo continuo.

También puede originarse la difusión de los componentes por un gradiente de presión o de temperatura aplicados a la mezcla. La difusión inducida por la presión total se llama difusión de presión y la inducida por la temperatura recibe el nombre de difusión térmica (Costa et al, 1984).

El proceso de difusión esta generalmente acompañado por el flujo global de la mezcla, y relacionado con el flujo de calor y puede deberse a una acción molecular o bien, corresponder a una combinación de acción molecular y turbulenta.

Adolf E. Fick fue el primero que adaptó la ecuación de Fourier para la conducción del calor al fenómeno de la difusión. De esta forma, el flujo de una sustancia a través de una sección definida es proporcional al gradiente de concentración medido en la dirección perpendicular a la sección de paso (McCabe y Smith, 1981).

$$F = -D \times \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

En donde, F, es la velocidad de transferencia por unidad de área, C, es la concentración de la sustancia que se difunde, X, es la longitud de penetración en el sentido normal a la sección, y la constante de proporcionalidad U se conoce con el nombre de coeficiente de difusión o difusividad. El signo negativo indica que el flujo ocurre en la dirección opuesta al aumento de concentración.

2.1.1.2. Advección

Si el transporte se da por advección, esto involucra el movimiento de materia resultado de la acción de una fuerza, lo que implica, un gradiente de presión (dP/dλ). El flujo advectivo (φ_a), se describe entonces por la Ley de Darcy (Scheidegger, 1974):

$$\varphi = \left(\frac{k}{\mu}\right) \times \left(\frac{dP}{d\lambda}\right) \quad (2)$$

Donde k es la permeabilidad específica, y μ es la viscosidad del fluido, suponiendo que éstos son incompresibles.

2.1.1.3. Convección

El transporte por convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura (Grimaldi, 2011).

2.1.2. Determinación de Flujo de CO₂ y H₂S

Teóricamente una curva de flujo es como se muestra en la *Figura 1a*, el plano representa la variación de concentración del gas de interés (CO₂ o H₂S) versus el tiempo. Algunas zonas características del plano se identifican en la *Figura 1b*.

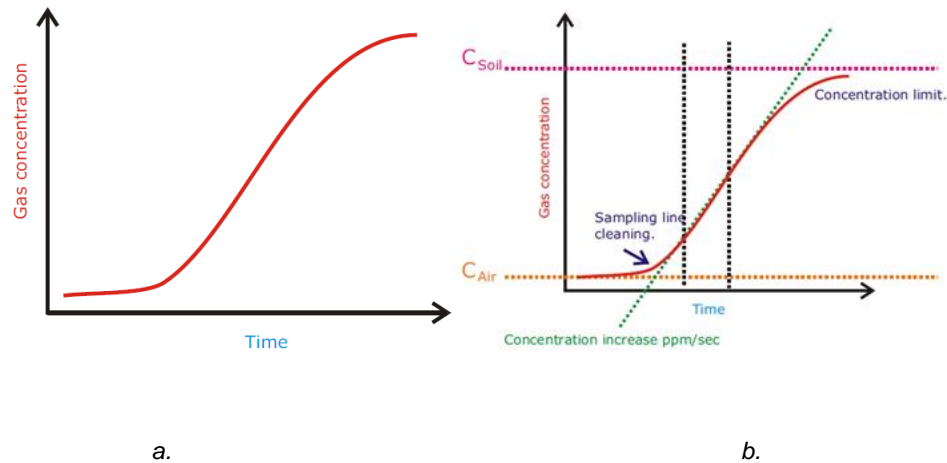


Figura 1. Flujo de gas contra tiempo

C_{Air} es la concentración del gas de interés, 350 ppm en el caso del dióxido de carbono, y algunas ppm en el caso de otros gases. C_{Soil} es la concentración del gas en el suelo. Es necesario un tiempo de toma de datos, lo suficiente para completar el recorrido del circuito y alcanzar la concentración límite C_{Soil} .

En la primera parte de la curva de flujo se resalta un área de "limpieza de línea de muestreo", en esta área, el gas bombeado desde la cámara de acumulación (Tipo A), reemplaza el gas en la bomba, los tubos y la celda del detector de celdas (volúmenes

mueertos). La eficiencia de limpieza depende de los volúmenes muertos y del flujo de bombeo.

Cuando la concentración del gas de interés se acerca a la concentración del suelo, la pendiente de la curva de flujo disminuye. Normalmente, el tiempo de grabación de la curva de flujo no es suficiente para resaltar este efecto. La concentración de dióxido de carbono en los suelos anómalos es normalmente más del 5%.

Las dos líneas verticales delimitan el buen intervalo de la curva de flujo donde calcular el flujo. Para tener una buena evaluación del flujo, se debe seleccionar el intervalo correcto de la curva de flujo.

Un período en el rango de dos a cuatro minutos de registro de la curva de flujo es necesario para obtener una buena curva de flujo, el intervalo donde se calcula el flujo comienza después de un minuto hasta el final de la curva de flujo (WEST system, 2006).

2.1.2.1. Cuantificación del flujo

El flujo es proporcional a la relación de incremento de concentración ppm/seg. El factor de proporcionalidad depende de la relación volumen / superficie de la cámara, así como de la presión barométrica y la temperatura del aire dentro de la cámara de acumulación.

Hay dos métodos para llevar a cabo el trabajo de campo, en ambos casos para cada medición debe registrarse el tipo de cámara de acumulación utilizada, la presión barométrica y la temperatura del aire.

La variación de unos pocos mBar de presión y/o pocos grados de temperatura no afecta mucho la evaluación del flujo, entonces puede usar un valor medio para ambos parámetros. Por supuesto, eso depende de la precisión que desee alcanzar para la evaluación del flujo. El instrumento mide la presión barométrica, utilizando el sensor de presión integrado, con una buena precisión. Se puede usar una termocupla para medir la temperatura del aire y la temperatura del suelo (WEST system, 2006).

- *Método 1: Medida de la pendiente:* Se debe establecer el factor de cámara de acumulación en 1 para que la medida del flujo expresada en la unidad de pendiente sea "ppm/seg" y traduzca en la unidad deseada con un procesamiento posterior. Usando este método, puede enfocarse solo en la cámara de acumulación que interactúa con el suelo, la forma de la curva de flujo y los otros aspectos de la medición, postergando la elección del factor de cámara de acumulación correcto.
- *Método 2: medir el flujo directamente en moles /m²/ día:* Para obtener los resultados directamente en moles /m²/ día, debe establecer el factor de la cámara de acumulación en el valor correcto, tomándolo de las tablas. Para cada medición, si hay variaciones en la temperatura del aire, o de la presión barométrica, o si cambió la cámara de acumulación, debe realizar los ajustes y colocar el factor de cámara de acumulación correcto. Esta operación puede ser crítica.

Los factores de la cámara de acumulación se pueden estimar a partir de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{86400 \times P}{10^6 \times R \times T_k} \times \frac{V}{A} \quad (3)$$

Dónde:

- P es la presión barométrica expresada en mBar,
- R es la constante de gases 0.0831451 bar L K⁻¹mol⁻¹,
- T_k es la temperatura del aire expresada en grados Kelvin,
- V es el volumen neto de la cámara (en metros cúbicos), y
- A es el área de la red de entrada de la cámara en metros cuadrados.

(WEST system, 2006).

Las dimensiones del factor de cámara de acumulación:

$$K = \frac{\text{moles} \times \text{metros}^{-2} \times \text{día}^{-1}}{\text{ppm} \times \text{sec}^{-1}} \quad (4)$$

El flujómetro, *Figura 2* está equipado para medir simultáneamente CO₂ y H₂S. La determinación de CO₂ se lleva a cabo con un sensor infrarrojo de doble haz LI-COR 820, con compensador de variaciones de temperatura y presión atmosférica. La medida de CO₂ es en función de la absorción de la energía infrarroja, y se basa en la diferencia entre la razón de la absorción IR de la señal de referencia y la señal de la muestra. Los canales de referencia y muestra miden el CO₂ en un solo paso a través del uso de filtros ópticos apropiados para la banda seleccionada. El canal del CO₂ de la muestra usa un filtro óptico fijado a 4.24 μm. Éste filtro corresponde a la banda de absorción para el CO₂. La concentración del CO₂ presente en el paso óptico puede resultar en una reducción de la energía IR cuando viaja a través de la óptica. El canal de referencia es establecido usando un filtro con una longitud de onda fijada a 3.95 μm (LI-COR, 2002).

Para la determinación de H₂S, se realiza a través del WEST TOX-05-H₂S-BH, la medida de sulfuro de hidrógeno se basa en la relación de absorción de la radiación infrarroja de referencia y la radiación emitida por la muestra.

Las medidas de ambos gases son recolectadas y monitoreadas de manera remota, a través de una Palm, utilizando la aplicación Flux Manager.

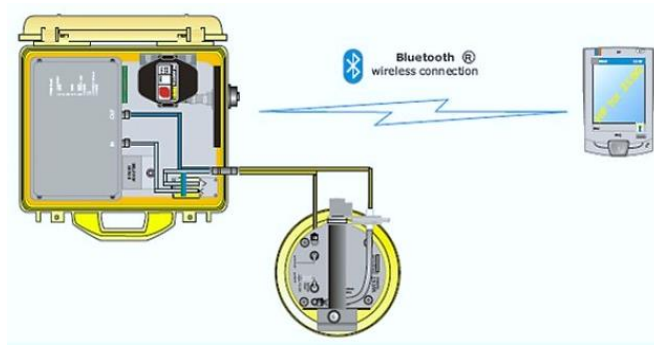


Figura 2. Flujómetro equipado para la determinación simultánea de H_2S y CO_2

2.1.3. Determinación de la concentración de Radón - Torón

Para la determinación de Radón - Torón, se realiza con la ayuda de detectores de centelleo. Cuando el radón o los gases del torón se descomponen, emiten una partícula alfa. La partícula alfa golpea el material de centelleo en el detector que emite un fotón de luz en respuesta.

El fotón de la luz se detecta, se convierte en un pulso eléctrico y se amplifica mediante el tubo fotomultiplicador. Este impulso se envía a la electrónica de la placa de interfaz para una mayor amplificación, conformación de forma de onda, discriminación y, si corresponde, conteo.



Figura 3. Equipo portátil para determinación de Radón, Pylon AB6A.

El equipo (Pylon AB6A, Figura 3) usa el recuento junto con varias fórmulas programadas y constantes para proporcionar datos o calcular los niveles de radón dentro de la muestra. También realiza muchas tareas periféricas, como comunicaciones locales y remotas, funciones de calibración semi-automatizadas, monitoreo de temperatura, etc (Pylon AB6A, 2014).

Entre los principales componentes de un contador portátil se encuentra el generador de centelleo, el fotomultiplicador, y la unidad de almacenamiento de datos. El generador de centelleo (celda de Lucas) está conformado por un revestimiento de sulfuro de zinc, activado con plata, el cual genera impulsos de luz en respuesta a las partículas de energía liberadas por el material radiactivo. Las partículas alfa, emitidas a partir del decaimiento radiactivo del ^{222}Rn , al chocar con el sulfuro de zinc activado son convertidas en átomos de helio, y el sulfuro al “relajarse”, cuando regresa a su estado basal, emite fotones de luz. La ventana de la celda permite al equipo contar los impulsos de luz, los cuales son amplificados por un tubo fotomultiplicador, convirtiéndolos en una señal eléctrica y que es transformada

en señales digitales por un microprocesador, generando pulsos que son contados y registrados en intervalos definidos (Pylon AB6A, 2014).

Suponiendo que se tienen las primeras tres cuentas en los primeros tres minutos, las cuentas aproximadas para el radón están dadas por la expresión:

$$\text{Cuentas de } ^{222}\text{Rn} = 0.87C_3 + 0.32C_2 - 0.34C_1 \quad (5)$$

Mientras que las cuentas aproximadas de torón durante los primeros tres minutos y eliminando las cuentas de radón, pueden ser calculadas de la siguiente manera:

$$\text{Cuentas de } ^{220}\text{Rn} = C_1 + C_2 + C_3 - \text{Cuentas } ^{222}\text{Rn} \quad (6)$$

La concentración del radón (^{222}Rn) en el Pylon AB6A utiliza la siguiente fórmula:

$$^{222}\text{Rn} = \frac{NCPM}{\#AE \times CF \times E \times V \times A} \quad (7)$$

Dónde:

- **NCPM** es las cuentas netas por Minuto, determinadas como Cuentas totales por minuto (TCPM) menos sistema de fondo (SBG). Las TCPM se calculan de la siguiente manera:

$$TCPM = \frac{TC}{(\#Int - \#DInt) \times IntLen} \quad (8)$$

Dónde:

- TC corresponde a las Total de cuentas: $TCx + TCx + 1 + TCx + n$,
- #Int, el número de intervalos (13),
- #Dint corresponde al número de intervalos a descartar (1) e
- IntLen corresponde al intervalo en minutos (1).
- **#AE** corresponde al número de emisiones Alpha, que para el radón serán 3,
- **CF** corresponde al factor de conversión de dpm a CPi, que será de 2.22;
- **E** corresponde a la eficiencia del detector (0.745);
- **V** el volumen del detector en litros (0.2721 L) y
- **A** corresponde al factor de corrección del decaimiento.

$$A = e^{-(\lambda \times \Delta T)} \quad (9)$$

Dónde:

- Con λ igual a $0.0001258 \text{ min}^{-1}$ para el Radón y
- ΔT es calculado a partir de la diferencia del tiempo (día y hora) del punto medio en el intervalo de conteo de interés menos e tiempo (día y hora) en que inicia la toma de muestra.

A partir de la concentración de ^{222}Rn se determina la concentración de ^{220}Rn con la siguiente ecuación (Gutierrez, X.C., 2008)

$$^{220}\text{Rn} = \left(\frac{\text{Cuentas}^{220}\text{Rn}}{\text{Cuentas}^{222}\text{Rn}} \right) \times ^{222}\text{Rn} \quad (10)$$

2.1.4. Determinación de Vapor de Mercurio

En la determinación de Hg, la muestra recolectada es introducida al equipo (Jerome 431-X, *Figura 4*).

Una delgada película de oro, en presencia de vapor de mercurio, experimenta un aumento en la resistencia eléctrica proporcional a la masa de vapor de mercurio en la muestra. Una bomba interna extrae el aire ambiente a través de un filtro de depurador y al sistema de flujo.



Figura 4. Equipo medidor de Hg, Jerome 431-X.

Después de 2 segundos, se abre la derivación del solenoide de muestra, cerrando el filtro del depurador del sistema de flujo (*Figura 5*).

La muestra de aire pasa a través de un filtro (eliminando cualquier gas ácido que interfiera con la respuesta del sensor al mercurio) y se adhiere sobre la película de oro del sensor, el sensor absorbe el vapor de mercurio. Nueve segundos después de comenzar, la derivación del solenoide de muestra se cierra y el resto de la muestra se extrae a través del filtro del depurador y el sistema de flujo.

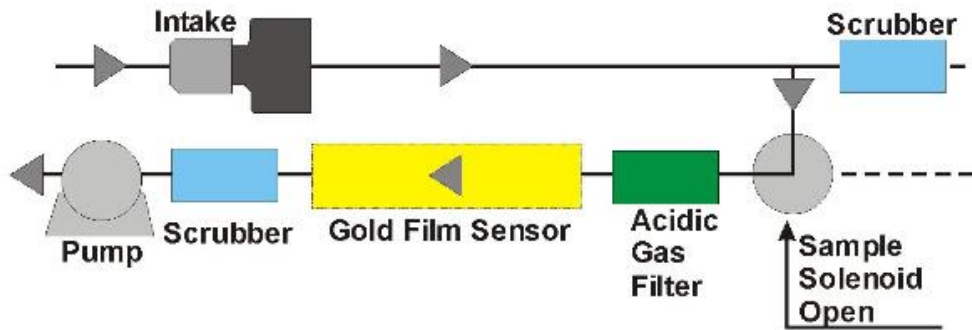


Figura 5. Esquema de funcionamiento de medidor de vapor de mercurio.

El instrumento determina la cantidad absorbida y muestra la concentración medida en la pantalla digital en miligramos por metro cúbico (mg/m³) de mercurio (Jerome, 2011).

2.1.5. Determinación de sulfuro de hidrógeno

En la determinación de H₂S, la muestra recolectada es introducida al equipo (Jerome 631-X, Figura 6).



Figura 6. Equipo medidor de H₂S, Jerome 631-X

Una delgada película de oro, en presencia de sulfuro de hidrógeno, experimenta un aumento en la resistencia eléctrica proporcional a la masa de sulfuro de hidrógeno en la muestra.

Cuando se introduce la muestra, una bomba interna extrae el aire ambiente sobre el sensor de película de oro durante un período preciso.

El sensor absorbe el sulfuro de hidrógeno.

El instrumento determina la cantidad absorbida y muestra la concentración medida de sulfuro de hidrógeno en ppm (User Manual Jerome 631-X).

2.1.6. Espectrometría de Masas

Los métodos de medición por espectrometría de masas se han convertido en una ayuda diagnóstica indispensable en numerosas ramas del proceso de ingeniería, tecnología y desarrollo de productos, medicina e investigación científica básica.

Principalmente filtros de masa cuadrupolares (Figura 7) se utilizan hoy en día particularmente para estas tareas de medición. Las propiedades de los filtros de masa cuadrupolares que son especialmente útiles para estas aplicaciones son la manera simple

de escanear todo el rango de masa, alta sensibilidad, alta medición y frecuencia de repetición, amplio rango de medición.

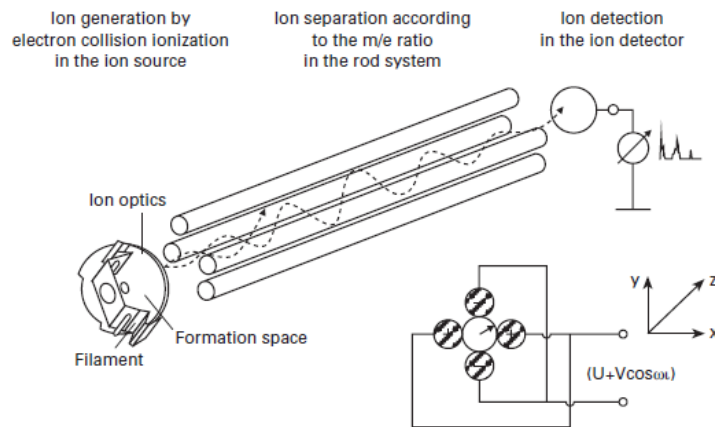


Figura 7. Esquema de funcionamiento de espectrómetro de masas cuadrupolar.



Figura 8. Espectrometro de masas (ThermoStar TM GSD 301)

Un espectrómetro de masas cuadrupolar (ThermoStar TM GSD 301, Figura 8) destinado a mediciones de presión parcial es en principio un vacuómetro de ionización equipado con un dispositivo adicional, el sistema de varilla, que en primer lugar separa los tipos de iones producidos por el proceso de ionización según su relación masa / carga (m / e) antes de medirlos con un detector de iones.

Los iones se separan en un campo de cuadrupolo eléctrico de alta frecuencia entre los cuatro electrodos de barra.

El voltaje entre los electrodos consiste en una tensión alterna de alta frecuencia y una tensión directa superpuesta. Cuando los iones están atrapados en la dirección del eje del campo perpendicular al plano del diagrama, realizan oscilaciones perpendiculares al eje del campo bajo la influencia del campo de alta frecuencia. Para ciertos valores de tensión y frecuencia, solo los iones con una relación particular m / e pueden atravesar el campo de separación y alcanzar el detector de iones. Los iones que tienen una relación masa / carga diferente son rechazados por el campo cuadrupolar y, por lo tanto, no pueden alcanzar el detector.

2.1.7. Desgasificación Difusa

La desgasificación es un proceso continuo, debido a que los gases son emitidos de forma constante por los diferentes tipos de magma. La desgasificación difusa en sistemas volcánicos se utiliza para identificar los gases emanados por el sistema magmático, que son incorporados a áreas hidrotermales para ser liberados luego a la atmósfera a través del edificio volcánico. El mecanismo de transporte de estos gases en rocas y suelo puede ser por, difusión; ligado a un gradiente de concentración, un proceso físico irreversible, en el que partículas se introducen en un medio en el que inicialmente estaban ausentes, aumentando la entropía del sistema, este se basa en la Ley de Fick. Otro proceso de transporte puede ser, por advección, donde el gas es transportado por el movimiento de una fase (López D. 2004), un proceso que involucra el movimiento de materia resultado de la acción de una fuerza, lo que implica un gradiente de presión, descrito por la Ley de Darcy y, por último, la convección, proceso que se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. El flujo de agua y gases, así como también la transferencia de calor y el transporte de especies disueltas a través de las zonas permeables, son procesos combinados que, por técnicas geoquímicas, permiten identificar fallas que transfieren fluidos y calor hacia la superficie (Padrón et al, 2003).

2.2. Gravimetría

2.2.1. Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos usados en la exploración geotérmica para la detección de estructuras son:

Tabla 1: Métodos Geofísicos para la identificación de estructuras. Modificado de (Mwangi).

Método	Descripción
Magnetometría	Ampliamente usado en la exploración geotérmica para el mapeo de estructuras geológicas basado en la magnetización variable en rocas
Gravimetría	Utilizado en la exploración geotérmica para detectar formaciones geológicas con diferentes densidades, es como tal un típico método estructural
Sísmica Activa	Detecta la distribución de la velocidad del sonido y las anomalías en la tierra y su atenuación
Sísmica Pasiva	Detecta la actividad sísmica en la tierra

2.2.2. Exploración superficial.

Debido a que los campos geotérmicos de alta temperatura se localizan generalmente en las áreas de vulcanismo reciente relacionadas con las fajas sísmicas, son éstas precisamente las zonas que se seleccionarán para efectuar los primeros trabajos de reconocimiento. También es importante al principio efectuar un mapeo de las

manifestaciones termales superficiales localizadas dentro y fuera del área en estudio; esto es necesario, ya que éstas no se localizan necesariamente sobre el yacimiento, sino que los fluidos geotérmicos se desplazan siguiendo fallas o fisuras o cualquier otra zona de alta permeabilidad.

2.2.3. Método gravimétrico

Las investigaciones gravimétricas se basan en la determinación de las perturbaciones del campo de gravitación causadas por la existencia de masas más pesadas o más livianas en el subsuelo. Debido a ellas la dirección, y el valor de la gravitación cambian de un punto a otro. Los cambios son más importantes, donde entran en contacto unidades geológicas de diferente densidad.

2.2.4. Fundamento físico

La expresión de la atracción de la gravedad requiere una comprensión de conceptos básicos de la física relacionando fuerza, aceleración y potencial.

Fuerza de gravedad: la teoría detrás de la prospección gravitacional está basada en la Ley de Newton que expresa la fuerza de atracción entre dos partículas en términos de sus masas y la separación entre ellas. Esta ley establece que dos partículas de masa m_1 y m_2 respectivamente, cada una con dimensiones muy pequeñas comparadas con la distancia de separación “ r ” de su centro de masa (B. Dobrin & H. Savit, 1988).

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (11)$$

Donde G , es la constante de la gravitación universal.

Potencial gravitacional: El análisis de ciertos tipos de campos de fuerzas, tales como gravitacional, magnético o eléctrico, pueden a veces ser simplificados usando el concepto de potencial. El potencial en un punto en un campo es definido como el trabajo hecho por la fuerza en movimiento por unidad de masa desde un punto de referencia arbitrario del punto en cuestión.

2.2.5. Corrección o reducción de datos gravimétricos

Corrección por latitud: se realiza debido a la variación de la aceleración de la gravedad, que depende de la latitud, ya que la aceleración es mayor conforme nos acercamos a los Polos, y es menor en el Ecuador, y también es afectada, pero en menor proporción, por la fuerza centrífuga por efecto de rotación, que es menor en los Polos y mayor en el Ecuador, y tiene un sentido contrario a la fuerza de gravedad.

La fórmula internacional de gravedad de 1980, recomendada por la Asociación Internacional de Geodesia, es la siguiente:

$$G_{Gal} = 978.0327 \left(1 + 0.0052790414 \text{sen}^2 \varphi + 0.0000232718 \text{sen}^4 \varphi + 0.0000001262 \text{sen}^6 \varphi \right) \quad (12)$$

Corrección por Altitud: La Corrección por Altitud está dada por la variación de elevación sobre el nivel del mar, por la densidad del material sobre la elevación, y por las elevaciones o cerros que se encuentren a su alrededor. Dado esto, se tienen 3 diferentes tipos de correcciones:

Corrección por aire libre: Esta corrección se refiere a la intensidad de la gravedad que varía de acuerdo a la distancia del punto de medición con respecto al centro de la Tierra, es decir, cómo varía la fuerza de gravedad con la elevación (z) de la estación base a la estación medida.

$$C_{AL} = 0.3086 * h(mGal) \quad (13)$$

Corrección de Bouguer: Es similar a la corrección por elevación, sólo que toma en cuenta el material entre la estación base y la estación medida, aproximando todas las masas arriba o abajo del plano de referencia con una base homogénea de extensión lateral infinita y de espesor igual a la altura h de la estación respecto al plano de referencia (estación base).

$$C_B = 0.04193 * \rho * h \quad (14)$$

Corrección topográfica: Se considera el efecto de atracción de masa dado por la topografía (valles y montañas) de alrededor de la estación, tanto las situadas por encima de la estación como las depresiones situadas debajo de la estación, pero como este material en realidad no existe, debemos sumar su atracción para compensar.

Corrección de deriva: Se realiza principalmente debido a que las mediciones tomadas varían en intervalos de tiempo, y estas variaciones pueden ser ocasionadas por deriva instrumental o efectos luni-solar. Las variaciones se pueden observar cuando se repite una medida en un mismo sitio después de que haya pasado un tiempo.

2.2.6. Anomalía de Bouguer completa

A la reducción de la gravedad observada al nivel de la estación base, la cual incluye todas las correcciones mencionadas anteriormente y comparándola con la gravedad teórica, es lo que comúnmente se conoce como Anomalía de Bouguer.

$$g_b = g_{obs} - g_n + 0.3086 * h - 0.04193 * \rho * h + TC \quad (15)$$

Donde g_{obs} es la gravedad observada y g_n es la gravedad normal.

2.2.7. Anomalía Regional y Residual

Para poder hacer una interpretación del basamento, se separa la anomalía de gravedad de interés. Esto se hace considerando que la Anomalía de Bouguer es la suma de dos componentes: efecto regional, que corresponde a las masas profundas y lejanas (generalmente el basamento), y efecto residual debido a las masas superficiales (estratos geológicos con mayor o menor densidad que las rocas circundantes).

Dado que lo que interesa hacer resaltar es el efecto debido a la masa superficial, se elimina o reduce el correspondiente a la masa profunda.

La Anomalía Residual se define como:

$$\text{Anomalía Residual} = \text{Anomalía de Bouguer} - \text{Anomalía Regional} \quad (16)$$

2.2.8. Primera y segunda derivada

La primera derivada mide pendientes y la segunda derivada muestra los cambios de pendiente, es decir que mide las curvaturas del campo de gravedad en nuestro caso (Figura 9).

La importancia del método es que, al destacar hasta pequeños cambios de pendiente, permite separar dos cuerpos o masas que por estar cerca se muestran como una sola anomalía.

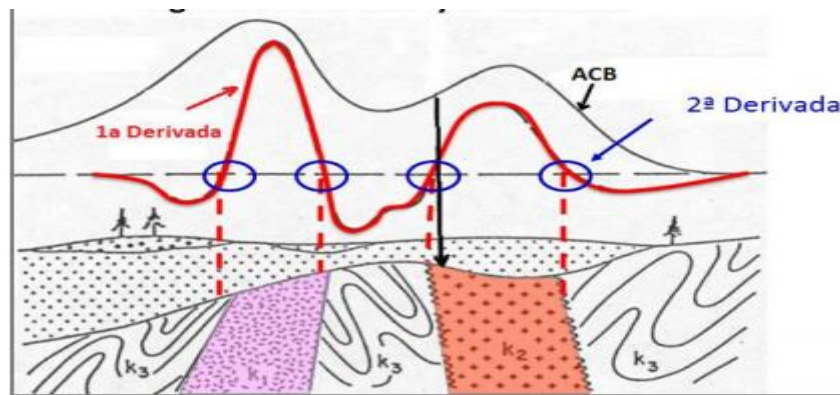


Figura 9, Significado de la primer y segunda derivada (modificado de Ortega, 2014)

2.2.9. Espectro de Potencia

El espectro de potencia se define como el cuadrado del módulo de la transformada de Fourier, gráficamente, el espectro de potencia es una curva exponencial que no depende de la posición x_0 en la que se encuentre la masa, aunque sí de la masa misma, pues para una frecuencia de 0, su valor es de $4\pi G^2 m^2$. En la medida en que la base del cuerpo que genera la anomalía gravimétrica se va haciendo más superficial, el pico del espectro se

mueve hacia valores más altos de número de onda, y su amplitud disminuye. Para un cuerpo de tamaño fijo, a medida que incrementa la profundidad de su centro de masa, el pico del espectro se mueve hacia valores más bajos de número de onda, y la amplitud del espectro disminuye (Ortega, 2014).

2.3. Análisis Estadísticos

2.3.1. Análisis de Poblaciones (Halil Aral, 1988)

En el área estadística, una población es un conjunto de elementos que presentan características comunes.

Un análisis estadístico de poblaciones se realiza con el objetivo de determinar la cantidad y tamaño de dichas poblaciones.

En el caso de los análisis geoquímicos, considerando un gas en particular, es posible que este gas se encuentre distribuido uniformemente en toda el área de estudio, de ser este el caso, se puede concluir que solo existe una población estadística para dicho gas.

Si en el área de estudio hubiera anomalías en la concentración, es posible que exista más de una población; las poblaciones pueden definir los valores normales del terreno (que podrían ser interpretados como valores de fondo), y los valores atípicos (o anomalías).

Este análisis no es un análisis espacial, es decir, no considera la ubicación relativa de los puntos, para realizarlo, únicamente se debe de tomar todos los datos relativos a la variable de interés, y se debe realizar un gráfico de probabilidad acumulada. Dicho gráfico, en el eje de las abscisas, deberá tener la cantidad total de los datos analizados o una escala en porcentaje de los mismos; y en el eje de las ordenadas, la variable de interés, tal como se muestra en la *Figura 10*.

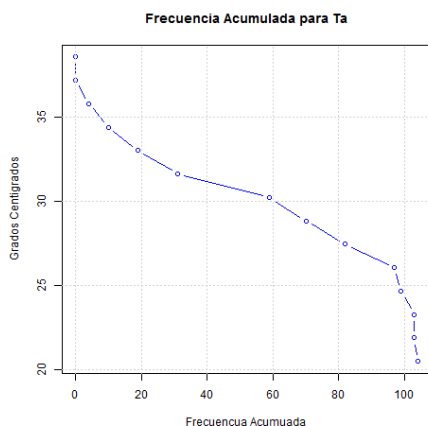


Figura 10, Grafico de Probabilidad acumulada para la temperatura ambiente del área de estudio.

Este gráfico puede interpretarse de la siguiente manera: únicamente 20 del total de los datos analizados tiene una temperatura mayor de 26°C de temperatura ambiente.

Para obtener el número de poblaciones de dicho gráfico, se deben de estimar los puntos de inflexión del mismo.

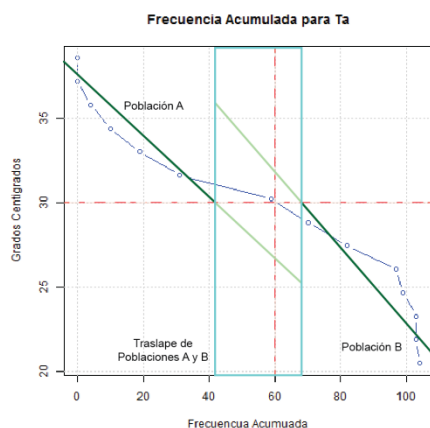


Figura 11, Gráfico de Probabilidad acumulada con la división de las poblaciones.

Punto de inflexión: es todo punto en donde la curva pasa de ser cóncava a ser convexa o recíprocamente; es decir es el punto donde hay un cambio de curvatura en el gráfico. Por ejemplo, en la *Figura 10* tiene un punto de inflexión en la coordenada (60,30); en este punto se puede ver claramente un cambio en la curvatura, pasa de ser una función cóncava (para valores menores de 60 en la abscisa) a ser una función convexa (para valores mayores a 60).

Al conocer que el gráfico posee un punto de inflexión, se puede asegurar que esta serie de datos tiene dos poblaciones, una población con valores menores a 30°C, y otra población con valores mayores a 30°C.

Las poblaciones se pueden representar aproximadamente como líneas rectas en el gráfico, tal como se muestra en el *Figura 11*. Como se puede notar hay un intervalo en la que ambas rectas se traslapan, en este intervalo, las sumas geométricas de las rectas con diferente pendiente tienden a formar un tercer grupo, una sub-población en que se podría denominar población de transición, que, para este caso, podría definirse entre 28°C y 33°C.

Por lo que, para el caso de la temperatura ambiente, las poblaciones identificadas son:

Tabla 2. Valores para cada una de las poblaciones calculadas.

Población	Límites [°C]	Número de Muestras
B (Valores de fondo)	20°C – 27°C	30
A-B (Transición)	28°C – 33°C	45
A (Anómalo)	34°C – 40°C	25

Estas poblaciones son introducidas en la interpolación de los mapas de isocontornos de temperatura ambiente para resaltar cada una de las poblaciones, tal como se muestra en la *Figura 12*.

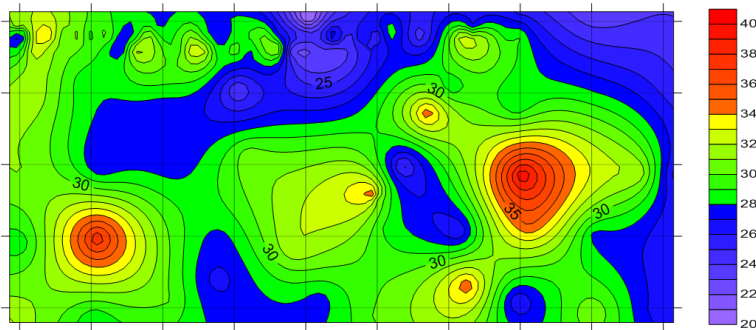


Figura 12. Mapa de isocontornos para la temperatura ambiente, con sus respectivas poblaciones.
Población A: Azul, Población A-B: Verde, Población B: Rojo.

2.3.2. Análisis de Clúster (Mwangi)

Clúster son agrupaciones de datos con características similares, estos clústers juegan un papel importante en la forma como se analiza y entiende el mundo.

El análisis de clúster puede consistir en:

- Seccionar o dividir un el set de datos en un número limitado de elementos que sean similares entre sí.
- Unir un número limitado de elementos en uno de mayor tamaño.

Para realizar una separación de los datos en clústers existen diversos algoritmos, dos se los más utilizados se detallan a continuación (Hernández, 2011):

Algoritmos de particionamiento:

Estos algoritmos consisten en crear una división preliminar de los datos en un número definido de grupos iniciales, luego se evalúa los conjuntos para verificar que los datos agrupados tengan las propiedades apropiadas para definirse como clústers, en caso que no lo sean, se reorganizan los grupos previamente creados hasta que se éstos se puedan determinar clústers.

Dentro de este conjunto de algoritmos, el más conocido es el k-means, el cual consiste en representar cada clúster por un valor medio.

Para calcular clústers por este algoritmo, primero se establece el número de clústers que se desean calcular, estableciendo para cada uno su valor medio, luego se agrupan aquellos datos que su valor sea cercano a la media del clúster, posteriormente se recalcula el valor medio y se agrupan nuevamente los datos cuyos valores estén cercanos a la nueva media del clúster; esto se repite hasta que, entre iteraciones, no exista ningún cambio.

Un ejemplo de iteraciones con este algoritmo es mostrado en la *Figura 13*.

Este método resulta muy simple y tiene un grado relativamente alto de eficiencia, pero presenta problemas cuando son datos que tienen mucha interferencia (ruido).

Otra desventaja del método es que, como entrada al algoritmo se debe de conocer el número de clústers a analizar, pero esto puede causar problemas cuando no se seleccione el número apropiado de clústers para describir el set de datos, por lo que resulta necesario realizar un análisis previo para conocer el número óptimo de clústers para cada caso.

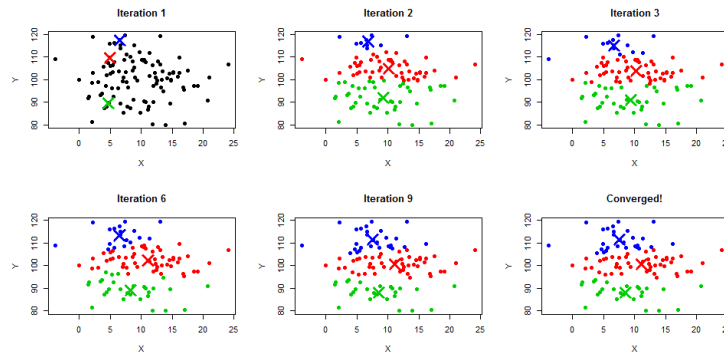


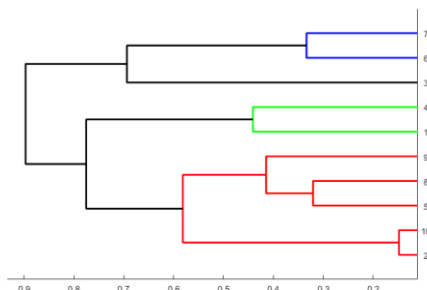
Figura 13. Ejemplo de iteraciones para el algoritmo k-means.

Para este tipo de algoritmos se suele normalizar los datos antes de ser procesados.

Algoritmos de Jerarquía:

Este algoritmo se basa en agrupar los datos en base a las distancias (similitudes) entre ellos; como entrada del algoritmo se debe utilizar una matriz con las distancias entre todos los datos.

Este algoritmo es aglomerativo, es decir, inicia con un número de clústers igual al número total de datos, luego se van agrupando basándose en las distancias entre ellos, reduciendo el número de clústers presentes; este procedimiento se repite hasta que no se puedan agrupar más los datos.



El resultado de este algoritmo no es un mapa o una tabla con todos los clústers, el resultado es un gráfico jerárquico como el mostrado en la *Figura 14*. Este gráfico debe de ser tratado para poder calcular los clústers deseados.

Figura 14. Dendograma, resultado de los algoritmos de jerarquía.

Para el ejemplo mostrado, el eje de las abscisas es la distancia entre los clústers, y el eje de las ordenadas indica el número de clústers para el valor más bajo de ponderación.

Para obtener los clúster de dicho gráfico se debe de seleccionar un valor de distancia y trazar una recta vertical, el número de líneas del diagrama que corte, ese será el número de clústers, dichos clústers agruparán todos los elementos que estén en dicha línea desde el punto de corte.

Este algoritmo elimina la limitante de tener que seleccionar un número definido de clústers previo a realizar el cálculo, sino que, en este caso, se selecciona el número de clúster que sea más apropiado directamente del gráfico (Dendograma).

Su mayor desventaja es que al analizar series de datos muy grandes (mayores a 1000 datos), puede llevar una gran cantidad de tiempo (incluso horas dependiendo de las condiciones).

A pesar que en este caso el número de clústers se puede seleccionar a partir de un gráfico que nos permitirá tener una mayor claridad de las agrupaciones, aún es posible escoger un número no apropiado de clústers, por lo que siempre se requiere realizar análisis adicionales para estimar el número óptimo de los mismos.

Se debe de escoger un número de clústers tal que al incrementar un clúster mas no mejore significativamente la suma de los cuadrados dentro de cada clúster.

Para verificar esto, se debe de realizar el análisis para 1 hasta 10 clústers, para cada caso se debe de calcular la suma de los cuadrados de cada uno de ellos y se deben de graficar con respecto al número de clústers. El punto en donde cambia la pendiente, se puede considerar el número apropiado de clústers que debe ser calculado.

2.3.3. Correlación estadística de los datos (Hall, 2015)

Consiste en identificar si los datos de una variable tienen relación con los datos de otra variable, es decir, que si al cambiar una variable, la otra también sufre algún cambio.

La forma más simple de realizar una correlación es observar patrones comunes en diferentes sets de datos, a esto se definirá como correlación descriptiva; esta correlación puede ser fácil de aplicar en datos con tendencias muy bien definidas, pero en casos con mucho ruido o con tendencias muy poco definidas, identificar correlación puede no ser muy sencillo.

Correlación estadística de Pearson

Esta correlación es un algoritmo que realiza una comparación lineal entre ambas variables, de modo que, si las dos variables forman una línea recta entre ellas, se considerará una correlación (“r”) igual a la unidad, si ambas variables no están correlacionadas, r tendrá un valor de cero, un ejemplo de esto se puede observar en la *Figura 15*.

Para calcular el valor de dicho coeficiente se utiliza la siguiente ecuación:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (17)$$

Dónde:

- “n” es el número de muestras,
- “x” y “y” son las variables que se desean correlacionar.

La correlación tiene valores positivos, cuando la pendiente de la recta formada por ambas curvas es positiva, y negativa en el caso que la pendiente formada por ambas curvas sea negativa.

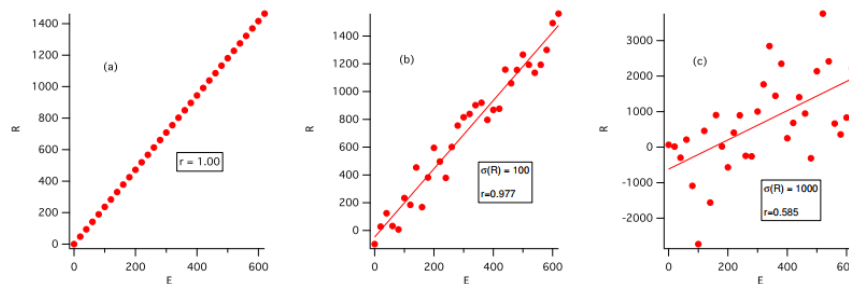


Figura 15. Correlación de dos variables, (E,a). Nótese que mientras más dispersos se encuentren los datos, menor es la correlación entre ellos (“r”).

Para establecer el valor de aceptación para el coeficiente se tienen que considerar factores tales como el nivel de interferencia (ruido) entre ambas variables, datos dispersos o anómalos entre otros; pero un valor de correlación mayor que 0.4 se puede considerar aceptable.

Esta correlación inicial puede servir como base para decidir qué datos son los que se utilizarán en los análisis multi-variables.

2.3.4. Superposición de los datos.

Este análisis se puede considerar como el siguiente paso en el análisis de clústers, en donde, los datos que han sido procesados, y tienen un comportamiento similar, se analizan de manera conjunta para dar un resultado final.

Consideraciones:

- Todos los datos deben de haber sido normalizados antes de iniciar el análisis de clústers, esto es para eliminar la gran diferencia entre valores que pudiera existir entre un set de datos y otro.
- Se deben de comparar datos que tengan correlaciones del mismo signo, es decir, solo variables que tengan un coeficiente de correlación positivo, en caso contrario, al realizar la superposición, las anomalías podrían eliminarse.
- Es conveniente superponer variables que tengan un coeficiente de correlación aceptable o superior, esto es para resaltar las anomalías que estos representan.
- A las variables que se superpondrán se les puede asignar una ponderación o peso dependiendo si se considera que éstas representan mejor o no la anomalía que se desea resaltar.
- Puede hacerse más de una superposición, esto es en los casos que se considere que algunas variables describan mejor un determinado comportamiento que otras.

La superposición consiste en sumar los valores normalizados de las variables de interés, aplicándole a cada una su correspondiente ponderación.

El resultado de las superposiciones realizadas, pueden ser graficados como post map, o como mapa de isocontornos pero seleccionando bien la técnica de interpolación.

CAPITULO 3 Metodología

3.1. Gases Difusos

El estudio se centra al sur de un campo geotérmico en la etapa de factibilidad, con el objetivo de determinar la existencia o no de potencial geotérmico, a partir de estudios geofísicos, en este caso la gravimetría y estudios geoquímicos, como los gases difusos.



Figura 16. Muestreo en Campo

Para esta investigación, la geoquímica de gases difusos se trabajó en un área de 38 m², trazando 19 puntos en dirección Este – Oeste y 9 puntos en dirección Norte-Sur, con un espaciado de 500 metros entre cada uno, a excepción de los primeros dos perfiles (dirección Este – Oeste), al norte del área de estudio, con un espaciado de 200 metros entre cada punto.

Fue necesario realizar muestreos adicionales para completar el área de estudio, tomándose 21 puntos complementarios dentro del área de interés (Figura 16).

Un total de 224 puntos fueron analizados y un total de 1568 mediciones en campo: concentración de radón, vapor de mercurio, sulfuro de hidrógeno, flujo de CO₂ y H₂S, temperatura ambiente y del suelo.

3.1.1. Mediciones de flujo de dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Para la medida de flujo de CO₂ y H₂S, se utilizó un medidor de flujo portátil marca West System, el cual consiste en una cámara de acumulación tipo A, un analizador infrarrojo para CO₂ (LI-820), un analizador con detección infrarroja para H₂S modelo WEST TOX-05-H₂S-BH, una bomba y una Palm para controlar de manera remota el medidor de flujo y recolectar los datos.



Figura 17. Medición de Flujo de CO₂ y H₂S.

Previo a la medida de flujos, el terreno es preparado, de tal manera que el borde de la cámara de acumulación quede ajustado de forma adecuada, impidiendo la entrada de aire atmosférico, el cual afectaría en los resultados. Es importante que los detectores hayan alcanzado la temperatura óptima de operación, por lo que deberán encenderse al menos 30 minutos antes de la primera toma de muestra. La adquisición de los datos es tomada luego de 3 minutos en cada uno de los puntos seleccionados. Con ayuda del controlador remoto, Flux Manager, se adquieren los datos en tiempo real, además permite obtener la información de cada gas en estudio y ajustar la pendiente con mejor correlación. La información obtenida en Flux Manager es en ppm/seg, la cual es calculada a g/m²día.

3.1.2. Determinación de la concentración de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de mercurio (Hg).



Figura 18. Sonda de acero Inoxidable.

Para la determinación de H₂S y Hg, se procedió instalar una sonda de acero inoxidable (Figura 18), provista de un sello de goma (para mantener hermético y evitar pérdida de gases).

Con ayuda de una jeringa de 50 mL, se recolectan muestras independientes para cada especie química, a una profundidad aproximada de 50 cm. Posteriormente, se realiza la inyección de la muestra colectada en los equipos (Figura 19) Jerome 631X y Jerome 431X, de forma independiente, para la determinación de H₂S y Hg respectivamente.



Figura 19. Determinación de Hg / H₂S en equipos Jerome.

3.1.3. Determinación de ²²²Rn y ²²⁰Rn

Para la determinación de ²²²Rn en campo, se realizó a través de un medidor portátil, Pylon AB6A, equipado con una celda de centelleo (celda de Lucas) tipo 600A (Figura 20), con un volumen nominal de 0.271 litros. Las mediciones de ²²²Rn fueron tomadas a 50 cm de profundidad, utilizando para la extracción de la muestra, una bomba manual para generar vacío, y extraerla a través de una sonda conectada directamente a la Celda de Lucas.



Figura 20. Medidor portátil de Radón, Pylon AB6A

Se configuró el método para toma de datos en intervalos de un minuto, durante trece minutos, descartando el primer minuto.

Al final de los 13 minutos, el Pylon AB6A, calcula la concentración de ^{222}Rn en pCi/L, a la vez genera una tabla de datos para cada minuto monitoreado, la cual es utilizada posteriormente para el cálculo de la concentración de ^{220}Rn .

3.1.4. Muestreo de gases

Para la determinación de gases en el subsuelo, se procedió a instalar una sonda de acero inoxidable (*Figura 18*), provista de un sello de goma (para mantener hermético y evitar pérdida de gases).

Con ayuda de una jeringa de 50 mL, se recolecta una muestra de gases, a una profundidad aproximada de 50 cm. Posteriormente, se realiza la inyección de la muestra colectada en vacutainer de vidrio, los cuales se encuentran al vacío y cuentan con un tapón de goma blando, que permiten que la aguja atraviese hasta el interior del tubo.

Éstas se trasladan al laboratorio para su posterior análisis en un espectrómetro de masas cuadrupolar, ThermoStar TM GSD 301 (*Figura 21*), con el cual se cuantifica el contenido de gases presentes en la muestra.



Figura 21. Espectrómetro de masas cuadrupolar, en recuadro se muestra los vacutainer para el traslado y almacenamiento de muestras.

3.2. Gravimetría

3.2.1. Adquisición de datos

En el proceso para tomar la medida es primordial seleccionar un lugar donde sea fácil la nivelación del gravímetro, tomando en cuenta que el trípode este bien colocado para asegurar la estabilidad del gravímetro, al extraer el gravímetro de la bolsa protectora se coloca sobre el trípode orientado hacia el Norte teniendo cuidado de no ser golpeado ya que es muy sensible y se puede dañar o sufrir una des calibración momentánea.

Una vez colocado el gravímetro se enciende, se guarda el nombre del punto y posteriormente en el menú nivelación se procede a nivelar haciendo uso de los tornillos de nivelación del trípode, simultáneamente con los tornillos XY y posteriormente con el tornillo F. en la pantalla del equipo indica las direcciones para lograr el equipo hasta que aparezca “☺” pero es necesario llegar a una nivelación donde $X=0$ y $Y=0$, es primordial que, cuando se realice la medida, esté en los alrededores únicamente la persona que esté nivelando el

equipo, ya que, al alejarse para que realice la medición, puede variar la nivelación del mismo y afectar la medida. Al finalizar la jornada se procede a cerrar circuito midiendo en el punto de inicio.

3.2.2. Secuencia de procesamiento

3.2.2.1. Control de calidad.

Se realiza un control de calidad donde se grafica gravedad observada contra elevación, teniendo una correlación lineal inversa. Esto con el objetivo de reducir apropiadamente los datos que reflejan variaciones en la gravedad y que solo dependen de las variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación.

3.2.2.2. Anomalía de Bouguer completa.

A partir de la corrección de aire libre, se calcula la anomalía de Bouguer Simple, posteriormente se le suma la corrección de terreno para obtener la anomalía de Bouguer completa.

Aplicando el análisis de poblaciones a la anomalía de Bouguer completa se determinan un aproximado de 3 poblaciones la cual corresponde a un valor base que está asociado a las zonas donde sus valores están en los rangos normales representando los valores bajos (no presenta una anomalía), un valor de transición está asociado a los valores que están entrando en la zona anómala manteniendo valores intermedios y un valor anómalo que está asociado a las zonas anómalas correspondientes a los valores altos.

3.2.2.3. Espectro de potencia

Se realiza una grid cuadrada en Surfer con los valores de la anomalía de Bouguer completa, que posteriormente se usa con el software WinTrans para calcular el espectro de energía, se exporta el archivo *.spe, para abrirlo en Microsoft Excel y graficar la Frecuencia contra Logaritmo de la energía.

Para cada punto de inflexión de la gráfica, se calcula la ecuación de regresión lineal, para poder calcular la profundidad de prospección dada en kilómetros con la siguiente ecuación:

$$\text{Espectro de potencia} = \frac{\text{pendiente}}{4\pi} \quad (18)$$

3.2.2.4. Anomalía regional y residual

Con el software Surfer se crea una grid, se coloca en la columna de datos Z el valor de la anomalía de Bouguer completa y usando el método de interpolación regresión polinomial definiendo una superficie cúbica. Calculando la anomalía regional, se calcula la anomalía residual de la siguiente manera:

3.2.2.5. Primera y Segunda derivada

Con el software Surfer, se calcula la derivada direccional definiendo su ángulo de dirección, un ángulo de 0° corresponde a la derivada lateral u horizontal y para un ángulo de 90° corresponde a la derivada vertical. Tanto para el caso de la primera y segunda derivada.

3.3. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el programa estadístico R (<https://www.r-project.org/>), utilizando paquetes específicos para cada caso cuando fue necesario.

Para todos los análisis se utilizó el paquete “gdata”, cuya función es leer los datos de las hojas de Excel y convertirlas en variables internas del programa. (Nota: Los códigos utilizados para realizar los análisis son detallados en el Anexo A.)

3.3.1. Análisis de poblaciones

Los gráficos de frecuencia acumulada para cada set de datos analizados fueron realizados en R; con estos gráficos se estimó el punto de inflexión, las poblaciones y de ser aplicable, las sub-poblaciones transitorias.

Las poblaciones se denominaron con las primeras letras del alfabeto latino, siendo la población “A” la población con valores más altos, y la población “B” o “C”, la población con valores más bajos, siendo esta población considerado como población de fondo.

Donde se consideró conveniente, se estimaron poblaciones de transición, dichas poblaciones se denotan con las letras de las poblaciones predominantes en la sección, es decir, la transición entre la población “A” y la población “B”, se denominó población “AB”.

Algunos set de datos presentaron problemas al momento de la estimación de los puntos de inflexión, por lo que fue necesario aplicar análisis adicionales con el objetivo de resaltar las poblaciones ocultas.

Para el caso de los datos que solo se ha podido detectar una población, se seccionó dicha población separando los valores más altos y más bajos del set de datos.

3.3.2. Análisis de Clúster

Para el análisis de clústers, se utilizó el algoritmo k-means, utilizando la función “kmeans” de R; a dicha función se le debe de ingresar una matriz con los datos a analizar, en este caso, los valores de las coordenadas (x,y) y la variable a analizar; además se le debe de introducir el número de clústers que se calcularán, 8 para este análisis.

La normalización de las variables se obtiene por medio de la función “scale” del R, esta función calcula la media, desviación estándar y normaliza todos los datos de la lista ingresada.

Como resultado de esta función, se obtiene una matriz con la división en clústers de los datos, los valores medios por clúster, el número de iteraciones realizadas, entre otros.

La matriz de clústers fue procesada para que cada punto del mapa, tuviera el valor de media del clúster al que pertenecía.

Este proceso fue repetido para cada uno de los gases a analizar, y los resultados fueron exportados a Excel por medio de un archivo separado por comas (.csv).

3.3.3. Correlación estadística

En la correlación estadística se utilizó el paquete “Hmisc” de R. Dicho paquete posee la función “rcorr” que calcula los coeficientes de correlación de Pearson, para los datos que le son ingresados, esta matriz fue exportada a un archivo separado por comas (.csv) y retomado en Excel para su análisis.

Se consideró que los datos que tengan un coeficiente de correlación mayor al valor absoluto de 0.4 serán considerados en los análisis posteriores, los que tengan valores menores a 0.4 se considerará que no tienen relación entre ellos.

3.3.4. Superposición de datos.

Se seleccionaron los gases que tuvieran una buena correlación entre ellos ($r \geq 0.4$), formando 9 grupos iniciales. Para cada grupo se realizó una superposición en Excel, asignándole la misma ponderación a cada gas.

En el análisis, no se tomaron en cuenta relaciones en las que la cantidad de datos de cada variable no fuera aproximadamente la misma, esto para evitar errores en la interpolación en las regiones en las que una variable tiene más datos que la otra.

Como resultado se obtuvieron 9 post maps, los cuales fueron filtrados eliminando aquellos que mostraban características que no eran respaldadas por ningún otro gas, y se agruparon otros gases cuya superposición describía patrones muy similares.

Resaltar que no se utilizaron mapas de isocontornos, esto se debe a que al interpolar, generaba datos que no eran congruentes con los clústers.

3.4. Correlación de gases difusos y gravimetría

Dado que los puntos en donde fueron tomados los datos no coinciden entre ambas técnicas, la correlación entre ambas técnicas solo se puede hacer de manera descriptiva.

Para realizar dicha correlación, se plantearon los hallazgos obtenidos en cada técnica individual; dichos hallazgos pueden describir posibles estructuras, posibles zonas de ascenso de los fluidos o evidencias de posibles patrones de flujo, así como áreas permeables.

Identificados los hallazgos por técnica, se correlacionaron ambas técnicas, buscando concordancias y planteando las posibles explicaciones para aquellos hallazgos que no coinciden entre ellas.

Con las no coincidencias, se plantearon recomendaciones que podrían ayudar a aclarar lo que realmente se encuentra en dichas áreas.

CAPITULO 4 Análisis de datos

4.1. Gases Difusos

4.1.1. Mapas de distribución espacial de gases difusos

En un sistema de origen volcánico, los procesos de desgasificación son continuos, y estos gases liberados por actividad volcánica son una mezcla de componentes provenientes de fuentes distintas, entre ellas el magma, que libera compuestos volátiles hacia las rocas.

Se elaboraron mapas de contorno de las anomalías de gases difusos, para los gases que corresponden a los gases de helio (ΔHe), Flujo de CO_2 , Log CO_2 , Hidrógeno (H_2), ^{220}Rn , relación $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ y vapor de mercurio (Hg).

4.1.2. Anomalía Hidrógeno (H_2) y Helio (ΔHe)

Valores de Helio arriba del valor atmosférico (5240 ppb), indican valor anómalo, los cuales se encuentran principalmente ubicados al extremo norte del área estudiada y en patrones aislados en la zona sur. La *Figura 22* y la *Figura 23* representan la distribución espacial de las anomalías para ambos gases. Estos mapas, han sido elaborados a partir de la probabilidad acumulada en el que se han identificado tres poblaciones geoquímicas diferentes. En la zona norte, en dirección Este – Oeste, se observa el mismo comportamiento de las anomalías para ambos gases, lo que sugiere una zona de ascenso de fluido.

Esta corresponde a la población alta (> 500 ppb para helio y 1550 ppm para H_2), que puede estar asociada a una desgasificación magmática, y a la que podría atribuirse una anomalía mayormente marcada por el grado de densificación de puntos monitoreados respecto al resto, lo que sugeriría igualar la densidad de puntos en el área de estudio. La anomalía de helio e hidrógeno muestra dos estructuras principales con dirección SO-NE y otra NO-SE, que podrían proyectar el límite de una estructura, de una estructura permeable y el ascenso de fluido asociado a una fuente magmática, relacionada a altas temperaturas (Magaña M.I., López D.L., 2004).

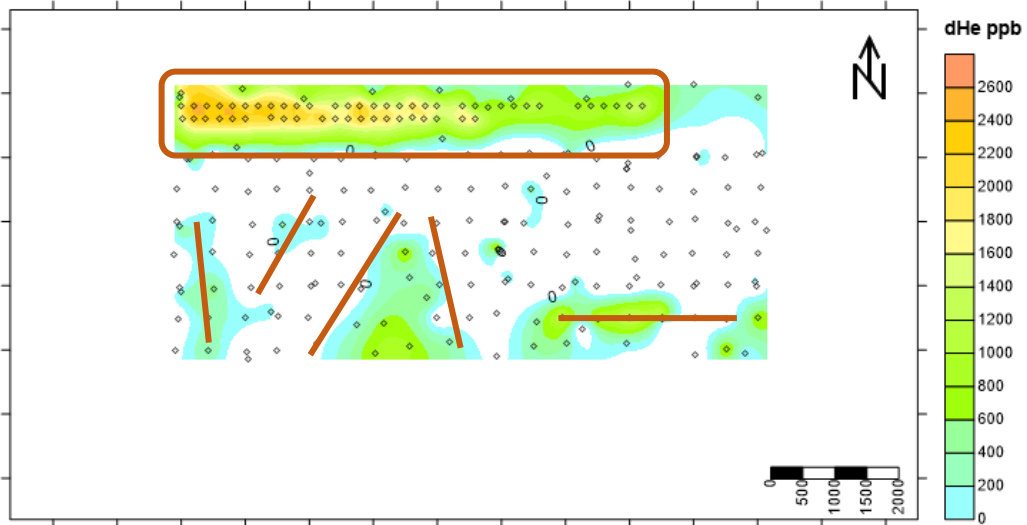


Figura 22. Anomalía de Helio (ΔHe)

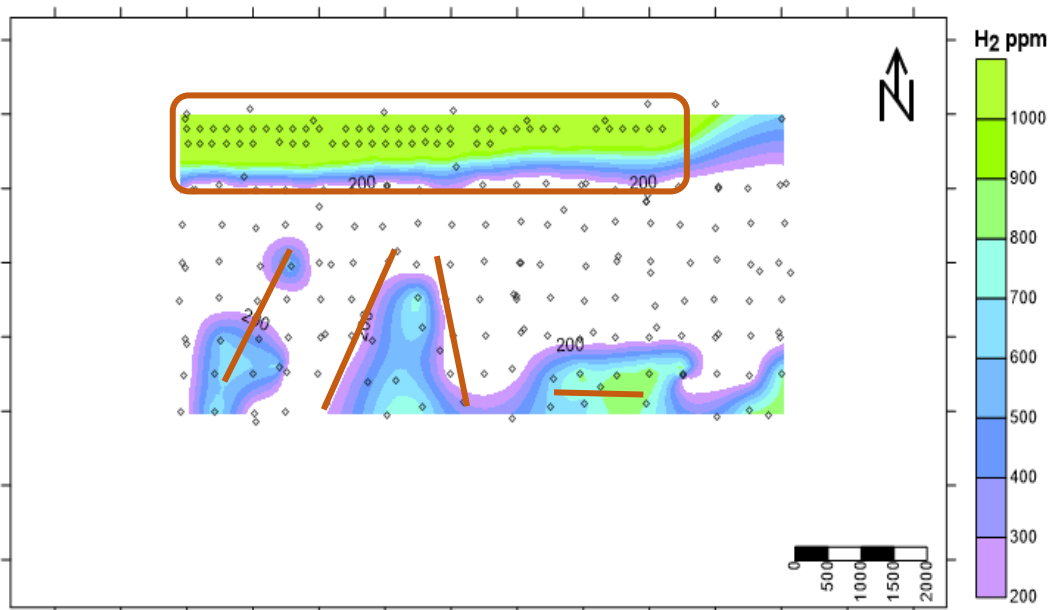


Figura 23. Anomalía de Hidrógeno

4.1.3. Anomalía de Mercurio (Hg)

Las anomalías de mercurio, los cuales se encuentran principalmente ubicadas en patrones aislados en la zona sur que, generalmente, se encuentran relacionadas con altos gradientes térmicos y baja resistividad (Hinkle, 1979). Las anomalías de mercurio podrían estar

asociadas a una estructura volcánica activa, debido a que éste proviene de los procesos de desgasificación del magma, y éste migra a la superficie por mecanismos de difusión, lo que indicaría zonas permeables.

La *Figura 24* representa la distribución espacial de las anomalías del mercurio. El mapa de contornos ha sido elaborado a partir de la probabilidad acumulada en el que se han identificado al menos tres poblaciones geoquímicas diferentes, en el cual se estimó un valor de fondo de 0.025 ppm. La anomalía de Hg coincide con las anomalías de helio e hidrógeno, coincidiendo en regiones que pueden indicar alta temperatura, ascenso vertical y fallas activas.

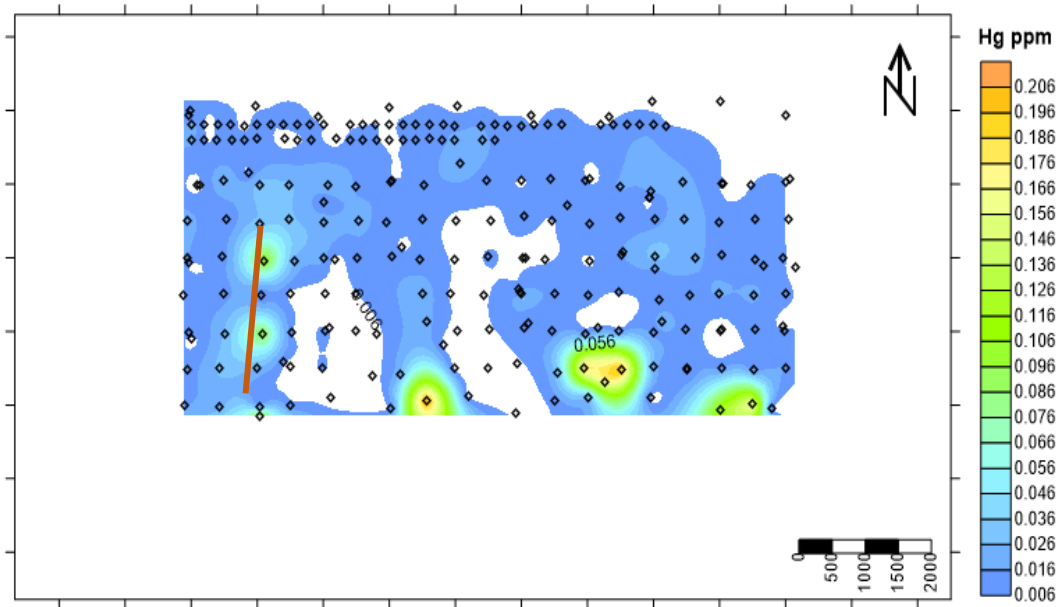


Figura 24. Anomalía de Mercurio (Hg)

4.1.4. Anomalía de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

En el aire atmosférico, la relación de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ corresponde a 295.6, valores mayores al atmosférico corresponde a la influencia de ^{40}Ar radiogénico, de origen magmático (Graham, D.W, 2002). Valores altos de esta relación isotópica, atribuible a una composición de origen magmático asociada a procesos de desgasificación, lo que podría estar indicando dos estructuras que permiten este proceso. En el mapa de contorno de *Figura 25* puede sugerirse la existencia de una estructura al Oeste del área de estudio, con dirección N-S y al Este del área de estudio con una dirección NO-SE.

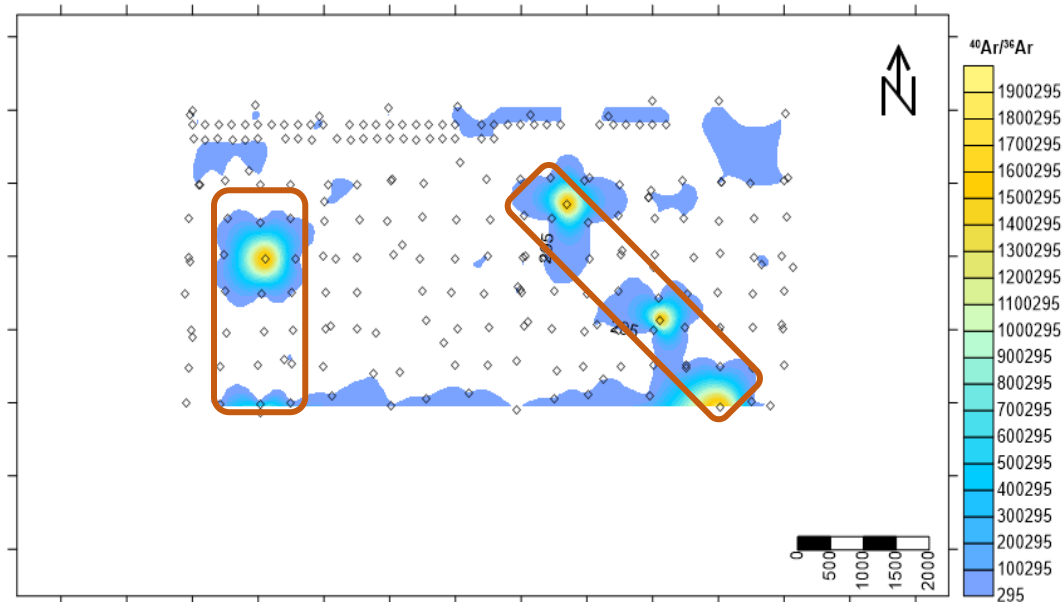


Figura 25. Anomalía de la relación de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

4.1.5. Anomalía de ^{222}Rn y $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$

Bajo el suelo, el radón puede migrar por difusión y / o convección (Tanner, 1980). Debido a la corta vida media del Torón ^{220}Rn , la difusión solo puede facilitar distancias cortas de transporte antes de que tenga lugar un decaimiento significativo (McCarthy y Reimer, 1986).

Ascenso rápido de grandes cantidades de ^{222}Rn de orígenes más profundos generalmente es posible por convección (Witcher, 1991; Cox, 1980).

Bajo las condiciones anteriormente descritas, los mapas de contorno nos estarían indicando, aquellas áreas donde el flujo convectivo es considerable, por lo que se puede atribuirse a una estructura o un conducto vertical, con buena permeabilidad, que permiten el transporte rápido desde una zona profunda la superficie.

La relación anomalías de $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$ (Figura 27), nos indica aquellas zonas en las que la fuente u origen del fluido se encuentra a poca profundidad o una falla que permite el ascenso rápido de fluido.

Se observa una posible estructura oculta, revelada por los isótopos de radón, con orientación SO-NE que coincidiría con las estructuras sugeridas por las anomalías de He, H_2 , Hg y los isótopos de Ar.

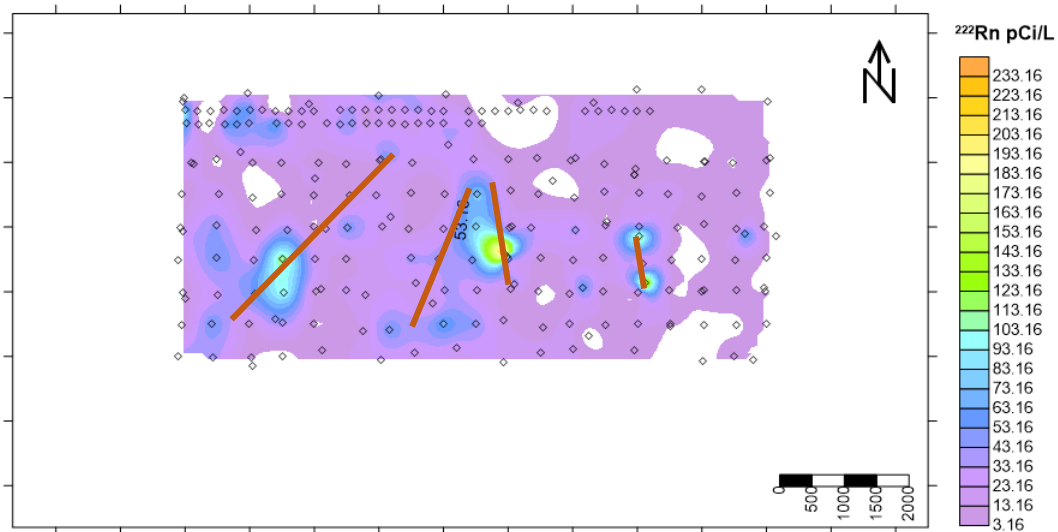


Figura 26. Anomalía de ^{222}Rn

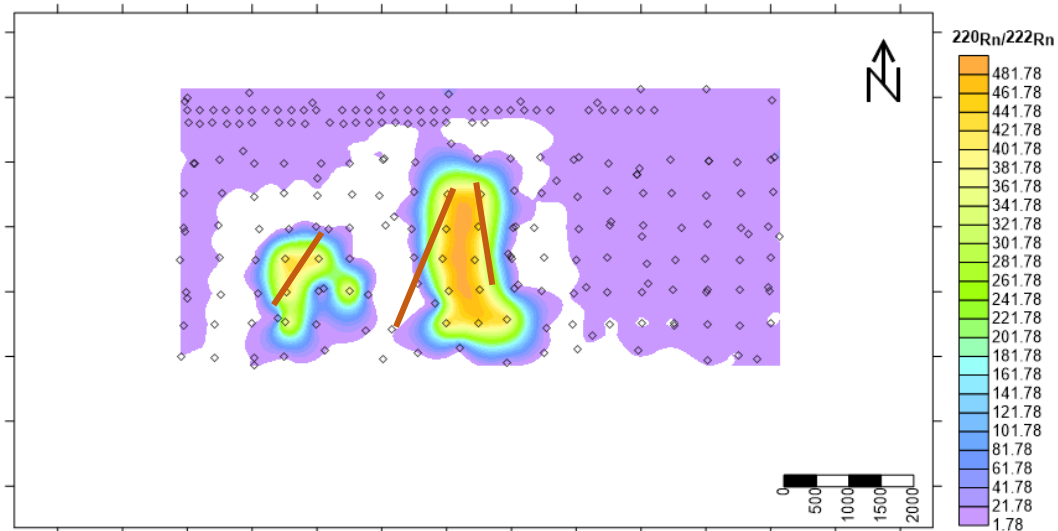


Figura 27. Anomalía de la relación de $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$

4.1.6. Anomalía de Flujo de CO_2 y Log CO_2

Las anomalías del dióxido de carbono, contribuye a relacionar el calor con procesos de desgasificación, que podría indicar un ascenso vertical a través de estructuras permeables.

La Figura 28 representa la distribución espacial de las anomalías de flujo de CO_2 en el área de estudio, marcando lineamiento en estructuras sugiriendo regiones que pueden indicar alta temperatura, ascenso vertical y fallas activas.

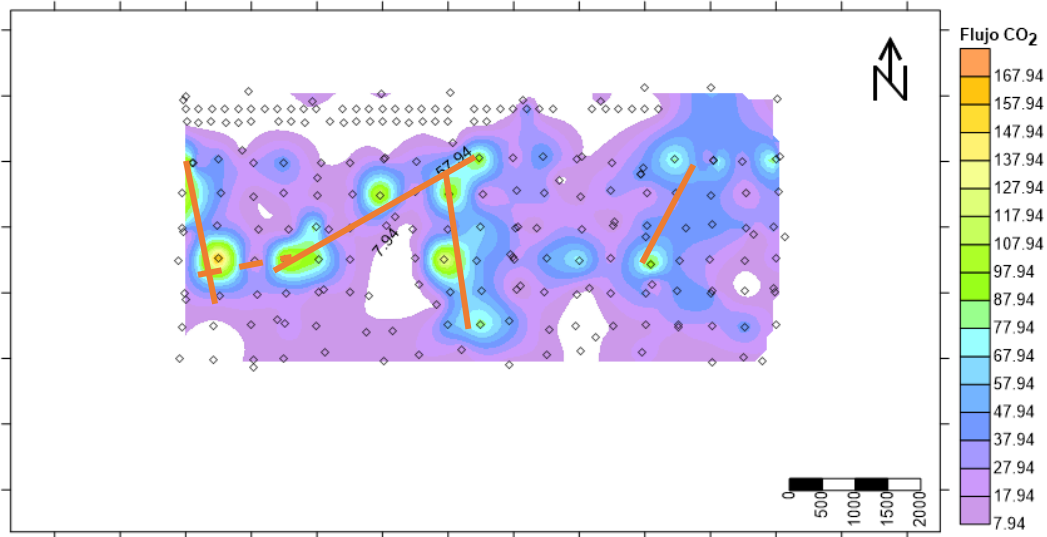


Figura 28. Anomalía de flujo de CO₂

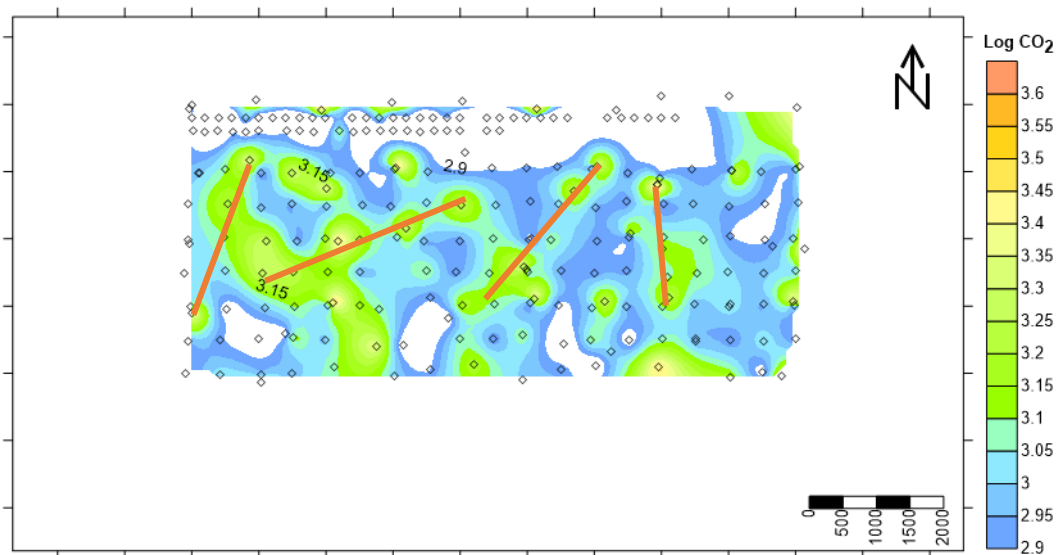


Figura 29. Anomalía de Log CO₂

4.2. Gravimetría

4.2.1. Control de calidad de los datos

Para saber la calidad de los datos se realiza un control de calidad graficando Gravedad Absoluta vs Elevación (Figura 30) que se calcula la línea de tendencia con la ayuda de la herramienta de Excel obteniendo un coeficiente de correlación de **0.9516**.

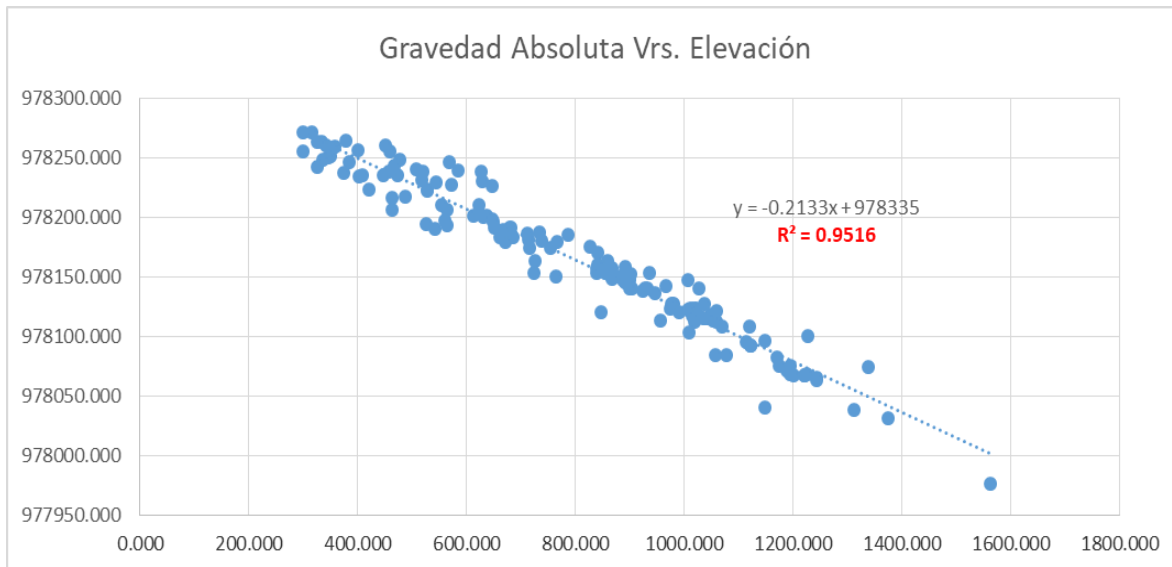


Figura 30. Control de la calidad de datos

4.2.2. Anomalía de Bouguer Completa

En geotermia es de interés una anomalía gravimétrica positiva y a los contrastes generalmente se le asocia la existencia de una posible falla o estructura. En el mapa de isocontornos de la anomalía de Bouguer a una densidad de 2.3 g/cm^3 se observa una tendencia de disminución en la gravedad en la zona NE (Figura 31) que genera un contraste con la zona de un alto gravimétrico en la zona NO, esto nos indica una posible zona donde hay permeabilidad o zona de barrera que se puede asociar a las fallas que se encuentra en la zona. El alto gravimétrico puede asociarse a los fluidos que ascienden con dirección NS al Oeste de la zona de estudio (Figura 31).

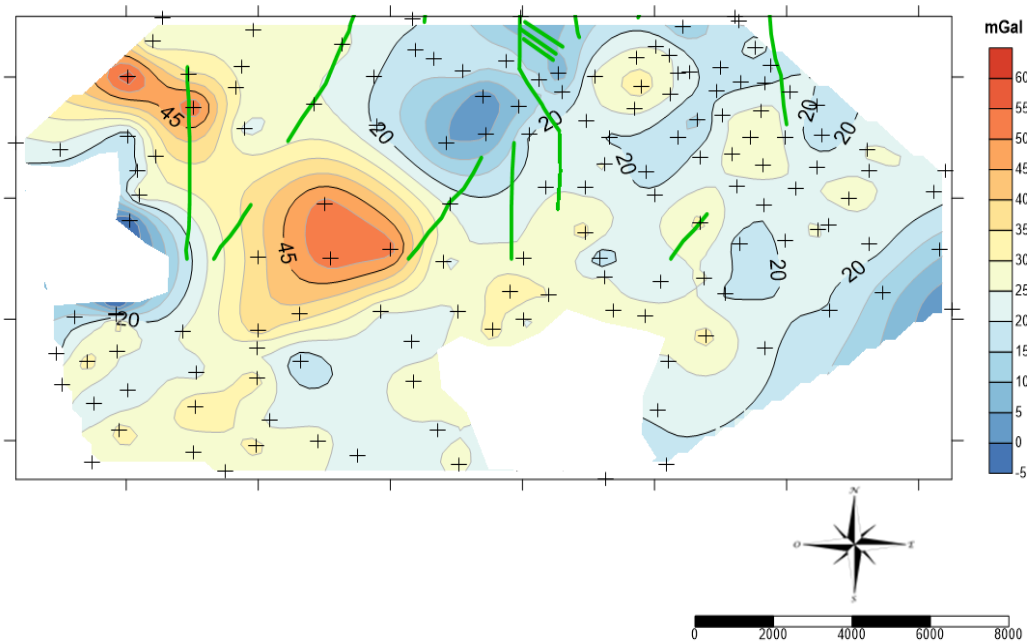


Figura 31. Mapa de isocontornos de Anomalía de Bouguer Completa

4.2.3. Análisis estadístico de Anomalía de Bouguer Completa

Para una mejor visualización de la distribución de las anomalías, se hizo un análisis de poblaciones con el método de Sinclair. Obteniendo las siguientes poblaciones, la gráfica obtenida se muestra en los anexos:

- Población de base: $G_{\text{bouguer}} < 15 \text{ mGal}$
- Población de transición: $15 \text{ mGal} < G_{\text{bouguer}} < 35 \text{ mGal}$
- Población de anómala: $G_{\text{bouguer}} > 35 \text{ mGal}$

En la Figura 32 se observan en mejor detalle la distribución de anomalías mostrando una zona de transición en casi toda el área de estudio, resaltando en la zona Oeste las anomalías gravimétricas positivas en la parte Norte de la zona de estudio. La anomalía de fondo se encuentra en la zona Este siempre en la parte Norte de la zona de estudio.

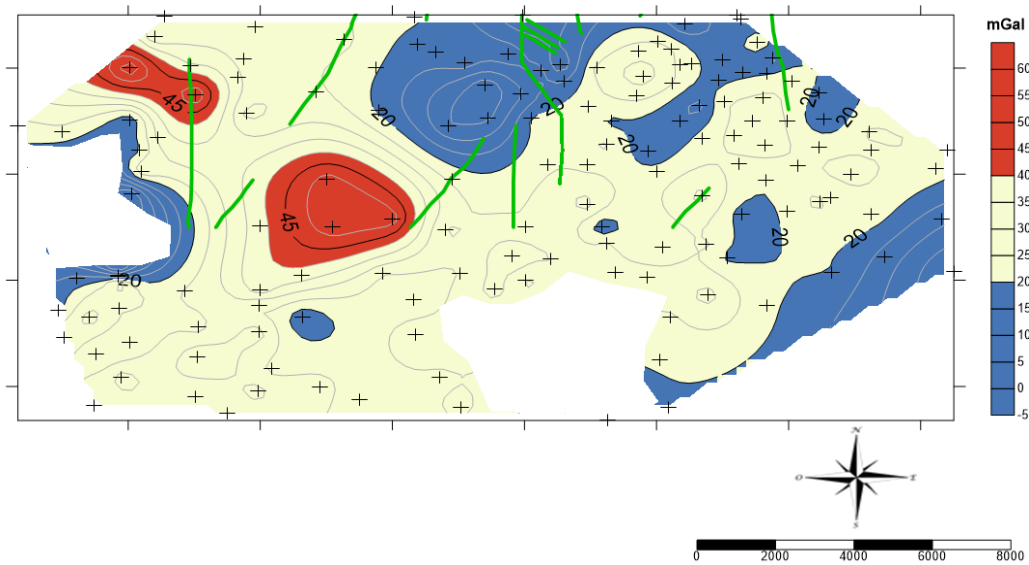


Figura 32. Mapa de isocontornos de Anomalía de Bouguer Completa con su distribución de poblaciones

4.2.4. Espectro de potencia

Con el espectro de potencia se estima la profundidad de alcance del estudio según las pendientes calculadas en la *Figura 33*, la profundidad calculada es en kilómetros. Las profundidades calculadas se presentan en la Tabla 3: Profundidades estimadas de las anomalías gravimétricas:

Tabla 3: Profundidades estimadas de las anomalías gravimétricas

Pendiente	Profundidad (m)
9.14	727.68
4.06	323.30
1.17	93.25

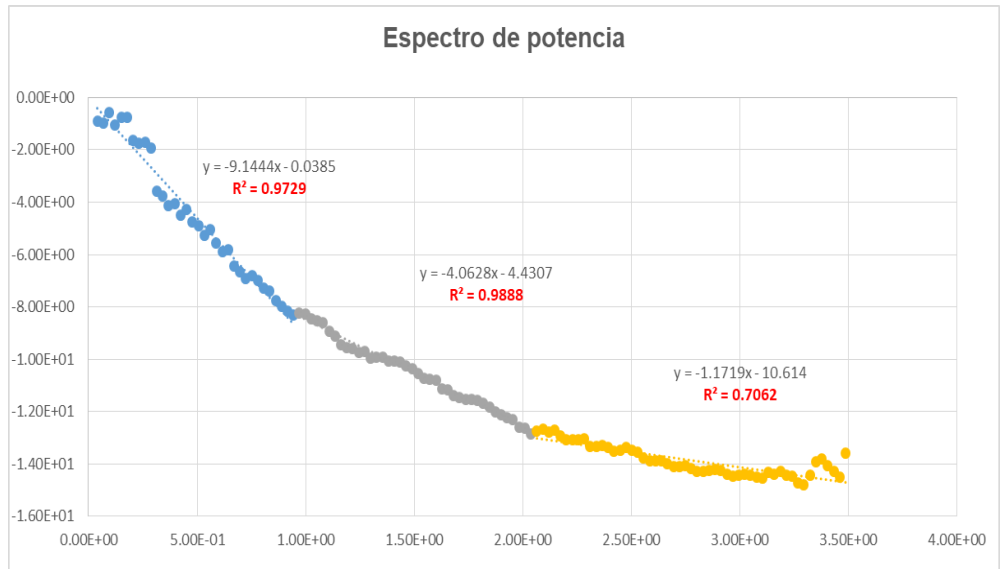


Figura 33. Espectro de potencia de la zona de estudio

4.2.5. Anomalía Regional

Calculando la anomalía regional de Bouguer (Figura 34) se observa en una tendencia NO y SE definiendo la anomalía positiva, asociado probablemente a la existencia a unos contrastes de densidades. Se delimita una zona de bajo gravimétrico en la zona NE y en la zona SE. En la zona Este del área de estudio se observa una anomalía alto gravimétrico confinado por anomalías de bajo de gravimétrico.

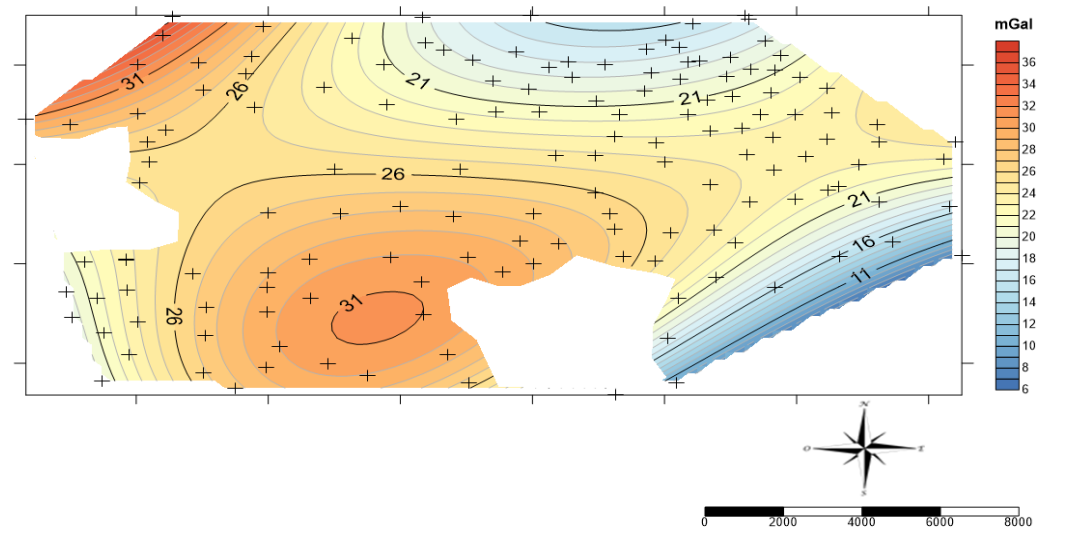


Figura 34, Mapa de isocontornos de Anomalía Regional

4.2.6. Anomalía Residual

A partir de la Anomalía Regional, se calcula la Anomalía Residual (*Figura 35*) donde se observa lineamientos con dirección NO - SE en la zona Oeste del área de estudio, es probable que esté asociado a una estructura. Además se observa otro lineamiento con dirección NE y SO asociado a un posible sistema de falla que se encuentra en la zona.

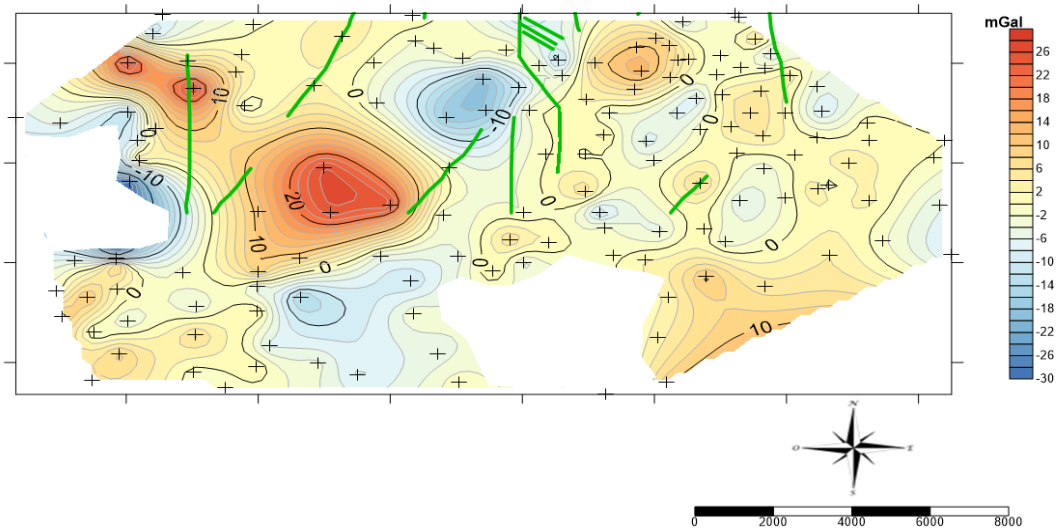


Figura 35, Mapa de isocontornos de la Anomalía Residual

4.2.7. Primera derivada

En la *Figura 36* se observa la anomalía de la primera derivada horizontal, se observan los cambios de pendiente, delimitando posibles estructuras. En la zona Oeste del área de estudio se observa un contraste que se puede asociar a la falla mapeada en superficie, así como en la zona Este de la zona de estudio delimita zonas de contrastes que se le pueden asociar al sistema de fallas mapeado en superficie.

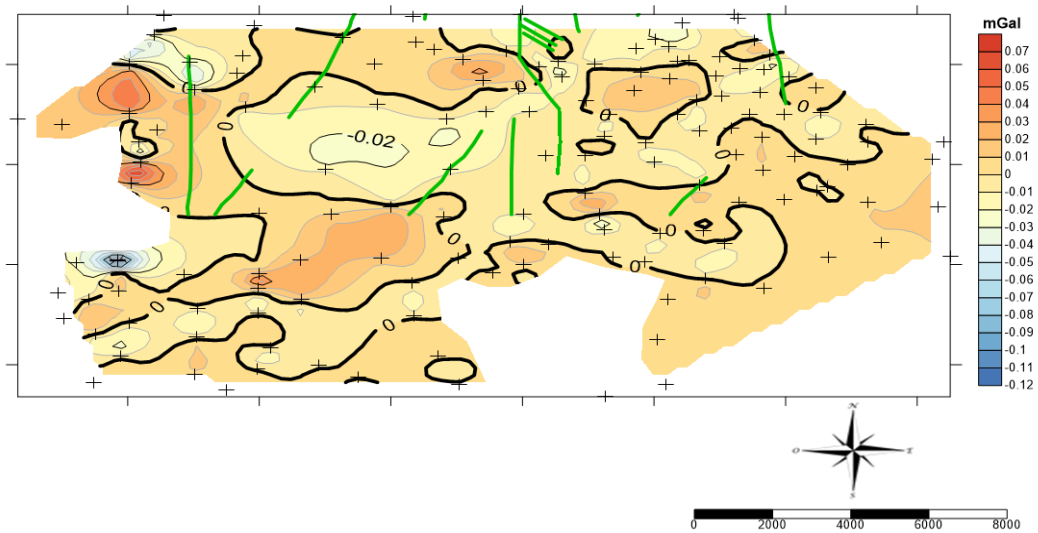


Figura 36, Mapa de isocontornos de la Primera Derivada Horizontal

4.2.8. Segunda Derivada

En la Figura 37 se observa la anomalía de la segunda derivada horizontal, estas anomalías en comparación a la primera derivada son más superficiales, es probable que los contrastes observados estén asociados a las fallas mapeadas en superficie.

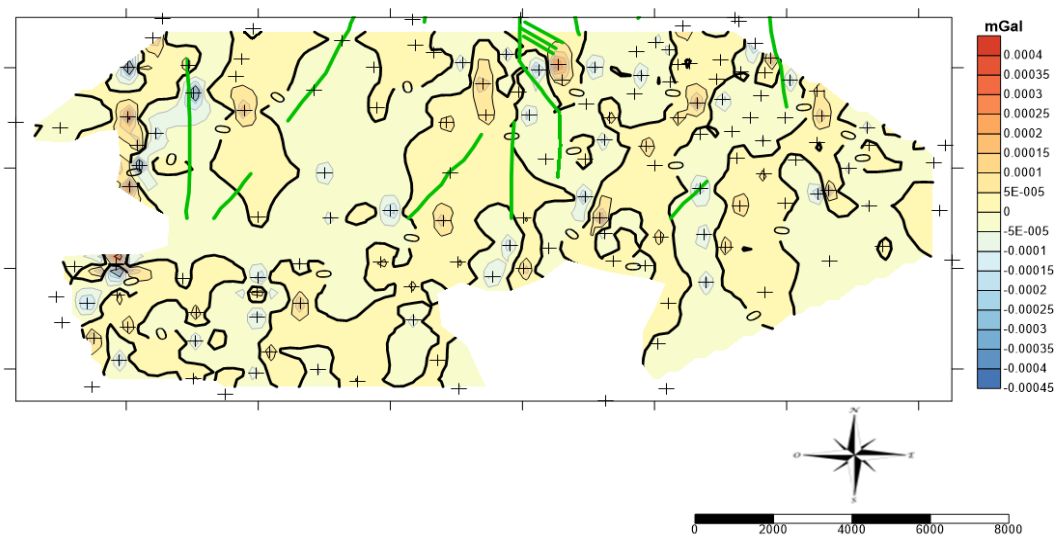


Figura 37, Mapa de isocontornos de la Segunda Derivada Horizontal

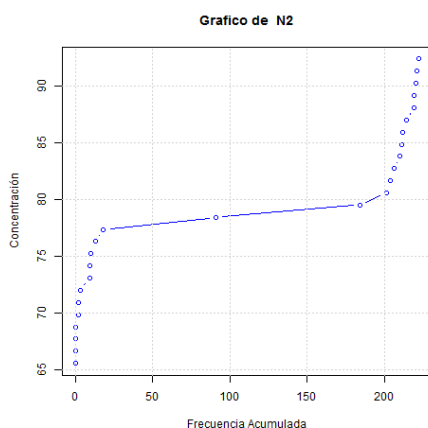
4.3. Análisis estadísticos

4.3.1. Análisis de población

A todos los gases y las relaciones calculadas se les realizó un análisis de población; en este análisis se identificaron varios patrones de comportamiento, dicho comportamiento ha sido uno de los criterios para definir si se toma en cuenta o no dicho gas o relación.

Para realizar el análisis de poblaciones, se ha descartado todos aquellos datos de concentración negativos, dado que estos afectaban al momento de ejecutar el algoritmo. Para el caso de los análisis de poblaciones en gravimetría, en donde los valores negativos se deben de tomar en cuenta, durante el análisis se ha sumado a dichos datos el valor absoluto del valor más negativo, con la idea de que todo el set de datos sea mayor o igual a cero; posteriormente se le resta dicho valor al resultado obtenido.

Los patrones de comportamiento identificado son:



Distribución normal. Cuyo gráfico de frecuencia acumulada es aproximadamente simétrico, tal como se muestra en la *Figura 38*.

Este es el patrón más comúnmente encontrado, posee un solo punto de inflexión, pero por los cambios de pendiente se trabaja con una sub-población de transición.

Figura 38. Frecuencia acumulada para el Nitrógeno.

Distribución sesgada: En este caso, una gran cantidad de datos se encuentran en la parte inferior o superior de los datos, tal como se muestra en la *Figura 39*.

Este patrón puede tener uno o más puntos de inflexión, y dependiendo de los cambios en las pendientes, se pueden considerar sub-poblaciones intermedias. En algunos casos el sesgo fue muy alto que no fue posible realizar un análisis de población. Ejemplos de esto último se pueden observar en la *Figura 40*.

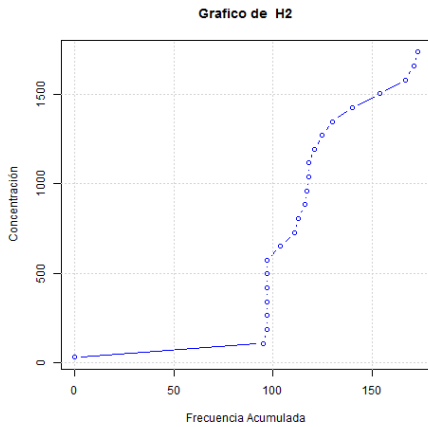


Figura 39. Frecuencia acumulada para el Hidrógeno.

Para todos los gases los cuales no era posible detectarle las poblaciones, se realizaron análisis adicionales con el fin de obtener dichas poblaciones.

Los análisis adicionales realizados fueron:

- Aplicación de Logaritmo base 10 a los datos.
- Acotamiento de los datos sesgados, con el fin de resaltar la sección de mayor interés del gráfico.
- Una mezcla de ambas acciones.

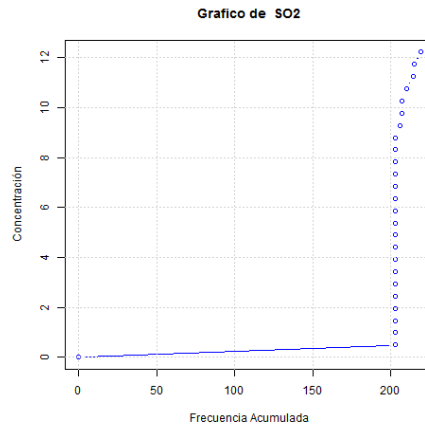
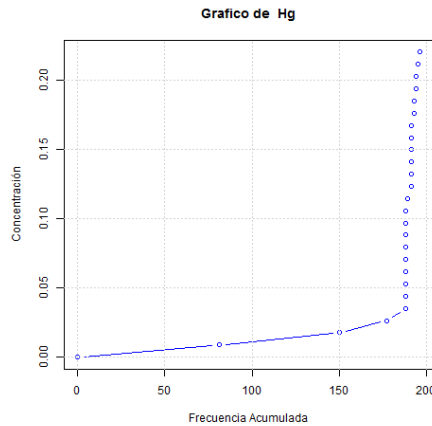


Figura 40. Frecuencia acumulada para el Mercurio y SO₂.

La mayoría de los datos pudieron ser analizados de manera satisfactoria, pero en los otros casos, se limitó a establecer cuáles eran los valores atípicos dentro del set total de datos.

La aplicación del logaritmo base 10 a los datos ayudó a resaltar poblaciones ocultas en datos de gran valor (e.g. datos mayores de 1000), o valores muy pequeños (e.g. menores de 0.1). En la *Figura 41* se puede observar como para el gas Radón, la aplicación del logaritmo base 10, ayudo a identificar las poblaciones presentes.

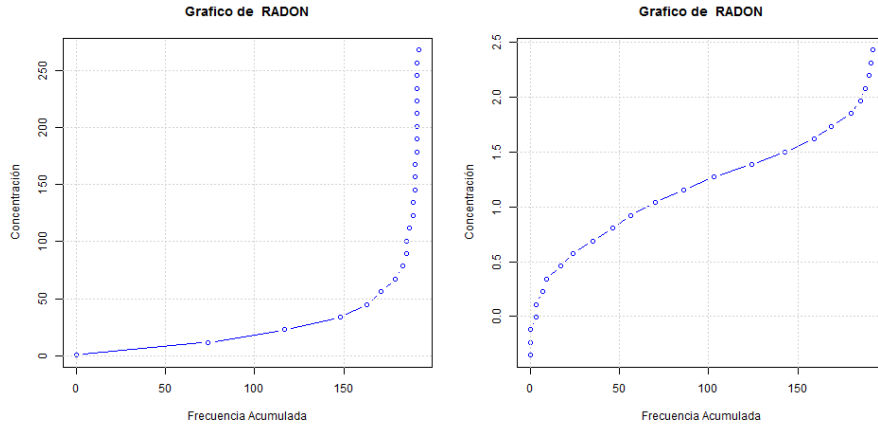


Figura 41. Frecuencia acumulada para el Radón. A la izquierda, la concentración en sus valores observados. A la derecha, el logaritmo base 10 de la concentración. Nótese que al aplicar la función logaritmo, es más fácil identificar las poblaciones presentes.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de población en los gases, relaciones y en la anomalía de Bouguer completa.

En los resultados se utilizan los términos comportamiento logarítmico y natural, esto se refiere a que, para poder analizar dicho gas, fue necesario o no aplicarle logaritmo base 10 a los datos; la variable X en las poblaciones hace referencia a la variable estudiada (e.g. concentración).

Nota: Los gráficos descritos a continuación se pueden encontrar en el Anexo B.

Tabla 4. Tabla resumen de gases con tres poblaciones. (Base, Transición, Anómala)

Gas / Relación	Comportamiento	Punto de inflexión	Poblaciones		
			B	AB	A
CO ₂ [g/m ³ -día]	Logarítmico	X=15.84	X≤7.94	7.94<X<63.1	X≥63.1
CO ₂ [ppm]	Logarítmico	X=891.3	X≤794	794<X<1259	X≥1259
Log(CO ₂)	Natural	X=3	X≤2.9	2.9<X<3.1	X≥3.1
CO ₂ /CH ₄	Logarítmico	X=700	X≤398	398<X<1000	X≥1000
CH ₄ [ppm]	Logarítmico	X=1	X≤0.56	0.56<X<1.78	X≥1.78
H ₂ O [ppm]	Natural	X=3000	X≤1100	1100<X<6000	X≥6000
Hg [mg/m ³]	Logarítmico	X=0.01	X≤0.006	0.006<X<6000	X≥6000
Hg/He	Logarítmico	X=1.3e5	X≤3.2e4	3.2e4<X<0.03	X≥0.03
ΔHe [ppb]	Natural	X=500	X≤0	0<X<500	X≥500

Kr [ppm]	Natural	X=0.75	X≤0.6	0.6<X<0.9	X≥0.9
N ₂ [%]	Natural	X=78.5	X≤77.5	77.5<X<80	X≥80
O ₂ [%]	Natural	X=21	X≤20	20<X<21.5	X≥21.5
Radón [pCi/L]	Logarítmico	X=17.8	X≤3.16	3.16<X<31.6	X≥31.6
SH ₂ [ppm]	Logarítmico	X=0.013	X≤0.01	0.01<X<0.017	X≥0.017
SO ₂ [ppm]	Logarítmico	X=0.03	X≤0.02	0.02<X<0.05	X≥0.05
Torón [pCi/L]	Logarítmico	X=63.1	X≤10	10<X<158	X≥158
⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	Natural	X=325	X≤275	275<X<350	X≥350
Bouguer [mGal]	Natural	X=25	X≤15	15<X<35	X≥35

Tabla 5. Tabla resumen de gases con más de tres poblaciones.

Gas / Relación	Comportamiento	Puntos de inflexión	Poblaciones
³⁶ Ar [ppm]	Natural	X= 22	C: X≤22
		X= 35	B: 22<X≤30
			AB: 30<X<33.5
³⁸ Ar [ppm]	Natural	X= 4	A: X≥33.5
		X= 11.5	C: X≤4
			B: 4<X≤7
H ₂ S [ppm]	Logarítmico	X= 0.002	AB: 7<X<12.5
		X= 0.14	A: X≥12.5
			C: X≤0.002
Torón/Radón	Logarítmico	X= 1.78	B: 0.002<X≤0.0032
		X= 5.62	AB: 0.0032<X<0.2
			A: X≥0.2
H ₂ [ppm]	Natural	X= 500	C: X≤1.78
		X=1400	B: 1.78<X≤5.6
			AB: 5.6<X<316.2
			A: X≥316.2
			C: X≤500
			CB: 500<X≤700
			B: 700<X<1200

⁴⁰ Ar/N ₂	Natural	X= 0.0083	AB: 700<X<1550
		X= 0.012	A: X≥1550
			A: X≤ 0.0083
			B: 0.0083<X≤0.0115
			AB: 0.0115<X<0.013
			C: X≥0.013

4.3.2. Análisis de Clústers

Para el análisis de clústers, la hoja de datos se filtró aplicando los valores de fondo obtenidos en el análisis de poblaciones; como resultado se obtuvo una matriz con todos los datos de clúster para cada variable analizada. Estos datos fueron la entrada del análisis de superposición.

Dado que este análisis se complementa con la superposición de los clústers, los resultados se muestran en el apartado 4.3.4.

4.3.3. Correlación estadística

Como pre-procesamiento de los datos, se eliminaron de la tabla todos aquellos datos por debajo de los valores de fondo calculados o no válidos, para que estos no interfirieran con los resultados.

Para este análisis solo se han tomado en cuenta los gases y relaciones utilizadas en el análisis de los datos químicos, obteniendo los siguientes resultados:

	Radón	Flujo CO2	40Ar/36Ar	X220Rn/222Rn	dHe	Log CO2	Hg
Radón	1.0						
Flujo CO2	0.0	1.0					
40Ar/36Ar	0.1	-0.1	1.0				
X220Rn/222Rn	0.2	0.4	0.0	1.0			
dHe	0.1	-0.4	-0.1	-0.2	1.0		
Log CO2	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	1.0	
Hg	-0.1	-0.1	0.3	-0.1	0.0	0.1	1.0

Figura 42. Tabla de correlaciones de Pearson. En color verde se encuentran las correlaciones positivas y en color azul las correlaciones negativas. La escala de color indica la magnitud de la correlación

Tomando solamente las correlaciones positivas, y considerando una buena correlación a valores de “r” mayores a 0.4, se obtuvieron las siguientes correlaciones:

- Radón/Torón - Flujo de CO₂
- Flujo de CO₂ – ΔHe
- ⁴⁰Ar/³⁶Ar – Hg
- Radón/Torón - Flujo de CO₂ - ⁴⁰Ar/³⁶Ar

4.3.4. Superposición de los datos

Como base de la selección de los gases, superponer es que éstos tengan una alta correlación entre ellos, por lo que las 9 relaciones mencionadas en el apartado anterior son las más apropiadas, pero estas relaciones se evaluaron comparando los mapas de isocontornos del apartado 4.3.2, para verificar que éstas sean coherentes.

De esta comparación resultó:

Correlaciones que serán analizadas:

- Radón/Torón - Flujo de CO₂
- ⁴⁰Ar/³⁶Ar – Hg
- Radón/Torón - Flujo de CO₂ - ⁴⁰Ar/³⁶Ar

Correlaciones que no serán analizadas:

- Flujo de CO₂ – ΔHe
La cantidad de datos para cada gas no es congruente.

La superposición de los clústers se realiza asignándoles igual ponderación a todos los gases correlacionados. Los mapas resultantes son los siguientes:

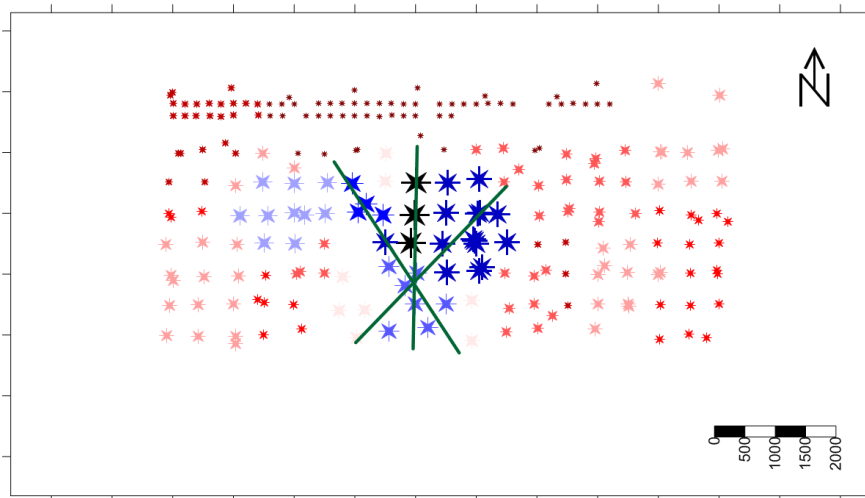


Figura 43. Mapa de superposición de clústers para la relación Radón/Torón - Flujo de CO₂

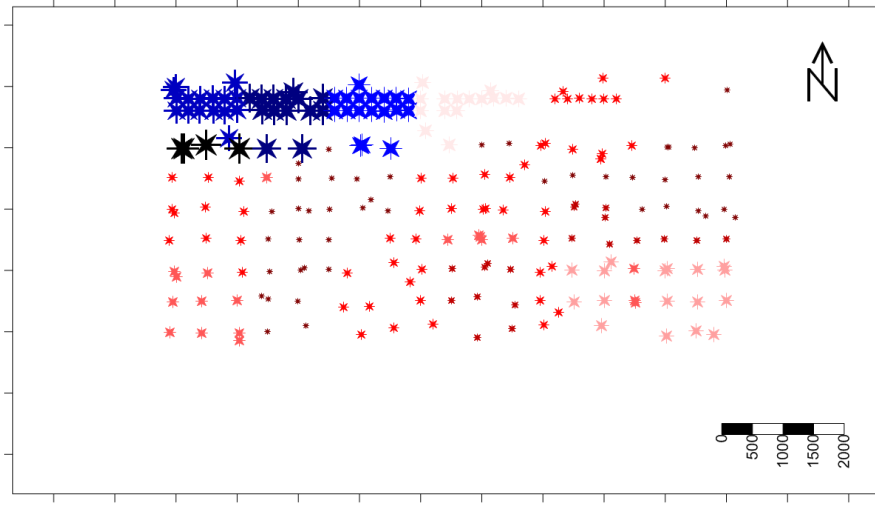


Figura 44. Mapa de superposición de clústers para la relación $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - \text{Hg}$

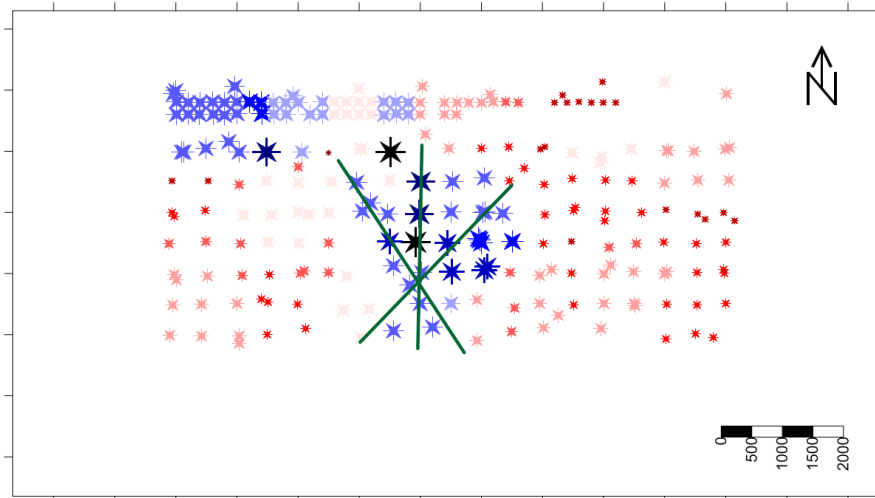


Figura 45. Mapa de superposición de clústers para la relación Radón/Torón - Flujo de $\text{CO}_2 - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

De las tres figuras mostradas, se nota que existen patrones similares en dos de ellas, en el caso de la relación $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - \text{Hg}$, ésta resalta un comportamiento anómalo al norte, pero al ser en el límite del área de estudio, no se tomará en cuenta.

CAPITULO 5 Presentación de los resultados

5.1. Gases Difusos

A partir de la interpretación de los gases difusos seleccionados en este estudio, se puede proponer estructuras geológicas que permiten la migración de gases contenidos en el subsuelo dentro del área delimitada.

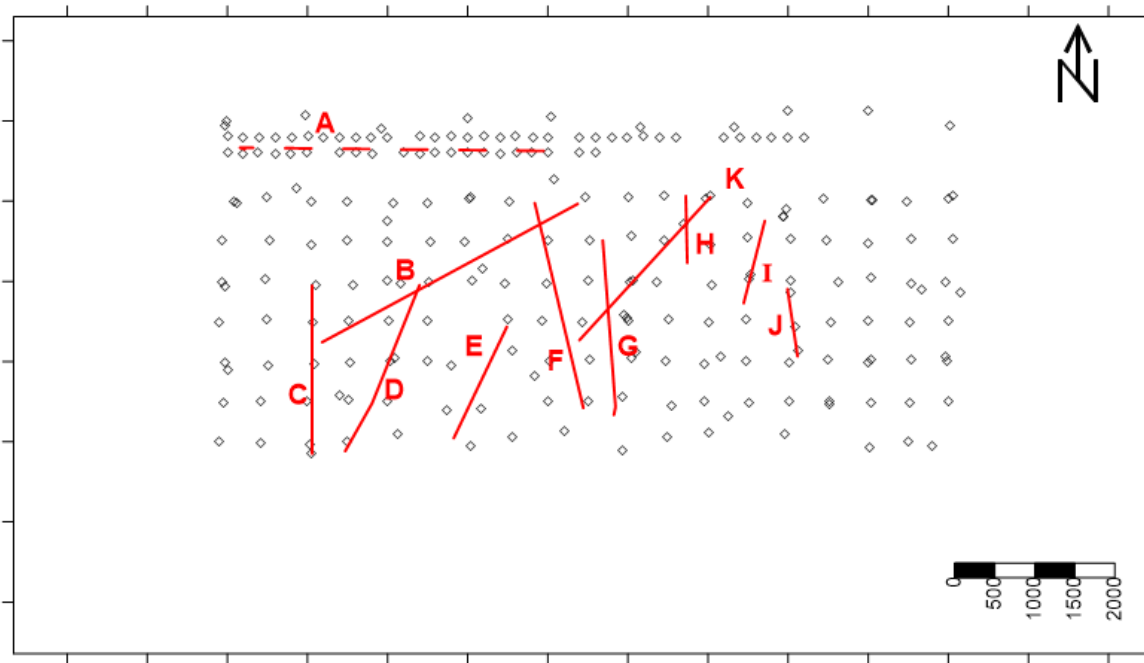


Figura 46. Mapa de estructuras geológicas identificadas a partir de anomalías de gases difusos.

Una anomalía A, ubicada al norte de la zona de estudio, se puede inferir una estructura que permita el ascenso de fluido, debido a las propiedades de los gases predominantes en esa zona.

La anomalía B, con orientación NE-SO, puede asociarse a una estructura que permite el ascenso vertical a través de estructuras permeables y una estructura activa, como lo indican los valores anómalos de flujo de CO₂ y concentraciones altas de CO₂.

Una anomalía C, orientada N-S, al Oeste de la zona de estudio, sugiere una estructura activa y alta temperatura, debido a los valores altos de mercurio en esa zona, ya que existe una relación del mercurio en los procesos de desgasificación del magma, y al mecanismo de transporte de especie química (difusión), sugiere una zona permeable. Esta anomalía, también es reflejada por la existencia de valores anómalos de dióxido de carbono, helio e hidrógeno asociados a alta temperatura, zonas activas y ascenso vertical. Valores

anómalos de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ sugieren el intercepto de dos estructuras activas (B y C), relacionadas a procesos de desgasificación desde una cámara magmática.

Una anomalía D, con orientación NNE-SSO, indican una estructura permeable, la presencia de altas concentraciones de ^{222}Rn indican mecanismo de transporte por difusión, que permite el ascenso rápido de fluido. Una anomalía marcada por $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$, sugiere que la presencia de fluido a poca profundidad o la existencia de una estructura que permite el ascenso rápido de éste hacia la superficie.

Las anomalías E, F y G, indican una estructura permeable, valores anómalos de hidrógeno y helio, así como una anomalía marcada por $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$, sugiere que la presencia de fluido a poca profundidad o la existencia de una estructura que permite el ascenso rápido de éste hacia la superficie, la presencia de valores anómalos de mercurio respalda procesos de difusión. Esta estructura podría indicar el límite o borde de una estructura.

Al sur de la anomalía E, sugiere orientada al SO-NE, sugiere una estructura activa y alta temperatura, debido a la anomalía de mercurio, hidrógeno y helio en esa zona. La extensión de la zona de estudio contribuiría a identificar la distribución anómala hacia el sur.

Una anomalía H, orientada N-S, con valores anómalos de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ sugiere el ascenso de fluido relacionadas a procesos de desgasificación magmático. La anomalía I, podría estar relacionada a una zona fracturada que permite el proceso de desgasificación de CO_2 .

La anomalía J, orientada N-S, presenta valores anómalos de ^{222}Rn pero bajo ^{220}Rn y sugiere un mecanismo de difusión, posiblemente relacionada a una fuente de origen profundo y magmática, debido a la coincidencia con valores anómalos de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$.

Una anomalía K, orientada SO-NE, resaltada por la anomalía de CO_2 , relacionada al calor con procesos de desgasificación con ascenso vertical, la estructura intercepta la estructura H, con valores anómalos de $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ sugiere el ascenso de fluido relacionadas a procesos de desgasificación magmático

5.2. Gravimetría

A partir de la Anomalía Residual se realiza una propuesta de lineamientos debido a contrastes que son indicativos de estructuras geológicas (*Figura 47*). Las líneas punteadas representan lineamientos inferidos a partir de los contrastes. En la zona Este de la zona de estudio (el círculo morado) representa un contraste, pero no se puede interpretar ya que está en el límite de la zona de estudio, debido a esto se necesitan más mediciones para identificar la tendencia de la anomalía. En la zona Oeste de la zona de estudio (círculo rojo) el contraste en esa zona carece de datos por lo tanto no se pueden inferir lineamientos asociados a estructuras geológicas. Se detalla a continuación la orientación de los lineamientos encontrados:

Tabla 6. Tabla resumen los lineamientos encontrados.

Lineamiento	Orientación	Lineamiento	Orientación
I	EN – OS	V	NE – SO
II	N – S	VI	NE – SO
III	NO – SE	VII	NE – SO
IV	NE – SO	VIII	NE – SO

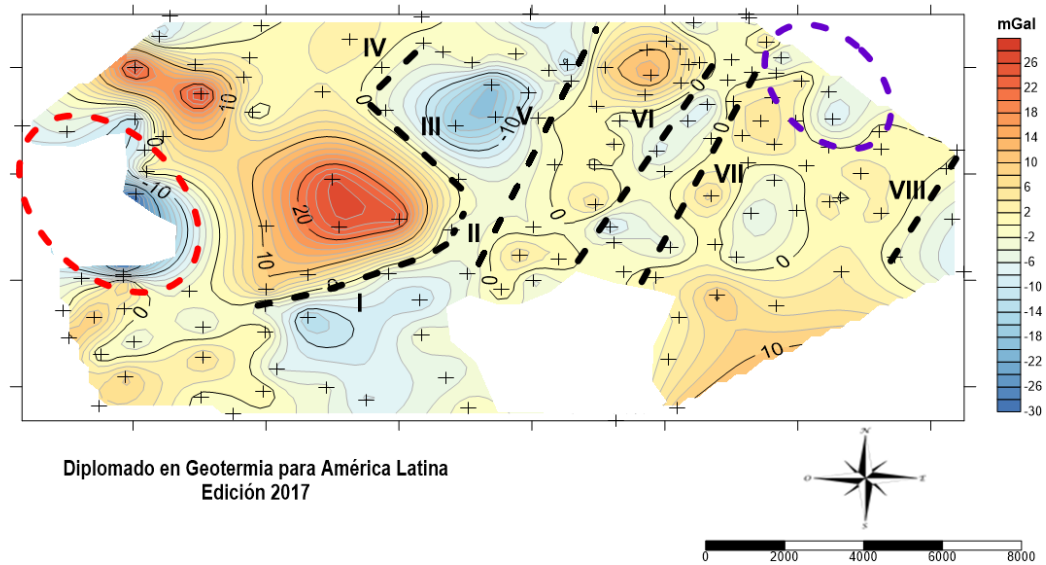


Figura 47. Delimitación de lineamientos asociados a estructuras geológicas a partir de la anomalía residual

Al integrar los lineamientos geológicos encontrados con gases difusos, gravimetría y la integración del análisis de clúster, se observa una correlación de lineamientos de gases difusos y gravimetría en la zona central del área de estudio, estos lineamientos tienen una tendencia en dirección **NE – SO**. Haciendo una integración con el análisis de clúster

aplicado a los gases difusos la zona central con tendencia hacia el **NO** convergen con el sistema de fallas mencionado anteriormente.

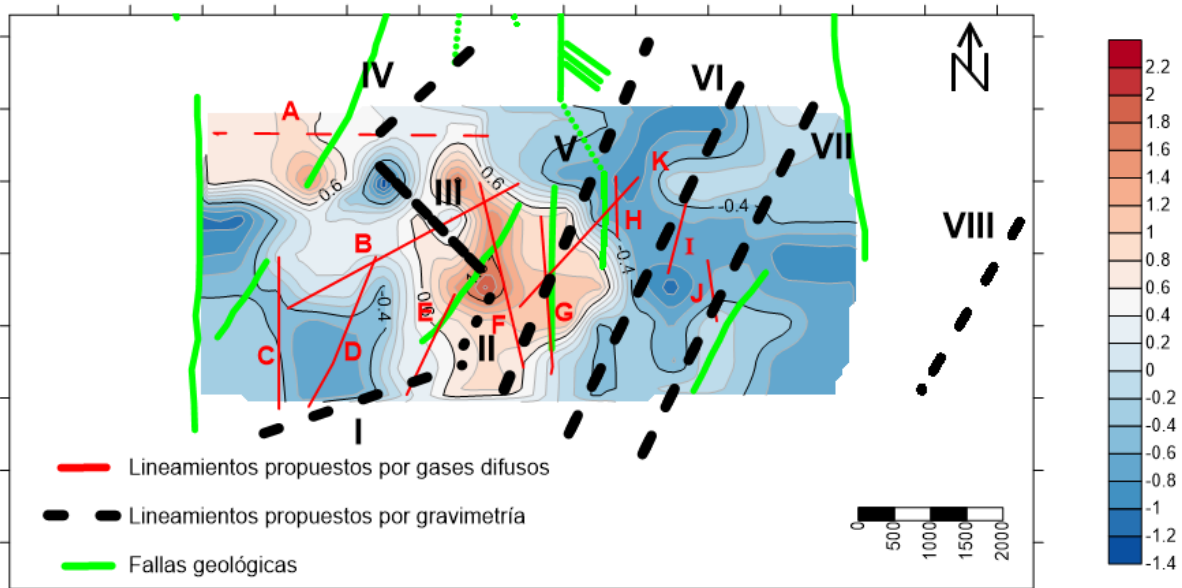


Figura 48. Integración de lineamientos geológicos encontrado con gases difusos, gravimetría y análisis de clúster con la geología local.

CAPITULO 6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Para el análisis de clústers, es necesario aplicar valores de fondo obtenidos a partir del análisis de poblaciones; como resultado se obtiene una matriz con todos los datos de clúster para cada variable analizada; estos datos son utilizados para el análisis de superposición.

La presencia de gases como mercurio, helio y torón en zonas con flujo de CO₂, sugieren alta permeabilidad y procesos de desgasificación vertical de origen magmático que permiten el ascenso rápido de fluidos hacia la superficie.

Los análisis gráficos de gases difusos sugieren que las estructuras poseen una orientación preferente SO-NE y N-S; por su parte el análisis gráfico en superficie por gravimetría muestra dos zonas principales en el área de estudio una zona con lineamientos en dirección NE – SO y otra zona en donde existe un máximo gravimétrico que podría estar delimitando algún tipo de estructura importante de interés geotérmico. Ambos métodos resaltan al centro del mapa de contorno (*Figura 48*), una estructura principal que podría atribuirse al límite o borde de una estructura geológica; una segunda estructura es resaltada en la esquina superior izquierda, que se sugiere como una zona posible de ascenso de fluido.

Al sobreponer las estructuras y lineamientos sugeridas por gases difusos y gravimetría, puede notarse que el análisis de clúster se ajusta a los lineamientos propuestos por la anomalía residual cerca de los contrastes, lo cual sería indicativo de estructuras geológicas.

6.2. Recomendaciones

La presencia de estructuras geológicas, reveladas por estudios de gases difusos, como por gravimetría, permiten recomendar la extensión y densificación de datos en la zona sur del campo de estudio, con el propósito de inferir en aquellas estructuras que no pueden ser identificadas en superficie, así como en la identificación de los procesos relacionados a cada una de los lineamientos identificados.

El uso de técnicas geofísicas como la magnetometría y estudios de resistividad podrán proporcionar información importante a cerca de la fuente de calor y su extensión.

Con el propósito de identificar el origen de algunos gases, principalmente el CO₂, se sugiere realizar estudios isotópicos de ³He y ⁴He y principalmente del ¹⁴C, que contribuirían a identificar el CO₂ de origen magmático. También se sugiere completar análisis de gases difusos como hidrógeno, y sulfuro de hidrógeno en la zona este del campo estudiado, ya que se carece de esa información y probablemente contribuya a identificar los procesos de desgasificación y orígenes de las anomalías.

5 Agradecimientos

Agradecemos principalmente a nuestra familia, que han sido un apoyo fundamental durante este proceso de formación y aprendizaje.

Un agradecimiento especial a nuestros asesores: María Inés Magaña y José Rivas, quienes tuvieron la paciencia y brindaron apoyo durante la elaboración del trabajo de investigación.

Un agradecimiento especial a LaGeo por la oportunidad de formarnos académicamente, por proporcionar al mejor equipo de profesionales para nuestra formación y aprendizaje.

A nuestros compañeros de trabajo, que nos apoyaron durante nuestro aprendizaje, y por el apoyo en la toma de muestras y su posterior análisis que nos ayudó a procesar la información necesaria para la elaboración de nuestro trabajo de investigación.

“Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes”

Isaac Newton

6 Referencias Bibliográficas

Arizona Instruments, Jerome 431-X Mercury Vapor Analyzer Operation Manual, Julio 2004.

Arizona Instruments, Jerome 631-X Hydrogen Sulfide Analyzer Operation Manual, Julio 2004

B. Dobrin, M., & H. Savit, C. (1988). Introduction to geophysical prospecting. McGraw- Hill International Editions, Geology Series.

Chiodini, G., Frondini, F. Raco, B., (1996): Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater. Vulcano Island (Italy). Bull. Volcanol., 58, 41-50.

David W. Graham (2002). Noble Gas Isotopes Geochemistry of Mid Ocean Ridge and Ocean Island Basalt: Characterization of Mantle Source Reservoirs.

Estrada, L. A. (2012). Prospección gravimétrica para alumnos de geología de la facultad de ciencias naturales de la Universidad Nacional de Tucumán.

Fridriksson, T., (2009). Studies of diffuse CO₂ degassing: Applications to exploration and environmental monitoring in Iceland. Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources.

Grimaldi D., (2011). Estudio de desgasificación de origen volcánica de las fumarolas del Campo Geotérmico de Ahuachapán, Ahuachapán. Tesis para optar al grado de licenciatura en Ciencias Químicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Gutiérrez X., (2009). Estudio Geoquímico de gases en torno a la Falla el Hoyón, Berlín, Usulután. Tesis para optar al grado de licenciatura en Ciencias Químicas, Universidad de El Salvador, El Salvador.

Halil Aral, C. S. (1988). Partitioning of Geothermal Populations by Sinclair's Method. Ankara, Turkey.: Hacettepe University, Engineering Faculty.

Hall, G. (2015). Pearson's correlation coefficient. HEP Group Research.

Hernández, P., Pérez, N., Salazar, J., Sato, M., Notsu K., Wakita, H., (2000): Soil gas CO₂, CH₄, and H₂ distribution in and around Las Cañadas Caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain. J. Volcanol. Geother. Res., 103, 425-438.

Hernández, S. D. (2011). Análisis de Conglomerados. España: Universidad Autónoma de Madrid.

Hilton, D.R, y Porcelli, D (2004). Noble Gases as Mantle Tracer. The Mantle and Core, Treatise on Geochemistry Vol. 2.

LI-COR, Gas Hound Model LI-802 CO₂ Analyzer Instruction Manual, 2002.

Lowrie, W. (2007). Fundamentals of geophysics. Cambridge.

Magaña M.I., López D., Barrios L.A., Pérez N. M., Padrón E. y Henríquez E., 2004: Diffuse and convective degassing of soil gases and heat at the TR-6-Zapotillo hydrothermal discharge zone, Berlin Geothermal Field, El Salvador. Geothermal Resources Council, Transactions, v. 28, p. 485-488.

Magaña M.I., López D., Barrios L.A., Tenorio J., Matus A. (2002). Radon and Carbon Dioxide Diffuse Soil Degassing at Ahuachapán Geothermal Field, El Salvador. Geothermal Resources Council, Transactions, v. 28, p. 485-488.

Magaña, M. I y Guevara, W.; Estudio complementario de la degasificación difusa de la zona sur y este del Campo Geotérmico de Berlín, Geotérmica Salvadoreña S. A de C. V, junio de 2001.

Mwangi, M. (s.f.). Geophysical Methods Used in Geophysical Exploration. Olkaria Geothermal Project.

OLADE (1978). Metodología de exploración geotérmica, fases de reconocimiento y prefactibilidad.

Pylon Electronics Inc., 2014. Pylon Model AB6A Portable Radiation Monitor Instruction Manual.

Savit, C. H., & Dobrin, M. B. (1988 Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill International Editions.

Sumintadireja, P. I. (2016). Classifying hot water chemistry: Application of MULTIVARIATE STATISTICS. The 2016 International ITB Geothermal Workshop, March 2016, Zenodo.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sherrif, R. E. (2004). Applied Geophysics. Cambridge University Press 1990.

Villagarcía, T. (s.f.). Análisis Multivariante.

Wakita H., Fuji N. et Al (1978). Helium spots: caused by a diapiric magma from the upper mantle. Science 200, 430 -432.

West System, Portable Flux meter Handbook, Marzo 2006.

William E. Glassley (2010). Geothermal Energy: Renewable Energy and The Environment. Ed. CRC Press.

7 Apéndices

7.1 Anexo A, Códigos en R.

A continuación, se muestran el código de las funciones en R creadas para realizar los análisis.

Código utilizado para hacer los gráficos de probabilidad acumulada.

```
sinclair <-function(F1){
  gd=read.xls(F1)
  cna=colnames(gd)
  cno=length(cna)
  gd_ran=0
  gd_cut=0
  gd_freq=0
  gd_afreq=0
  for(i in 1:cno){
    gd_tmp=gd[i]
    gd_tmp=gd_tmp[gd_tmp > 0]
    noc=round(sqrt(length(gd_tmp)))
    #para el análisis logarítmico des-comentar esta línea
    #gd_tmp=log10(gd_tmp)
    gd_ran=seq(min(gd_tmp),max(gd_tmp),
              +by=(max(gd_tmp)-min(gd_tmp))/noc)
    gd_cut=cut(gd_tmp,gd_ran)
    gd_freq=table(gd_cut)
    gd_afreq=c(0,cumsum(gd_freq))
    png(paste(cna[i],"png",sep="."))
    plot(gd_afreq,gd_ran,"b",
         +main=paste("Grafico de ",cna[i]),
         +xlab="Frecuencia Acumulada",
         +ylab="Concentración")
    grid()
    dev.off()
  }
}
```

```
    return("ok")
  }
```

Código utilizado para calcular los coeficientes de correlación de Pearson.

```
pcorr <- function(mat){
  out=rcorr(mat)
  return(out)
}
```

Código utilizado para calcular un número “n” de clústers utilizando el algoritmo k-means, a un conjunto de datos llamado “mat”

```
mykmeans <- function(mat,n){
  cn=colnames(mat)
  for(k in 3:dim(mat)[2]){
    mat[,k]=scale(mat[,k])
  }
  coor=mat[,1:2]
  for(k in 3:dim(mat)[2]){
    tmp=kmeans(mat[,c(1,2,k)],n)
    cluster=tmp$cluster
    for(i in 1:length(cluster)){
      cluster[i]=tmp$centers[cluster[i],3]
    }
    coor=cbind(coor,cluster)
  }
  colnames(coor)<-cn
  return(coor)
}
```

7.2 Anexo B, Gráficos de probabilidad acumulada.

A continuación, se muestran los gráficos utilizados para el análisis de población.

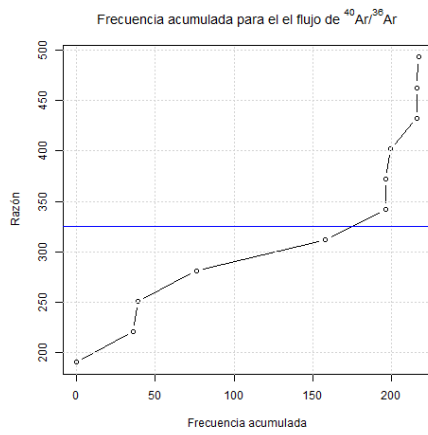


Figura Anexa 49. Gráfico para el $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

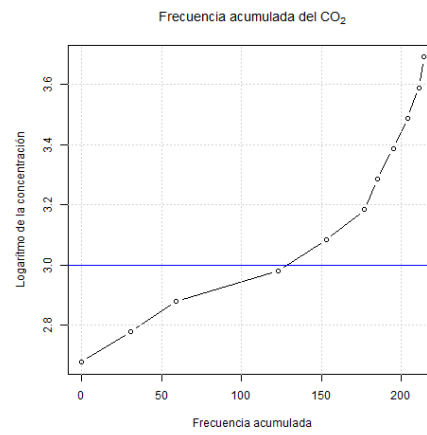


Figura Anexa 50. Gráfico para el CO_2

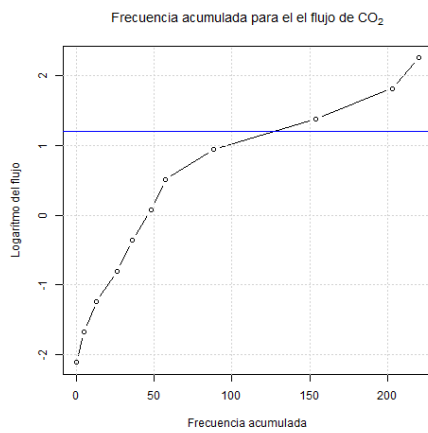


Figura Anexa 51. Gráfico para el CO_2 (Flujo)

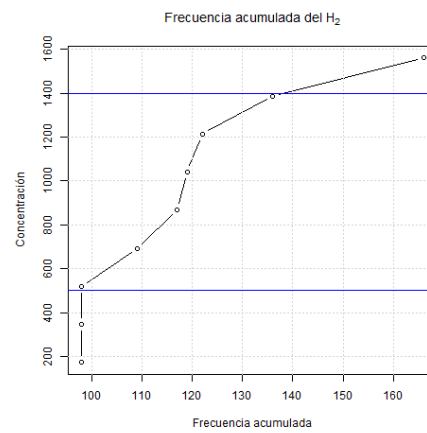


Figura Anexa 52. Gráfico para el H_2

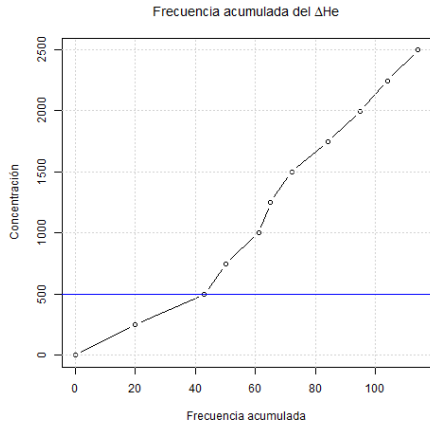


Figura Anexa 53. Gráfico para el ΔHe

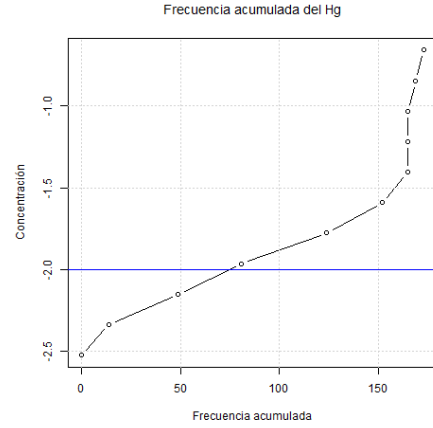


Figura Anexa 54. Gráfico para el Hg

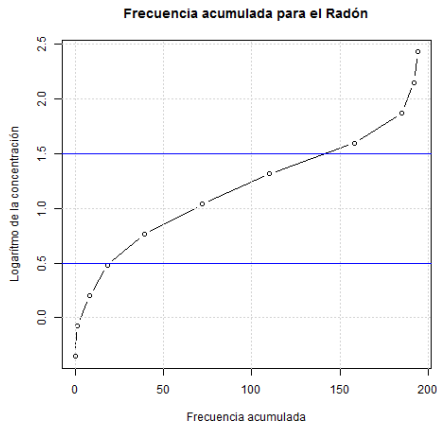


Figura Anexa 55. Gráfico para el Radón

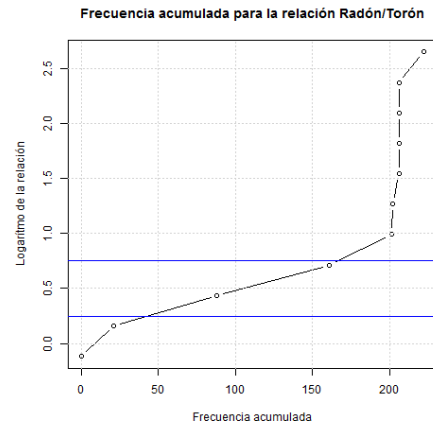


Figura Anexa 56. Gráfico para la relación Radón/Torón

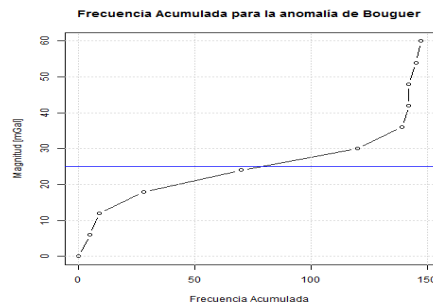


Figura Anexa 57. Gráfico para la anomalía de Bouguer.